

令和 7 年度
修士学位論文

GNSS 品質監視に基づく
移動ロボットの自己位置推定と
作物生育環境マッピング

信州大学大学院
総合理工学研究科纖維学専攻
機械ロボット分野

指導教員 河村 隆 教授

令和 6 年入学
学籍番号 24FS310F
氏名 許 鵬飛

目次

第 1 章	緒言	1
1.1	研究背景	1
1.2	農業環境における課題	2
1.3	本研究の目的	3
1.4	本論文の構成	4
第 2 章	関連研究	5
2.1	圃場巡回システム	5
2.2	農業環境における自己位置推定	5
2.2.1	LiDAR を用いた自己位置推定	5
2.2.2	GNSS/INS/LiDAR のセンサフュージョンと課題	6
2.2.3	NLOS/マルチパスと完全性監視	6
2.2.4	本研究の特徴	7
2.3	農業用生育環境センシングセンサと分光計測	7
2.4	本研究の位置づけと新規性	8
2.5	用語の定義	8
第 3 章	GNSS 品質監視に基づく自己位置推定	10
3.1	システム構成	10
3.1.1	移動ロボットプラットフォームと搭載センサ	11
3.1.2	ソフトウェア構成	11
3.2	農業用ハウス環境における GNSS 観測異常の分類	16
3.3	提案手法：GNSS 品質監視モジュールの設計	17
3.3.1	入出力仕様と遮断の実装	17
3.3.2	可用性判定	17
3.3.3	完全性監視：短時間増分整合性検定	18
3.3.4	外れ値発生直後の入力防止	18

3.4	完全性監視のための座標変換 ······	19
3.5	実験と評価 ······	21
3.5.1	比較手法と設定 ······	22
3.5.2	評価指標 ······	23
3.5.3	評価結果と考察 ······	24
第 4 章	高速分光センシングシステムの構築 ······	27
4.1	センサユニットの概要 ······	28
4.2	従来方式の課題 ······	29
4.3	分光データのハードウェア同期取得アーキテクチャ ······	31
4.3.1	取得タイミング設計 ······	31
4.3.2	サンプリング実装 ······	32
4.3.3	有効画素範囲の補正 ······	32
4.4	評価 ······	33
4.4.1	高速動作の検証 ······	33
4.4.2	取得データの妥当性確認 ······	34
4.5	その他センサのデータ取得と統合 ······	35
4.6	まとめ ······	36
第 5 章	生育環境マッピング ······	38
5.1	マッピング手法と実験条件 ······	38
5.2	データの同期と生育環境 ······	38
5.2.1	分光スペクトルの特徴抽出と空間マッピング ······	39
5.2.2	スペクトル特徴による植生・非植生の識別可能性 ······	39
5.2.3	環境データと場所による変化 ······	39
5.3	生成された生育環境マップ ······	40
5.4	考察 ······	43
第 6 章	結言 ······	44
6.1	本研究のまとめ ······	44
6.2	今後の課題 ······	45
参考文献	···	46
謝辞	···	48
付録 A	使用したセンサ ······	49

付録 B	インターフェース回路	55
付録 C	室内で検証した Navigation2 の動作確認	57
付録 D	付録参考文献	58

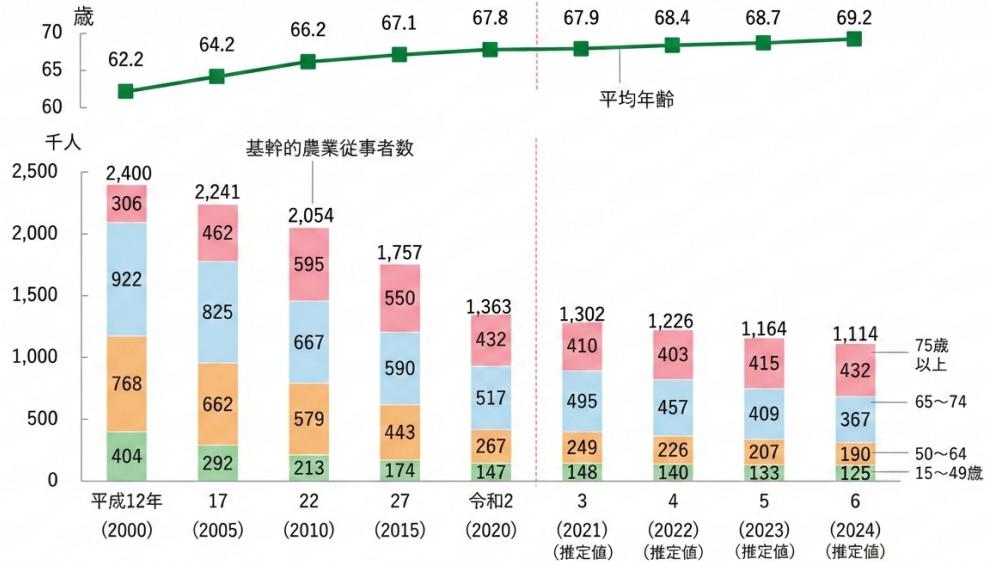
第1章 緒言

1.1 研究背景

日本の農業分野では、担い手の減少および高齢化の進行に伴い、労働力不足が深刻な社会課題となっている。農林水産省の令和6年度白書によれば、基幹的農業従事者数は約20年間で半減し、平成12年の240万人から令和6年には111万4千人へ減少している。また、65歳以上が全体の71.7%を占め、平均年齢は69.2歳である[1]。Fig. 1.1に、基幹的農業従事者数と平均年齢の推移を示す。

このような労働制約の下で、生産性向上と省力化を同時に実現する手段として、農業現場で取得される多様なデータを利活用するデータ駆動型の営農が重要となる。これを実現するうえで、広い圃場を反復的に巡回し、人手に頼らずモニタリングを行うための手段として、自律移動ロボット（Automatic Guided Vehicle、以下、AGV）による圃場巡回モニタリングは有効である。本研究では、桑畠での適用を一例として、AGVを用いて圃場を巡回し、環境情報および生育に関連する計測情報を自動取得・可視化するシステムの構築を目指す。

近年、スマート農業の推進により、センシング、情報通信、位置情報基盤、データ管理、および自動走行農機・ロボット等の技術要素を統合し、営農の省力化・高度化を図る取り組みが進められている[2]。スマート農業の実装においては、圃場内の状態を継続的に計測し、空間情報として蓄積・可視化する計測基盤が不可欠である。AGVに搭載したセンサによる巡回計測は、走行に伴い広い範囲を連続的に観測できるため、空間密度と更新頻度を両立しやすい。さらに、自動走行により人手依存を低減しつつ、反復的な観測を可能にする。また、スマート農業では、RTK-GNSS等の位置情報基盤、圃場周辺作業の省力化、情報通信環境整備、センシング・データ管理が相互に接続される[2]。Fig. 1.2に、スマート農業の施策イメージを示す。



資料：農林水産省「2000年世界農林業センサス」、「2005年農林業センサス」、「2010年世界農林業センサス」（組合集計）、「2015年農林業センサス」（組合集計）、「2020年農林業センサス」、「農業構造動態調査」を基に作成

注：1) 各年2月1日時点の数値。ただし、平成12(2000)、17(2005)年の沖縄県については前年12月1日時点の数値

2) 平成12(2000)年及び平成17(2005)年については販売農家の数値

3) 令和3(2021)～6(2024)年については、農業構造動態調査の結果であり、権本調査により把握した推定値

Fig. 1.1 Number of core agricultural workers and average age.[1]

1.2 農業環境における課題

巡回計測を担う移動ロボットの実用化には、計測データに取得位置を正確に付与し、圃場座標上に空間的に配置するための高精度な自己位置推定が前提となる。しかし、農業用ハウスのような環境では、様々困難が存在する。

第一に、ハウス骨組み、周辺植生等により GNSS 信号が遮蔽・マルチパスを受けやすく、RTK 測位においても NLOS (Non-Line-of-Sight, 以下, NLOS) に起因する外れ値が生じ得る。この種の外れ値がバックエンド最適化へ誤拘束として注入されると、地図を破壊し、地図歪みを引き起こす恐れがある。

第二に、ハウス内通路は狭隘かつ単調な形状となりやすく、LiDAR スキャンマッチングにおける縮退が生じやすい。その結果、LiDAR-Inertial Odometry (以下, LIO) は短時間では高精度であっても、長時間走行でドリフトが蓄積する。

第三に、農業計測では様々なセンサーの活用が進んでいる。温湿度や CO₂ などの環境情報に加え、分光情報のようなデータを用いた生育評価も重要となっている。ロボットに搭載する場合、データの取得間隔や同期の精度が地図の質を左右するため、計測と自己位置推定を同時に行



Fig. 1.2 Conceptual overview of smart agriculture initiatives.[2]

う必要がある。そのため、ハウス内での自動計測を実用化するには、GNSSが不安定な場所でも正確に位置を特定し、同時に作物の生育環境地図を作る必要がある。

1.3 本研究の目的

本研究の目的は、GNSS測位品質が不安定な農業用ハウスにおいて、3D-LiDAR, IMU, RTK-GNSS(Real Time Kinematic Global Navigation Satellite System)を統合し、信頼性の高い自己位置推定を実現することである。提案手法では、バックエンド最適化の破綻を防ぐため、受信機の状態量のみでは判別が困難なNLOS誤差に着目する。具体的には、LIOによる短時間の移動量とGNSS観測値の整合性をリアルタイムで評価し、データの採用や重み付けを制御するGNSS品質監視モジュールを提案する。

さらに、推定した軌跡に基づき、温湿度、CO₂濃度、気圧等の環境センサ値を取得し、分光センサによるスペクトル情報および位置情報と統合し、生育環境マップを生成することを目的とする。これにより、人手による計測の頻度の制約を緩和する。

1.4 本論文の構成

本論文は全 6 章から構成される。第 2 章では、農業ロボットにおける自己位置推定および環境センシングに関する関連研究を整理し、本研究の位置づけを示す。第 3 章では、GNSS 品質監視に基づく自己位置推定手法の設計と評価を述べる。第 4 章では、分光センシングシステムのハードウェア構築と駆動方式を述べる。第 5 章では、提案した位置推定手法とセンシングシステムを統合し、実環境における生育環境マップ生成を示す。第 6 章では、本研究の結論と今後の展望を述べる。

第2章 関連研究

本研究の目的は、農業ロボットの自動走行において、信頼性の高い自己位置推定と環境センシングを統合し、生育環境マップを生成することである。本章では、巡回システム、自己位置推定、GNSS の品質監視、および農業センシングに関する先行研究を整理し、本研究の立ち位置を明確にする。

2.1 圃場巡回システム

本研究室の先行研究では、AGV を用いた桑畠巡回システムが提案されている [3]。同研究は、圃場での巡回観測の有効性を示した一方で、自律走行は主にシミュレーション上で検証され、実機における安定運用の観点では課題が残っていた。また、位置情報として GNSS を利用していたものの、RTK による補正は導入されていなかった。

これに対し筆者は、3D-LiDAR、IMU、およびホイールオドメトリを用いた AGV の自動走行を実現した [4]。しかし、2D-LiDAR による SLAM は、ハウスのような環境では自己位置推定が不安定になりやすい。また、2D 計測では高さ情報を取得できないため、枝や棚などの障害物を正しく認識することが困難である。さらに、車輪の空転やスリップによって誤差が蓄積するという課題もあった。そこで本研究では、3D-LiDAR と IMU による自己位置推定を主軸とし、RTK-GNSS による位置補正を組み合わせる手法を採用する。これにより、ハウス環境での巡回計測に必要な信頼性と安全性を確保する。

2.2 農業環境における自己位置推定

2.2.1 LiDAR を用いた自己位置推定

GNSS 信号が不安定な環境では、3D-LiDAR と IMU を組み合わせた LIO が自己位置推定の中核となる。LOAM [5] 以降、LIO-SAM [6] などの最適化手法が発展し、近年では計算効率に優れ

た FAST-LIO2 [7] が広く利用されている。

しかし、農業用ハウスのような環境では、直線的な通路が続くため縮退と呼ばれる現象が発生しやすい。これは進行方向の特徴が不足することでスキャンマッチングが不安定になる現象であり、長時間走行でドリフトが蓄積し、地図が歪む原因となる [8]。したがって、LIO 単独の推定に頼らず、外部基準を用いてドリフトを抑制する手法が重要となる。

2.2.2 GNSS/INS/LiDAR のセンサフュージョンと課題

LIO のドリフトを抑制するため、RTK-GNSS による絶対位置情報を統合する手法が一般的である。多くの場合、拡張カルマンフィルタやグラフ最適化を用いて GNSS データを統合するが、これらの手法は GNSS の誤差が正規分布に従うことや受信機の状態が信頼できることを前提としている [9]。

しかし、ハウス環境では金属フレーム等による電波の反射や遮蔽が発生する。この影響で、受信機の表示が良好であっても、実際には数メートルの誤差が含まれることがある。このような誤ったデータを最適化計算に導入すると、推定位置が大きく飛び、地図全体が破壊される恐れがある。そのため、GNSS データを動的に選別し、安全に統合するための品質監視の枠組みが必要である。

2.2.3 NLOS/マルチパスと完全性監視

GNSS の誤差の主な要因として、マルチパスと NLOS 受信が挙げられる。マルチパスは直達波と反射波の干渉によるものだが、NLOS は反射波のみを受信するため、測距誤差が大きなバイアスとなりやすい。このため、受信機が出力する状態量のみでは外れ値を十分に判別できない場合がある。先行研究 [3] でも、農業施設周辺で GNSS 軌跡が局所的に乱れる事例が報告されている (Fig. 2.1)。

完全性監視は、測位精度が要求を満たさない場合に警告や排除を行う仕組みである。航空分野では RAIM 等が普及しているが、地上環境では障害物の影響が大きく、GNSS 単体での判定には限界がある。近年では、深層学習を用いて誤差をモデル化する DeepPCO[10] などの手法も提案されているが、これらは膨大な学習データを必要とする。

また、誤ったデータの影響を抑える手法として、スイッチ変数を用いて不要な拘束を自動的に無効化するロバスト最適化 [11] も提案されている。これは最適化のプロセスにおいて外れ値の影響を最小限に抑えるアプローチである。

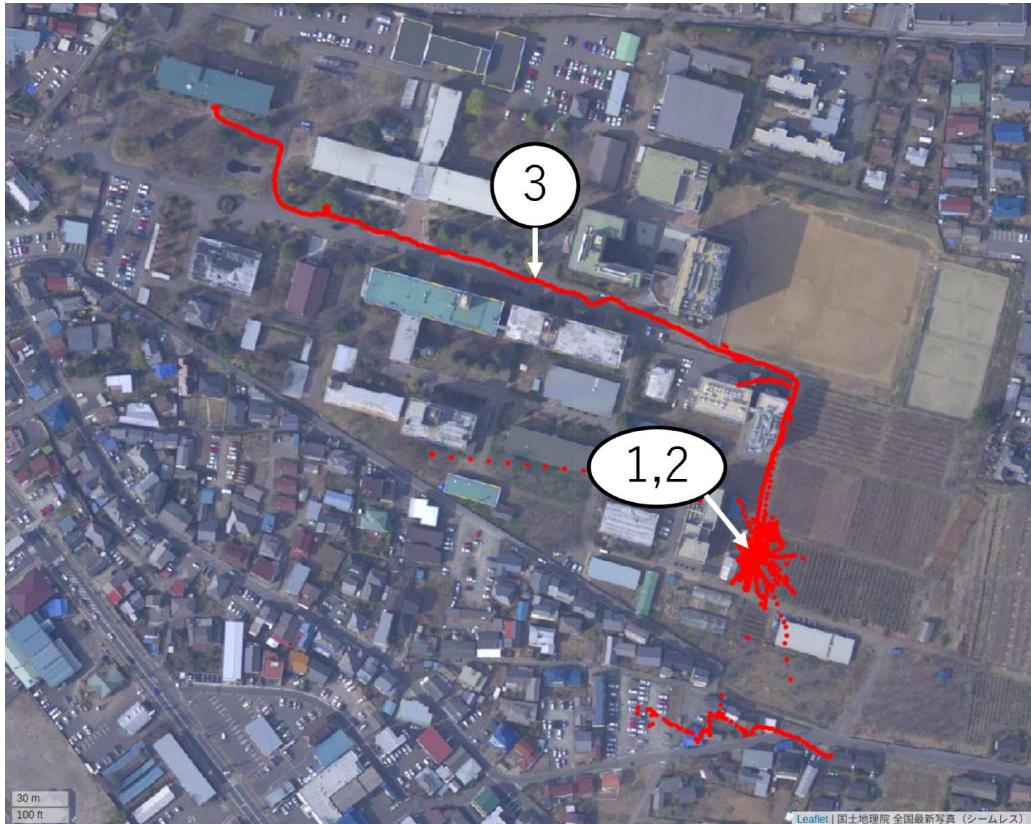


Fig. 2.1 GNSS trajectory interference in farming. Segments 1 and 2 are near farmland and facilities, where environment degrades accuracy.[3]

2.2.4 本研究の特徴

本研究の特徴は、農業環境で発生する GNSS の大きな誤差を、LIO を基準とした整合性検定によって事前に除去する点にある。従来の多くの手法は、最適化計算の内部で誤差に対処するが、本研究ではデータを投入する前の段階で GNSS 拘束を厳しく選別する。これにより、誤ったデータによる SLAM の破壊を防ぎ、自己位置推定の信頼性を高めている。

2.3 農業用生育環境センシングセンサと分光 計測

環境情報を地図上に正しく配置するためには、計測時の自己位置が正確である必要がある。自己位置の誤差はマップの品質に直結するため、信頼性の高い自己位置推定は、高精度な生育環境マップを作成する上で不可欠な要素である。

精密農業において、圃場内の微気象（温度、湿度、CO₂ 濃度など）を把握することは重要である。固定式のセンサノードは広く普及しているが、設置コストや電源確保の面から、細かな空間分解能でデータを取得することには限界がある。これに対し、移動ロボットにセンサを搭載して巡回計測を行うことで、より高密度な環境マップを作成する試みが進んでいる [12]。

また、作物の状態を傷つけずに診断する手法として、分光反射率の計測が注目されている。近年では、MEMS 技術を活用した小型分光センサ（C12880MA 等）が登場し、ドローンやロボットへの搭載が容易になった [13]。

先行研究 [3] では、このセンサを用いた計測システムが構築されたが、移動しながらの連続的な計測が難しいことや、回路設計の制約によりデータ取得速度が 50 kHz 程度に留まるという課題があった。しかし、センサ自体は MHz オーダの高速動作が可能な設計である。したがって、これらの制限はセンサ自体の性能ではなく、読み出し回路側の設計に起因するものと考えられる。

2.4 本研究の位置づけと新規性

本研究の新規性は、農業環境における GNSS 品質の解析、監視モジュールの提案、およびセンサユニットの統合にある。

まず、ハウス環境のデータから NLOS 等の外れ値の発生傾向を整理し、自己位置推定の破綻を招く条件を明確にした。これに基づき、受信機の状量だけでなく LIO との整合性によって GNSS 信号を評価する監視モジュールを提案し、信号劣化時でも地図の破壊を防ぎつつ正確な位置補正を行う手法を実現した。さらに、分光センサ C12880MA の駆動方式を最適化することで 5 MHz の高速サンプリングを達成し、これらを統合して環境マッピングを実証する。

2.5 用語の定義

本節では、本文中で頻出する専門用語について、本論文における意味を簡潔に定義する。

GNSS : Global Navigation Satellite System の総称であり、本論文では、衛星測位に基づく位置観測を一般に指す場合に GNSS と表記する。

RTK-GNSS : RTK (Real-Time Kinematic) 差分補正を用いる GNSS 測位を指す。本研究の受信機は RTK 対応であるが、測位解は環境・補正情報の状態により RTK-FIX / RTK-FLOAT / No-Fix

へ遷移し得る。以降、RTK 補正を前提とする受信機出力を述べる箇所では RTK-GNSS と表記し、補正状態を区別しない一般論・総称として述べる箇所では GNSS と表記する。

ROS 2 : Robot Operating System 2 の略称であり、ロボットソフトウェア開発のためのミドルウェアである。

topic/トピック : ROS 2 における通信の単位であり、ROS 2 ノード間でメッセージを送受信するための論理チャネルである。

ROS 2 bag (rosbag2) : ROS 2 におけるデータ記録機構であり、topic 通信を時系列ログとして保存したデータを指す。本論文では、実験時に取得したセンサデータおよび推定結果の記録に用いる。

tf : ROS 2 において座標系間の位置・姿勢関係を管理する仕組みである。本研究では、map, odom, base_link などの座標系を用いてロボットの状態を表現する。

cmd_vel : ロボットの速度指令を表す ROS 2 topic であり、並進速度および角速度を含む。本研究では、自律走行モジュールから車体へ送信される制御入力として用いる。

SLAM : Simultaneous Localization and Mapping の略称であり、自己位置推定と環境地図生成を同時に使う枠組みである。

Foxglove : ROS 2 の可視化ツールであり、実行中のノードやトピックをリアルタイムで監視・可視化する。本研究では、実験データの可視化およびデバッグに用いる。

NIR : Near-Infrared の略称であり、分光センサで取得される近赤外線波長帯（およそ 700～1400 nm）を指す。

RED 帯域 : Red 波長帯（およそ 600～700 nm）を指す。

正規化差分 (ND) : 正規化差分 (Normalized Difference, ND) は、2つのスペクトル成分の相対的な差を表す指標であり、照度変化の影響を低減する目的で用いられる。本研究では、NIR 帯域と Red 帯域の値を用いて正規化差分を算出し、スペクトル形状の違いを相対的に評価する。

第3章 GNSS品質監視に基づく自己位置推定

本章では、農業用ハウスのようにGNSSの品質が不安定な環境においても、安定して動作する自己位置推定システムを構築する。具体的には、LIOとRTK-GNSSを統合し、電波の遮蔽やマルチパスによる誤差を抑制する手法について述べる。なお、本章ではRTK補正を前提とした出力をRTK-GNSS、それらを総称してGNSS観測と呼ぶ。

本手法の特徴は、受信機の状態量に基づく判定と、LIOの移動量との整合性を利用したGNSS品質監視モジュールを提案する点にある。このモジュールは、見かけ上の精度情報が良好であっても、実際には反射波などの影響で数メートルの誤差が含まれるデータを効果的に検知・排除する。提案手法によって、バックエンドのグラフ最適化に信頼できるデータのみを選別して投入することで、長時間走行における自己位置推定の安定性を向上させる。

3.1 システム構成

本研究で構築した移動ロボットシステムは、農業用ハウスにおいて自己位置推定と環境センシングを同時にを行うことを目的として設計されている。本システムは、周囲の環境とロボットの状態を観測するハードウェア系と、それらの情報を統合して位置推定およびマッピングを行うソフトウェア系で構成される。システム全体の構成とデータの流れをFig. 3.1に示す。以下では、ハードウェア、ソフトウェア、および各座標系の関係について述べる。

農業環境では、電波の遮蔽やマルチパスによりGNSSの品質が大きく変動する。また、ハウス内通路のような単純な形状の場所では、LiDARによる推定が不安定になる縮退が発生しやすい。これらの環境特性を踏まえ、本研究では観測データの品質変動を考慮した統合手法を採用する。

以下では、まず移動ロボットの車体と搭載センサについて述べ、次にLIO、ナビゲーション、およびGNSS品質監視に基づくソフトウェア構成について説明する。

3.1.1 移動ロボットプラットフォームと搭載センサ

移動ロボットには、不整地走行に適した AGV 車体を用い、圃場内を巡回しながらセンサデータを取得できる構成とした。車体には Gmade 社の GS02 を採用した。環境認識と自己位置推定のために、3D-LiDAR (Livox Mid-360) を使用する。LiDAR 点群は地図生成と自己位置推定に使用する。また、LiDAR 内蔵の IMU は、点群の歪み補正や短時間の姿勢推定に利用する。Livox Mid-360 の外観と仕様を付録 A に示す。

絶対位置の計測には、RTK-GNSS 受信機 (u-blox ZED-F9P) を用いる。基準局からの補正データ（森林総合研究所の RTK 基準局サービス [14] を利用）を無線 LAN 経由で取得し、屋外環境においてセンチメータ級の精度を目指す。ZED-F9P 受信機およびアンテナの外観と仕様を付録 AA に示す。

一方で、ハウス周辺では作物や構造物の影響で、測位状態が不安定になることが確認されている。そのため、本研究では GNSS データを常に信頼するのではなく、品質監視に基づいて自己位置推定への重み付けを動的に制御する。

ロボットの駆動には BLDC モータを使用するが、不整地でのスリップを考慮し、車輪オドメトリは自己位置推定としては用いない。センサデータの取得と処理は Raspberry Pi 4B で行い、無線 LAN を介して PC と通信を行う。AGV の外観と構成を Fig. 3.2 に示す。

3.1.2 ソフトウェア構成

本システムは ROS 2(Robot Operating System 2)[15] を基盤とし、自己位置推定と地図生成をモジュール化して構成している。具体的には、フロントエンドに LIO を用いることで高頻度な位置推定を行い、バックエンドでは RTAB-Map[16] によってループ閉じ込みや因子グラフ最適化を実行する。さらに、提案する GNSS 品質監視モジュールによって選別・調整された RTK-GNSS データを、バックエンドの位置制約として統合する仕組みとした。

また、将来的な自動走行への対応を確認するため、Navigation2[17] を接続している。これにより、生成された地図や座標系 TF が標準的なナビゲーションシステムでそのまま利用可能であることを確認した。なお、本研究の主な評価対象は自己位置推定の精度と地図の整合性であり、自動走行性能自体の定量評価は本論文の範囲外とする。

3.1.2.1 ROS 2

ソフトウェア基盤には ROS 2 を採用する。ROS 2 は DDS に基づく通信機構を備え、分散処理、実運用における信頼性、およびモジュール再利用性の観点から、研究開発用ロボットシステムの構築に適している。本研究では、各センサのデータ取得、自己位置推定、地図生成、および自動走行をノードとして分離し、トピックおよび TF により統合する。

3.1.2.2 Navigation2

自動走行モジュールとして ROS 2 の Navigation2 (Nav2) を用いる。Nav2 は、グローバル経路計画 (Global Planner)，ローカルプランニング／追従制御 (Local Controller)，および Behavior Tree によるタスク実行を統合的に提供するナビゲーションフレームワークである。本システムでは、RTAB-Map が提供する map 座標系での自己位置推定結果に基づいて経路計画を行い、出力された速度指令を cmd_vel として車体へ送信する構成とした。また、局所障害物の表現には Spatio-Temporal Voxel Layer (STVL) [18] を用い、3D LiDAR 点群をボクセルとして保持することで局所コストマップを生成する。加えて、研究室内の静的環境において、経路生成から cmd_vel 出力までの基本動作を確認した (Fig. C.1)。ただし、本研究では室内での基本動作確認に留まり、農業用ハウス環境における自動走行性能の定量評価は未実施である。

3.1.2.3 LiDAR–IMU オドメトリおよび SLAM

フロントエンドには FAST-LIO2[7] を採用し、LiDAR 点群と IMU 計測から高頻度の相対オドメトリを推定する。FAST-LIO2 は、高速なスキャンマッチングと IMU 統合により、リアルタイムでの安定した動作が可能である。

バックエンドには RTAB-Map を用い、ループ閉じ込みと因子グラフ最適化によって地図の整合性を向上させる。採用の理由は、まずループ閉じ込みによる長期的なドリフト抑制すること、次に複数のセンサ情報を制約として統合できる枠組みを備えていることが挙げられる。さらに、将来的にカメラなどのセンサを追加する場合でも拡張が容易であり、農業環境でのマッピングへの発展性が高い点である。

3.1.2.4 座標系と TF 構成

本システムの座標系は、ROS 2 の構成に従って設計されている。FAST-LIO2 はオドメトリ (`odom` → `base_link`) を推定し、RTAB-Map は地図との整合性を保つための全体的な補正 (`map` → `odom`) を担う。また、車両中心 (`base_link`) から LiDAR やアンテナへの位置関係は、静的

なパラメータとして定義している。

3.1.2.5 データ処理フロー

システムの情報の流れは以下の通りである。まず、FAST-LIO2 が点群と IMU データからロボットの相対的な移動量を計算する。同時に、GNSS 品質監視モジュールが受信機の GNSS 状態と LIO の移動量を比較し、信頼できる GNSS データのみを選別・調整する。次に、RTAB-Map がこれらの情報と点群を統合して地図を作成し、ループ閉じ込みによる軌跡の最適化を行う。この地図と自己位置をもとに、Navigation2 が経路計画と走行制御を行う。最終的に、最適化された軌跡に環境センサの値を対応付けることで、生育環境マップが生成される。

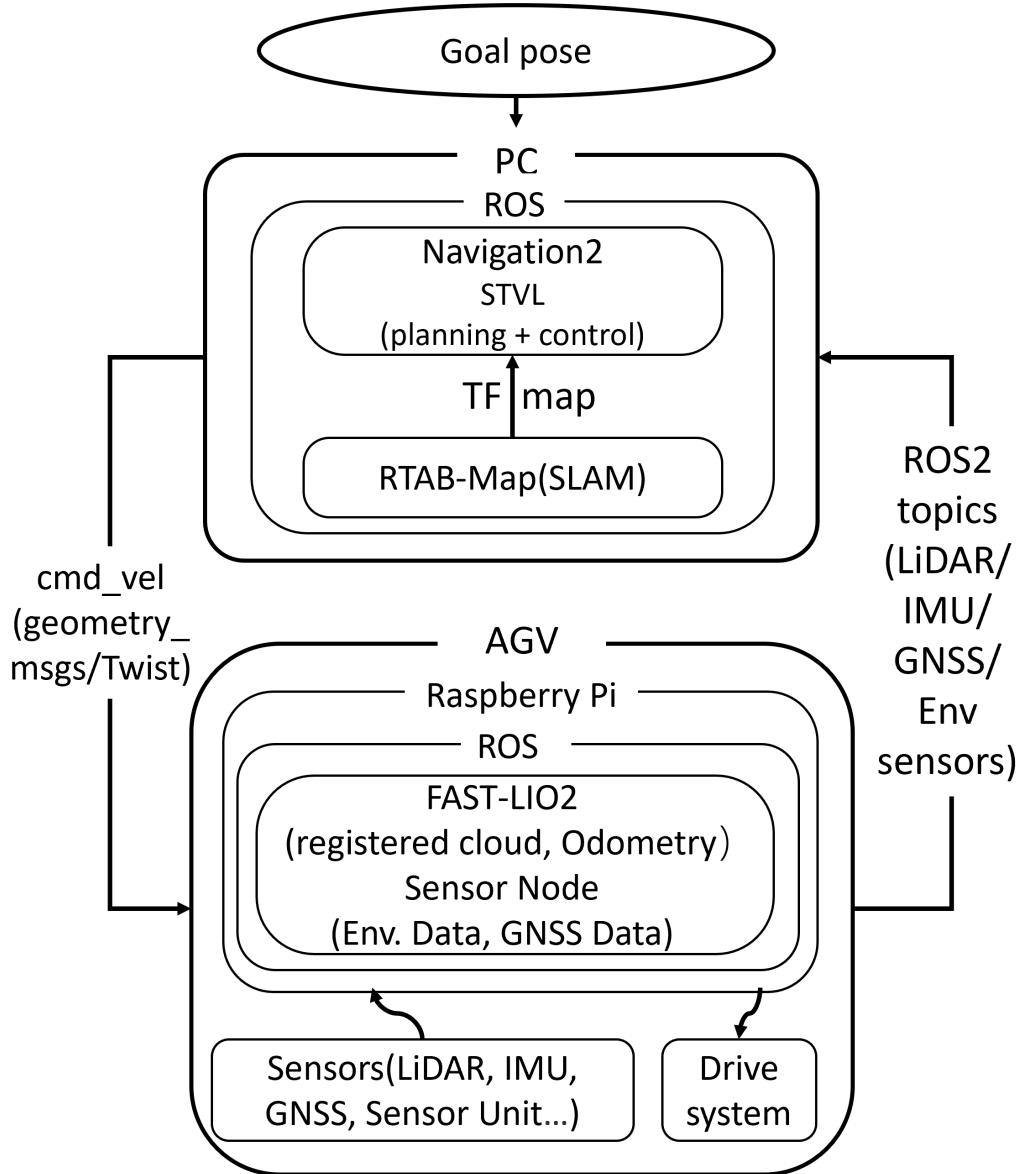


Fig. 3.1 Overview of the system architecture and data flow. The PC-side ROS 2 stack runs RTAB-Map to generate a globally consistent map and pose estimates, while the AGV-side ROS 2 stack runs FAST-LIO2 to provide registered point clouds and odometry. Sensor topics are exchanged via ROS 2. Navigation2, incorporating STVL for 3D obstacle avoidance, serves as the decision-making layer. it processes the SLAM data to generate and send velocity commands to the AGV.

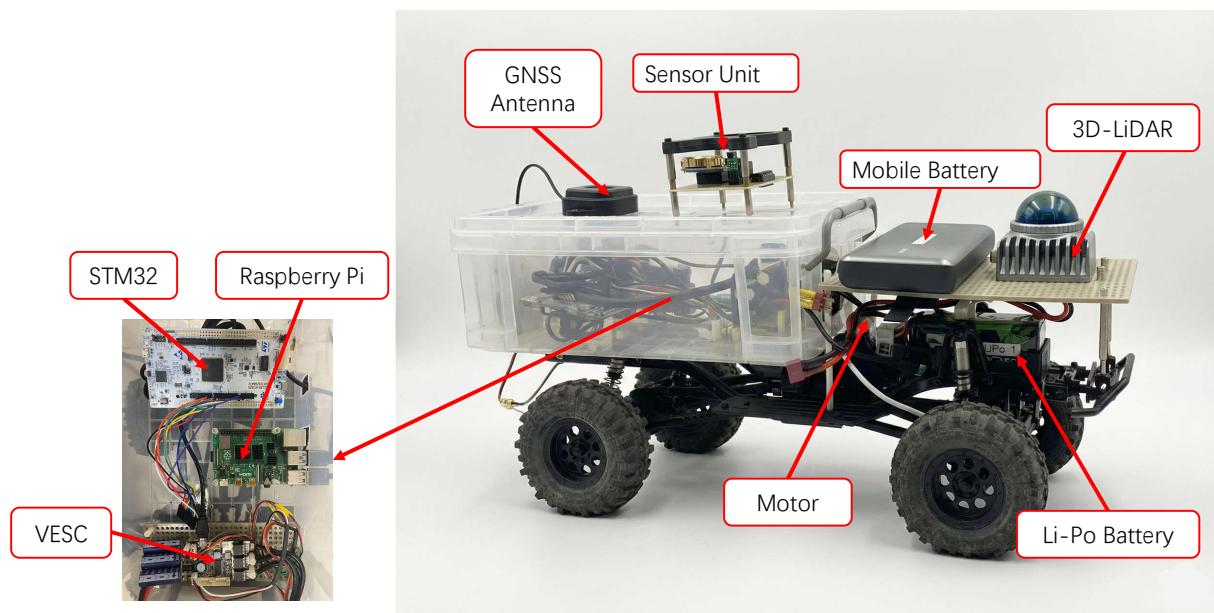


Fig. 3.2 Overview of the AGV and onboard sensors used in this study.

3.2 農業用ハウス環境における GNSS 観測異常の分類

農業用ハウス環境において、RTK-GNSS は一時的に精度が低下することがある。これは、ハウスの骨組みや作物による電波の遮蔽、反射、あるいは補正情報の中斷などが原因である。本研究では、これらの品質低下の GNSS 信号を区別すべき 3 つの故障モードとして整理する。

1 つ目は GNSS 利用不可である。これは、電波の遮蔽や補正データの途絶により、測位解そのものが得られない、あるいは情報として使えない状態を指す。

2 つ目は NLOS やマルチパスによる大きな誤差である。これは、受信機の表示が良好で誤差の推定値も小さいにもかかわらず、実際には位置が数メートル飛んでしまう状態である。本研究では、この見かけ上は正しいが実際には誤っているデータを排除することに注目する。

3 つ目は LIO の縮退である。ハウスの通路など形状が単純な場所では、LiDAR のデータだけでは位置を特定しにくくなり、縮退が発生しやすい。また、不整地では車輪がスリップしやすいため、車輪オドメトリは位置推定には適さないと判断した。

本研究の目的は、GNSS が不安定な環境において、誤ったデータをグラフ最適化に含めないことを最優先としつつ、精度の高い RTK データを用いて LIO の累積誤差を抑えるシステムを構築することである。そのために、バックエンドに送るデータを選別する品質監視モジュールを設計する。

3.3 提案手法：GNSS 品質監視モジュールの設計

本研究の最優先課題は、RTAB-Map に入力される GNSS データによって地図の精度が低下するのを防ぐことである。そのため、GNSS データをリアルタイムで選別する品質監視モジュールを設計した。農業用ハウスでは、電波の遮蔽や反射、補正情報の中断により、大きな誤差が含まれる可能性がある。このとき、誤ったデータが 1 つでも RTAB-Map に入力されると、地図全体が歪んでしまう。したがって、本手法では GNSS の重みを調整するのではなく、採用か遮断かの 2 通りで制御を行う。

3.3.1 入出力仕様と遮断の実装

品質監視モジュールには、GNSS の観測値、受信機の状態量、および LIO が出力する移動量を入力する。モジュールは、入力された GNSS データを以下のどちらかで出力する。

- 採用：データをそのまま RTAB-Map へ送り、本来の共分散を保持する。
- 遮断：データを RTAB-Map へ送らない、または非常に大きな共分散に置き換えることで、そのデータを実質的に無効化する。

反射波などの影響がある環境では、受信機が精度は良いと誤判定して小さな共分散を報告することがある。この場合、単に重みを少し軽くするだけでは誤ったデータの影響が残ってしまう。そこで本研究では、遮断時には共分散を固定の大きな値（例：99999）に設定し、

$$\text{diag}(C_{\text{blk}}, C_{\text{blk}}, C_{\text{blk}})$$

として拘束を確実に無効化する実装とした。

3.3.2 可用性判定

可用性判定は、受信機自身が出力する情報に基づき、データの基本的な妥当性を確認する。その目的は、測位の失敗や補正データの中断など、明らかに利用不可能な状態のデータを事前に遮断することである。

具体的には、測位モードや衛星数などの情報をトリガとして遮断を行う。ただし、受信機の情

報が一時的に遅延することもあるため、情報が取得できないからといって直ちに遮断するのではなく、明確なエラー条件を満たした場合のみ遮断する。

また、起動直後はデータの履歴が足りず、後述する整合性検定が正しく動作しないことがある。そのため、開始直後の一定期間は初期化区間とし、可用性判定のみで妥当性を確認してデータを通すようにした。これにより、システム起動直後にデータが連続して遮断されるのを防いでいる。

3.3.3 完全性監視：短時間増分整合性検定

完全性監視は、受信機の状態が良好であっても、NLOSなどによって生じる大きな位置誤差を検知するための仕組みである。本手法では、絶対位置を直接比較するのではなく、短い時間(ΔT)の間にロボットがどれだけ移動したかという移動量増分を比較する。

時刻 t における GNSS の位置を $p_{\text{gnss}}(t)$ 、LIO による位置を $p_{\text{lio}}(t)$ とすると、両者の移動量の差 $r(t)$ は次のように定義される。

$$r(t) = [p_{\text{gnss}}(t) - p_{\text{gnss}}(t - \Delta T)] - [p_{\text{lio}}(t) - p_{\text{lio}}(t - \Delta T)] \quad (3.1)$$

次に、GNSS の共分散 $\Sigma_{\text{gnss}}(t)$ と、LIO 側の誤差 Σ_{lio} を用いて、マハラノビス距離 $d(t)$ を計算する。

$$S(t) = \Sigma_{\text{gnss}}(t) + \Sigma_{\text{lio}}(t), \quad d(t) = r(t)^T S(t)^{-1} r(t) \quad (3.2)$$

この値 $d(t)$ があらかじめ設定した閾値 γ を超えた場合、その GNSS データは異常であると判断して遮断する。

ここで、受信機が精度が良いと誤判定して共分散を小さく報告した場合、検定が敏感になりすぎて正常なデータまで遮断してしまう可能性がある。これを防ぐため、 Σ_{gnss} には下限値を設けている。また、判定が頻繁に切り替わるのを避けるため、過去数サンプルの中央値を利用し、一定回数以上連続して閾値を超えるとなった場合のみ、遮断を維持する仕組みとした。

3.3.4 外れ値発生直後の入力防止

増分整合性検定は、過去のデータや履歴を利用するため、検知の遅延が生じる可能性がある。しかし、NLOS による大きな誤差は、たった 1 つのデータがバックエンドに入力されるだけでも、地図の精度を著しく低下させる。そこで本研究では、異常が発生した瞬間の最初のデータを確実に遮断するため、2 つの仕組みを導入した。

1つ目は GNSS が極端に小さい共分散を報告している場合に、増分残差の大きさ $\|\mathbf{r}(t)\|$ がわずかな閾値 r_{tw} を超えた瞬間に、そのデータを遮断と判定する仕組みです。このルールにより、高い精度を装いつつ実際には大きな偏りを持つ NLOS のデータを、排除することが可能になる。

2つ目は 1 サンプル遅延による出力制御です。時刻 t における GNSS データはすぐに RTAB-Map へ渡さず、一旦バッファに保持する。次のサンプルが得られた時点での判定結果が遮断であれば、バッファしていた時刻 t のデータも破棄する。この処理により、検定に遅延が生じた場合であっても、異常なデータがバックエンドへ入力される確率を低減できる。本研究では、地図が壊れるリスクを最小限に抑えることを最優先とし、1 サンプル分の遅延を許容する設計とした。

3.4 完全性監視のための座標変換

完全性監視において、GNSS と LIO の短時間の移動量を比較するには、両者を同一の直交座標系で扱う必要がある。そのため、GNSS による地理座標を局所的な直交座標へと変換する処理を行う。GNSS が報告する位置は一般に WGS84 に基づく地理座標 (φ, λ, h) （緯度・経度・楕円体高）であるが、距離の計算や増分の比較には ENU 座標系（East–North–Up, 東・北・上の局所直交座標）を用いるのが一般的である。

なお、本研究において ENU 座標は品質監視モジュール内部の計算にのみ使用し、RTAB-Map への入力は既存のシステムとの互換性を優先して NavSatFix 形式を維持した。

GNSS の地理座標から局所 ENU 座標への変換には、楕円体モデルに基づく GeographicLib[19] 等のライブラリが広く用いられる。これらのライブラリは高精度かつ汎用的であるが、本研究の対象はハウス周辺の限られた走行範囲であり、さらに本研究は Raspberry Pi 4B を使用しているため、計算負荷や依存ライブラリの増加を避ける目的で、以下の短距離平面近似による変換を採用した。

原点 (φ_0, λ_0) は、初期の高品質な測位（RTK-FIX が連続する区間など）から定め、以降は同一の原点に対して一貫して変換を行う。地球半径 R を用いた近似式は以下の通りである。

$$x \approx (\lambda - \lambda_0) \cos \varphi_0 \cdot R, \quad (3.3)$$

$$y \approx (\varphi - \varphi_0) \cdot R \quad (3.4)$$

ここで x は東方向、 y は北方向に対応する。本研究の完全性監視は移動量の差に着目しているため、同一の原点を用いて変換を行う限り、数メートル程度の局所的な運動に対し、この近似誤差

が問題となることはない。ただし、走行範囲が広大な場合や高度差が無視できない環境においては、橢円体モデルに基づく厳密な変換の導入が必要となる。

3.5 実験と評価

実験は信州大学農場のハウス内通路で実施した。AGV を走行させながら、LiDAR 点群、IMU、GNSS、および受信機の状態を ROS 2 bag 形式で同期記録した。収集したデータに対する解析は研究室環境で行い、同一のデータセットに対して各手法を適用した。本実験では、提案する GNSS 品質監視モジュールが、RTAB-Map の因子グラフ最適化に対する誤った拘束の注入リスクを低減し、地図の整合性を改善できるかを検証する。

なお、本実験環境では RTK-GNSS が安定して利用可能な時間帯が多い一方で、電波の遮蔽やマルチパスに起因する明確な外れ値は発生頻度が低く、再現性のあるデータ収集が困難であった。そこで本研究では、NLOS 由来の測位異常が疑われる走行データを抽出し、品質監視の有効性を検証する。実験環境の概観を Fig. 3.3 に示す。

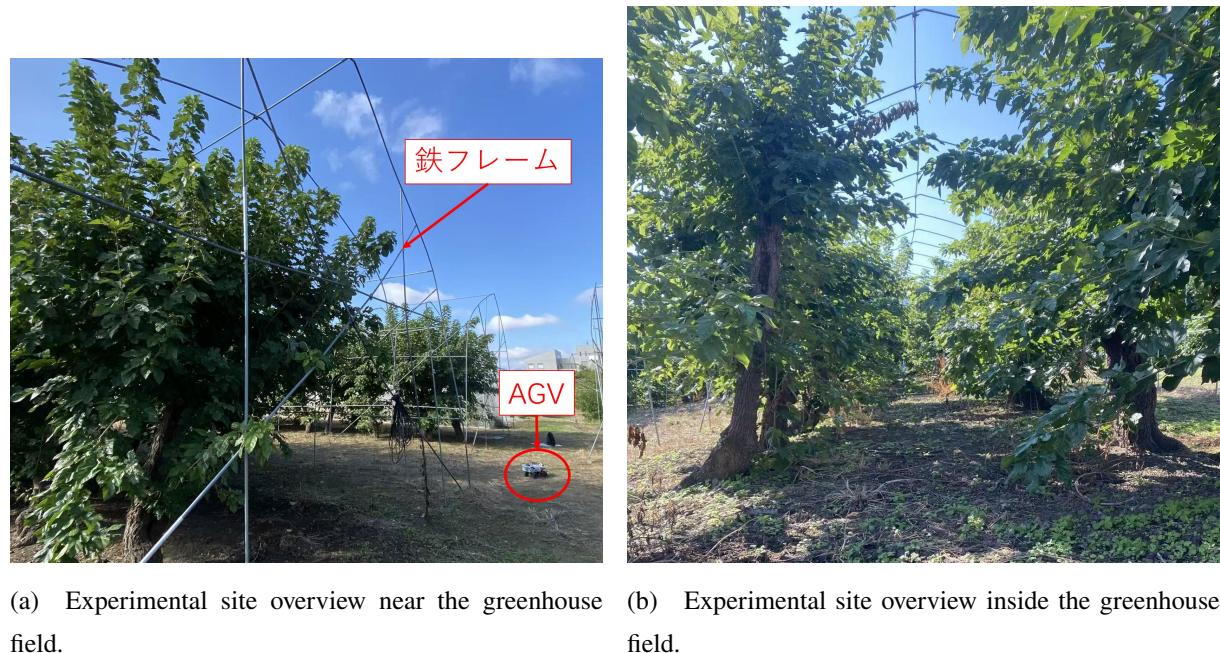


Fig. 3.3 Experimental environment

記録した GNSS 観測値を Foxglove 上で可視化したところ、本来は連続しているはずの走行軌跡において、短時間の位置飛びが確認された。Fig. 3.4 および Fig. 3.6 に、異常挙動が観測された 2 日分（2025-10-23, 2025-10-20）の例を示す。10/23 の走行データでは走行途中で不自然な横方向の逸脱が確認されたため、これを評価対象として用いる。一方、10/20 の走行データでも同様の挙動が見られたが、走行開始直後に発生しており、その後の走行区間が短いため、最適化の比

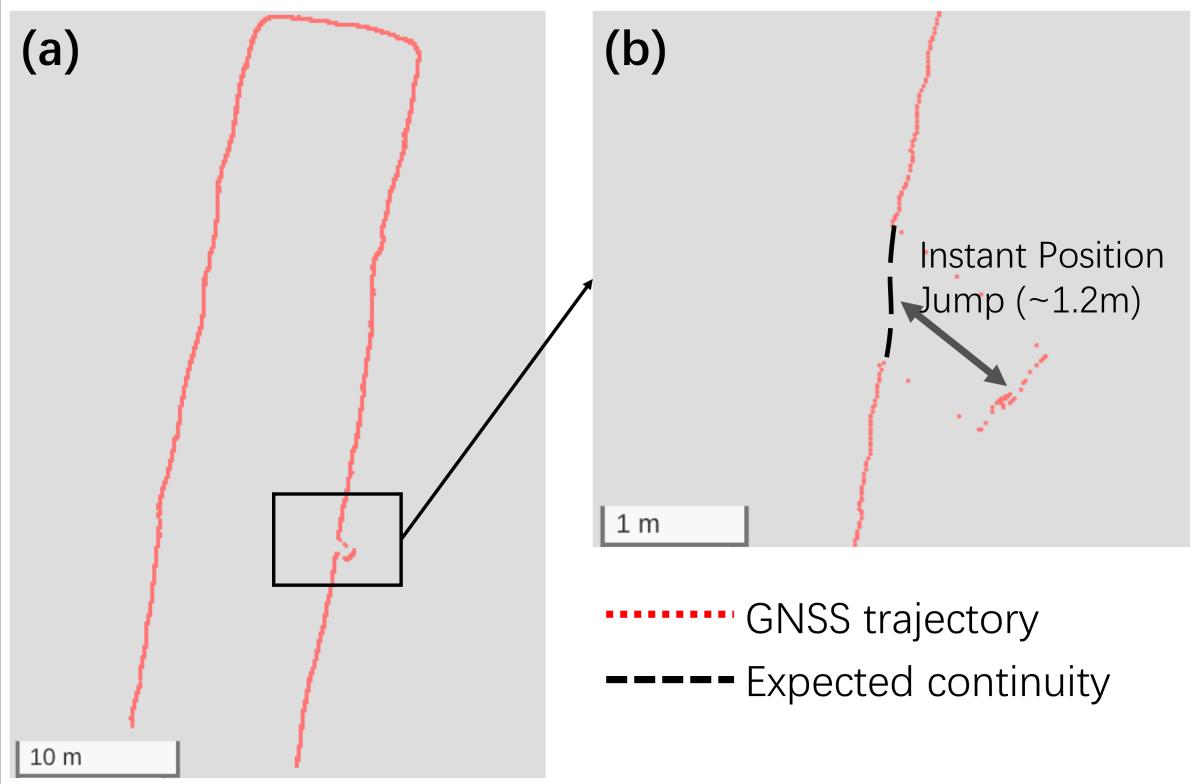


Fig. 3.4 GNSS trajectory discontinuity observed on Oct. 23, 2025. (a) Global trajectory with the anomalous segment highlighted. (b) Close-up view showing an instantaneous position jump of approximately 1.2 m, where the raw GNSS trajectory deviates from the expected continuity.

較評価には適さないと判断した。本研究では、こうした不連続な挙動を NLOS 環境下で発生する外れ値と見なし、解析対象に設定した。

さらに、Fig. 3.5 に、10/23 の走行データにおける走行開始後 130 秒間の GNSS 変位 $|\Delta p_{\text{gnss}}|$ と、受信機が報告する共分散のトレース $\text{trace}(\Sigma_{\text{gnss}})$ の時系列を示す。この区間は、軌跡の不連続が観測された周辺を含む区間である。図より、 $|\Delta p_{\text{gnss}}|$ が増大している場合でも、 $\text{trace}(\Sigma_{\text{gnss}})$ が必ずしもそれに追従して増大するとは限らないことが分かる。すなわち、受信機が出力する共分散のみでは、見かけ上の信頼度が高くても実際には大きな偏りを伴う観測を十分に識別できない場合があることが示唆される。本手法の目的は、このような外れ値を検知し、バックエンドへの誤った拘束の注入を未然に防ぐことにある。

3.5.1 比較手法と設定

本評価では以下の 3 つの手法を比較する。いずれの手法においても、入力となる LiDAR および IMU のデータは共通とし、RTAB-Map のパラメータ設定も統一した。まず、GNSS 情報を利

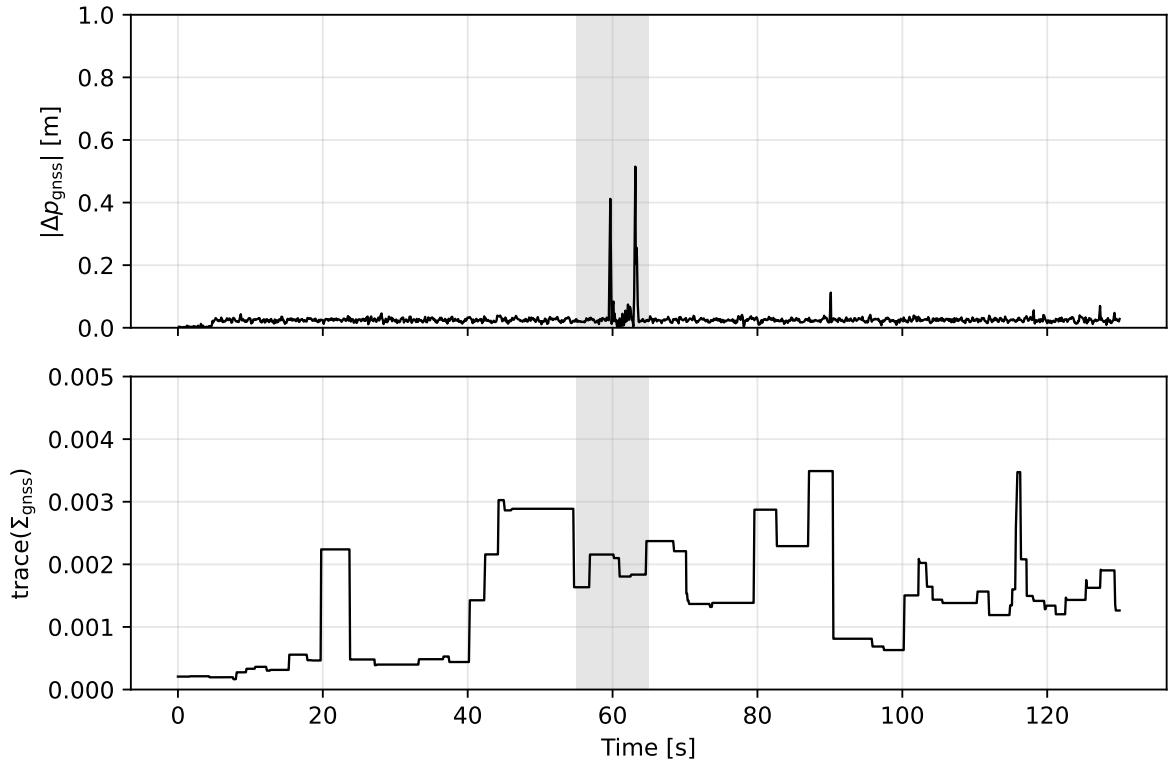


Fig. 3.5 Time histories of the GNSS incremental displacement $|\Delta p_{\text{gnss}}|$ and the covariance trace $\text{trace}(\Sigma_{\text{gnss}})$ for the 2025-10-23 dataset. Only the first 130 s are shown to focus on the interval around the detected trajectory discontinuity in Fig. 3.4.

用せず、FAST-LIO2 によるオドメトリのみを用いてマッピングを行う LIO 単独である。次に、GNSS の品質を考慮せず、得られた観測値をそのまま RTAB-Map の位置制約として導入する単純統合である。そして最後が、提案する GNSS 品質監視モジュールによって観測の採否を判定し、信頼できるデータのみを RTAB-Map へ入力する提案手法である。

3.5.2 評価指標

本評価は実環境で取得した走行データに基づいて行うため、地図整合性および推定の破綻有無を中心に定性的評価を行う。具体的には、(i) 点群地図の幾何的一貫性、(ii) 推定軌跡の連続性と不自然な折れ曲がり、(iii) NLOS 測位異常が疑われる区間における推定の破綻・回復挙動、を比較する。また、提案法については遮断判定のタイミングが異常区間と整合することを、NIS と判定の時系列により確認する。

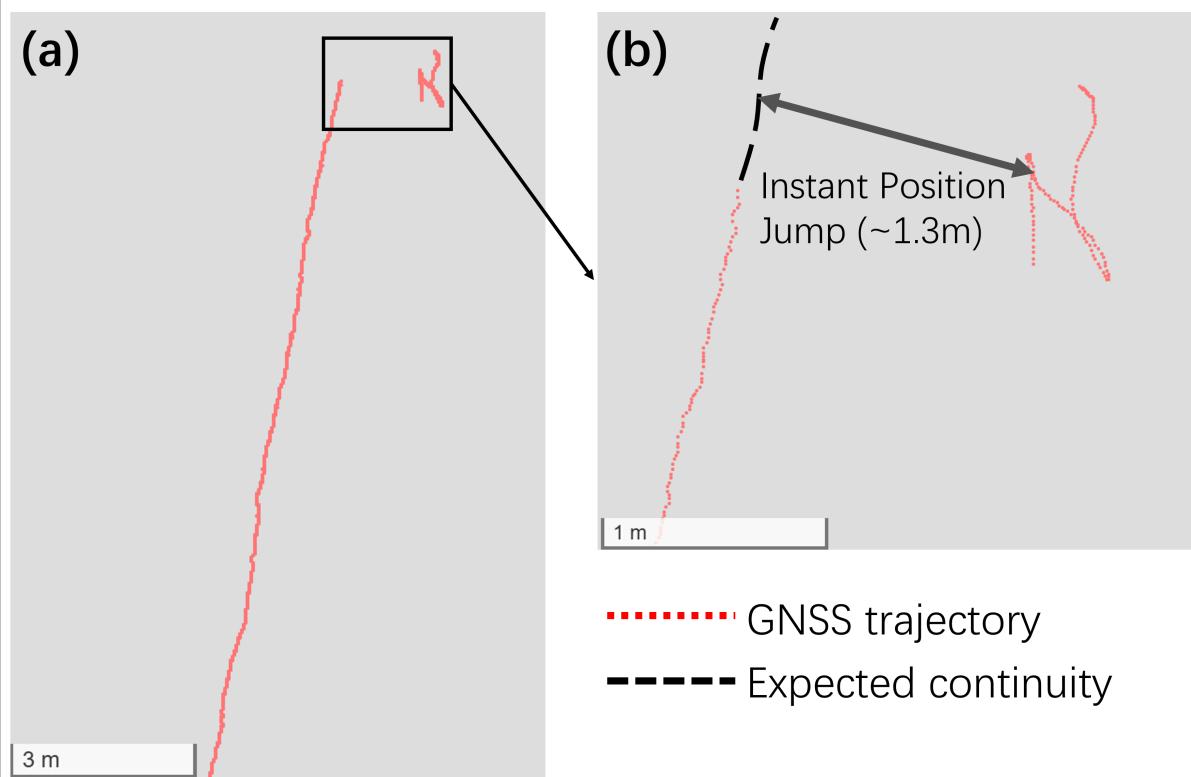
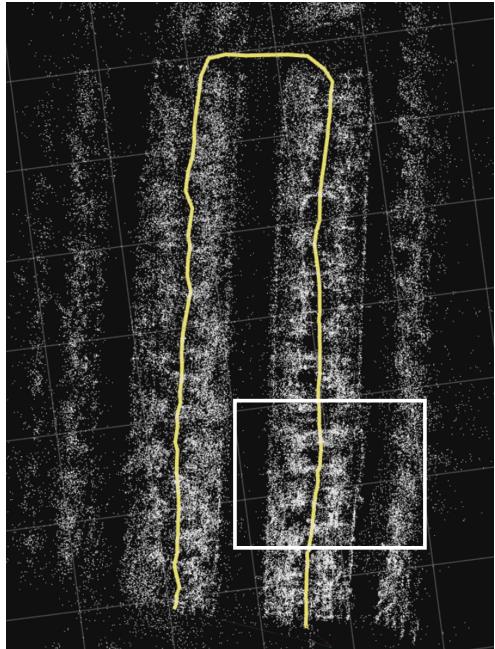


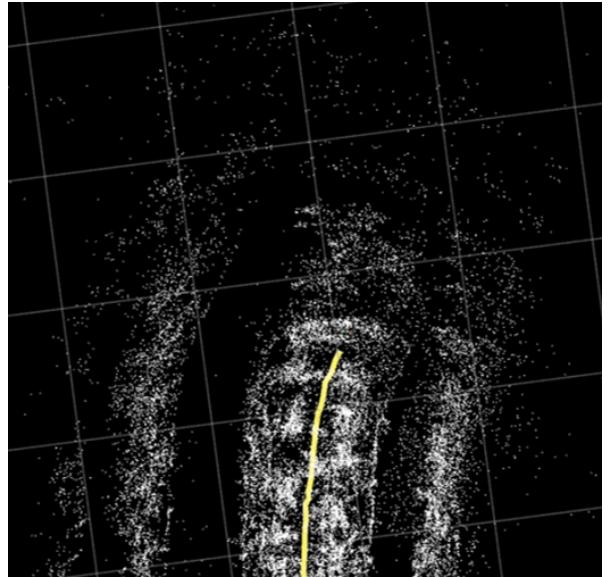
Fig. 3.6 GNSS trajectory discontinuity observed on Oct. 20, 2025. (a) Global trajectory overview. (b) Zoomed view showing a similar instantaneous position jump of approximately 1.3 m, indicating the reproducibility of the phenomenon.

3.5.3 評価結果と考察

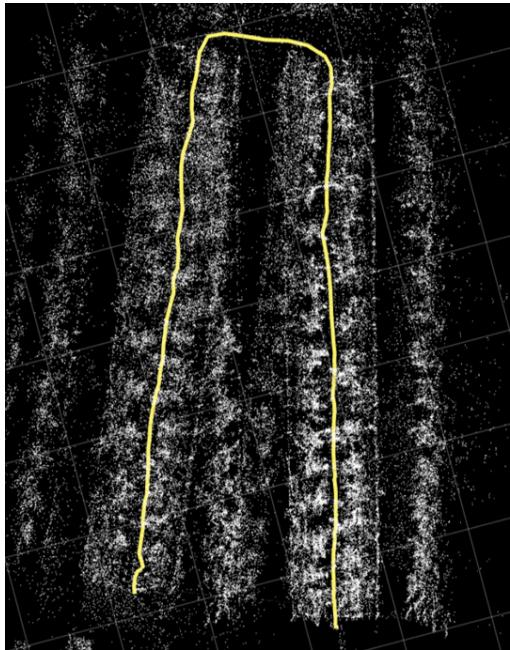
2025年10月23日の走行データを用いた各手法の点群地図と推定軌跡の比較を Fig. 3.7 に示す（白：点群地図、黄：推定軌跡）。単純統合では、地図全体を俯瞰すると後続の最適化によって整合しているように見える場合があるが、異常発生の直後 (Fig. 3.7(b))において、局所的な地図のズレや歪みが観測された。これは、誤った GNSS 制約が因子グラフに導入された影響であると考えられる。これに対し、LIO 単独では GNSS を用いないため外れ値の影響は受けないものの、長期的なドリフトを抑制するための絶対的な制約が得られないという課題がある (Fig. 3.7(c))。一方、提案手法では、異常が疑われる区間の GNSS 観測を適切に遮断することで、局所的な歪みが抑制されることを確認した (Fig. 3.7(d))。



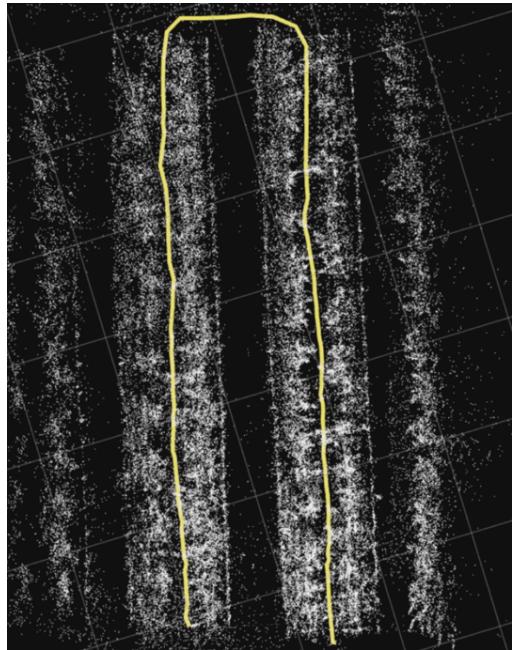
(a) Naive GNSS – LIO fusion (global view).



(b) Naive GNSS – LIO fusion (zoom-in view).



(c) LIO-only mapping (without GNSS constraint).



(d) Mapping with proposed method.

Fig. 3.7 Mapping results for the 2025-10-23 dataset(white: point cloud map, yellow: estimated trajectory). (a) Naive GNSS – LIO fusion (global view), where the boxed region indicates the area around the observed anomaly. (b) Zoom-in view of the boxed region in (a). (c) LIO-only mapping without GNSS constraints. (d) Mapping result with the proposed method enabled.

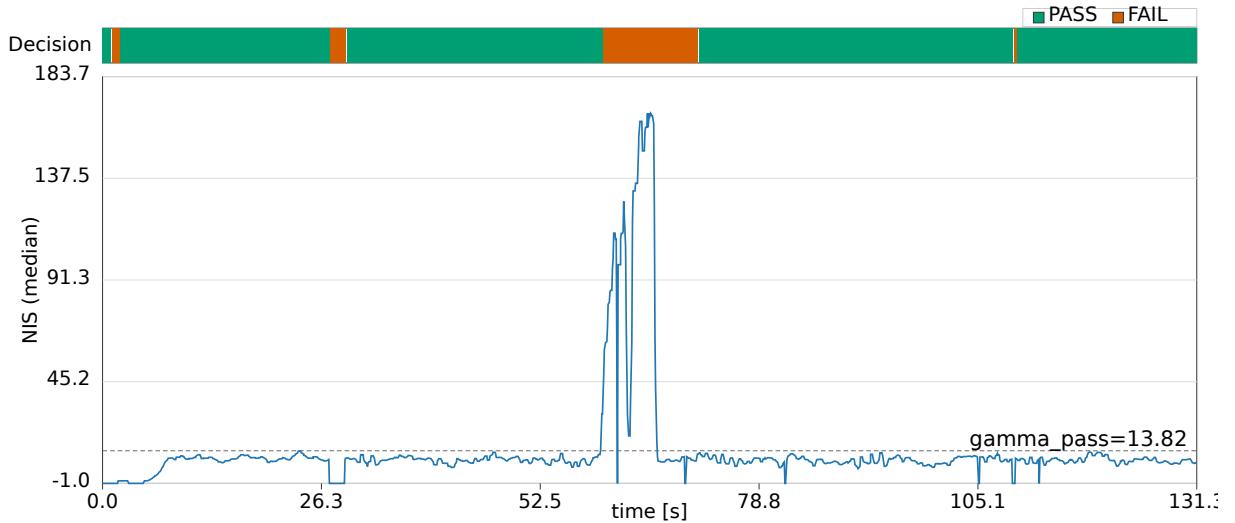


Fig. 3.8 Time history of the median NIS and the acceptance decision for the 2025-10-23 dataset. The dashed line indicates the threshold γ_{pass} , and the top bar shows the PASS/FAIL decision.

また、NLOS の影響をより明確に示すため、単純統合における異常発生直後の局所的な挙動を Fig. 3.7(b) に示す。本走行データでは、異常の発生直後に地図の歪みが生じたが、その後の整合的な観測やループ閉じ込みによって、全体的な誤差が解消される挙動も確認された。しかし、このような回復が常に保証されるものではなく、異常の規模や発生タイミングによっては、地図の整合性が著しく損なわれ、回復不能となる恐れがある。したがって、異常の疑われる観測値を事前に選別し、最適化から排除することが重要である。

提案手法による異常検知のプロセスを確認するため、2025 年 10 月 23 日のデータにおける NIS と判定結果の時系列を Fig. 3.8 に示す。図中の破線は閾値 γ_{pass} を、上部のバーはデータの採用／遮断を表す。異常が発生した区間では NIS が急増しており、GNSS 観測が適切に排除されていることが分かる。また、NIS が閾値以下であっても、可用性判定や復帰時の遮断される場合がある。これは、誤った拘束が因子グラフへ混入することを確實に防ぐための判定によるものである。

本評価により、実環境で発生する GNSS の測位異常に対し、品質監視によって地図の整合性を維持できることを確認した。一方で、本実験環境では異常の発生頻度が限定的であったため、統計的な信頼性を高めるには追加の長時間のデータ収集が必要である。今後は、複数のデータセットを用いて、提案手法の再現性を検証することが課題である。

第4章 高速分光センシングシステム の構築

本章では、AGVによる植生生育状態観察を目的として構築した高速分光センシングシステムについて述べる。実験環境（信州大学繊維学部の圃場）では、ロボットが走行しながら連続的に計測を行うため、分光データの取得には安定性が求められる。

本研究で使用する浜松ホトニクス製の超小型分光センサ C12880MA は、外部クロックに同期して信号を出力する仕様である。しかし、一般的な割り込み処理に基づくデータ取得方法では、動作が高速になると処理が追いつかず、データの欠落やタイミングのズレが生じやすい。そこで本研究では、まず再現実験によって割り込み処理の限界を示した上で、DMA（Direct Memory Access, 以下、DMA）を用いたデータ取得システムを設計・実装した。

具体的には、タイマを用いてセンサへのクロック（CLK 信号）を連続的に生成し、トリガ信号（TRG 信号）に同期して ADC 変換を開始させる。変換されたデータは、DMA によって CPU を介さずにメモリへ直接転送される。さらに、信号（ST）の立ち下がりから計測開始までの遅延時間を実測し、有効な画素範囲の補正に反映させることで、5 MHz での安定した連続取得を実現した。この手法は、マイクロコントローラ（STM32F446RE および STM32H723ZG）上に実装されている。

本研究で使用した分光センサの外観を Fig. 4.1 に、システム設計において主な仕様を Table 4.1 に示す。



Fig. 4.1 Miniature spectrometer C12880MA used in the proposed spectral sensing system

Table 4.1 Key specifications of the C12880MA spectrometer relevant to this study

Item	Specification
Spectral range	340–850 nm
Number of pixels	288
Pixel size	$14 \times 200 \mu\text{m}$
Slit size	$50 \times 500 \mu\text{m}$
Maximum clock frequency	5 MHz
Output signal	Analog video
Supply voltage	5 V
Dimensions	$20.1 \times 12.5 \times 10.1 \text{ mm}$
Weight	5 g

4.1 センサユニットの概要

本研究で用いるセンサユニットは、植生状態観察のための分光計測を中心核に、生育環境のデータ（温度・湿度・気圧、CO₂濃度）も同時に取得できるセンサユニットを構成した。センサユニット全体の構成を Fig. 4.2 に示す。環境量センサの実装および計測ロジックは先行研究で確立されているため、本章では C12880MA の高速駆動を実現するための要素技術に焦点を当てる。各センサの仕様および MCU とのインターフェース回路については、付録 (Fig. B.1, Fig. B.2, Fig. B.3(a), Fig. B.3(b),) に示す。

センサユニットを構成する部品とその主な仕様を Table 4.2 に、開発したユニットの外観を Fig. 4.3 に示す。C12880MA は外部クロックに同期して信号を出力するため、MCU 側でタイミング制御を行う必要がある。一方、温度・湿度・気圧センサ BME280 および CO₂ センサ S300L-3V は先行研究で確立された I²C インタフェースを用いて接続されている。これらのセンサの詳細については、それぞれ A および A' に示す。

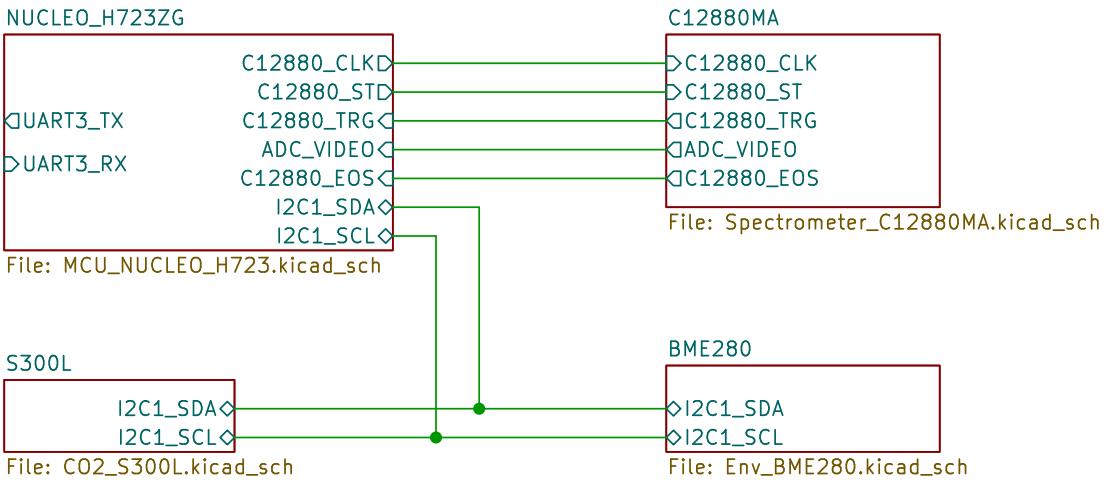


Fig. 4.2 Overall multisensor system architecture

4.2 従来方式の課題

C12880MA センサは、入力信号（ST 信号）の立ち下がり後に TRG 信号を出力し、これに同期してビデオ信号（VIDEO 信号）を更新する仕様である (Fig. 4.5). 従来の手法では、この TRG 信号の立ち上がりを検知して割込みを発生させ、その処理ルーチン (ISR) 内で ADC を起動してデータを読み出していた [3]. しかし、5MHz という高速なクロックで動作させる場合、TRG 信号の周期は 200 ns 程度と極めて短くなる. この時間スケールでは、割込み処理に入るまでの遅延や処理時間のわずかなばらつきが無視できず、データの取りこぼしやタイミングのズレが頻発する. したがって、センサ本来の性能を引き出すには、ソフトウェアによる割込み処理に依存しない、ハードウェアレベルでの同期機構が不可欠である.

本研究では、従来手法と提案手法におけるデータ処理の流れを比較し、性能の制約を明確にする (Fig. 4.4). 従来方式では、TRG 信号ごとに CPU が介入する必要があるため、高速動作時には CPU の処理能力が追いつかなくなる. これに対し提案方式では、タイマと DMA を連携させることで、CPU を介さずに ADC 変換とデータ転送を自動的に行う仕組みを採用した.

以上の比較から、高周波領域における主要な性能制約が周期ごとの CPU 介在に起因することが分かる. 次節では、STM32F446RE を用いて従来方式の限界を再現的に確認し (Table 4.3)，その後、提案方式により制約を回避できることを示す.

Fig. 4.6 に、本研究で用いる画素番号の定義と、センサ側インデックスと DMA バッファ上の

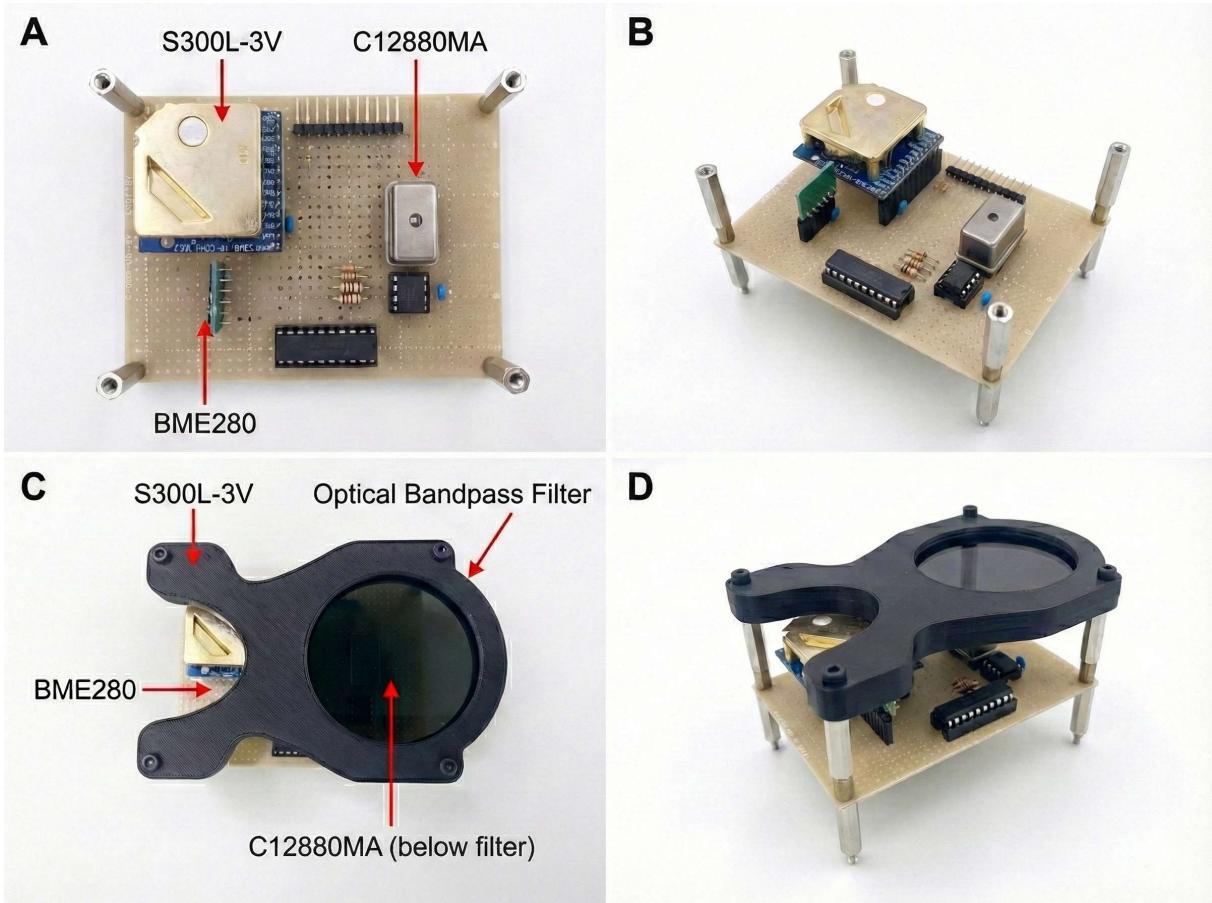


Fig. 4.3 Photographs of the developed sensor unit. (A) Top view of the sensor board integrating the C12880MA, BME280, and S300L-3V. (B) Oblique view showing the component layout. (C) Top view with the optical bandpass filter holder mounted. (D) The fully assembled unit ready for installation.

サンプル番号の対応関係を示す。本研究では ST 信号の立下りを $t = 0$ とし、その直後の第 1 画素を #1 と定義する。データシート上の仕様では、#1–#88 は無効画素であり、#89–#376 が有効画素である。

一方、実装では、ST 信号を立ち下げた後にソフトウェアで ADC および DMA を起動するため、処理遅延が発生する。実測の結果、この起動遅延によりセンサ側の #1–#4 に相当するデータが取得できていないことが判明した。その結果、本来 #89 から始まる有効データは、DMA バッファ上では #85 の位置に出現する。本研究では、この #85–#372 (計 288 サンプル) を有効な分光データとして採用する。なお、EOS (End of Scan) 信号は読み出し終了の確認にのみ使用し、DMA 転送自体は固定長 ($N = 387$ 、無効画素を含む 1 フレーム分) で終了させる設計とした。

また、従来方式の限界を確認するため、内部 ADC が比較的高速な STM32F446RE を用いて検証実験を行った (Table 4.3)。割込み処理のみを用いた場合、25.4 kHz 付近でデータの欠落が発生した。DMA を併用して CPU 負荷を低減した場合でも、130 kHz 程度が限界であった。この比較

Table 4.2 Sensor unit components and key specifications (overview)

Component	Manufacturer	Interface	Note
Mini-spectrometer C12880MA	Hamamatsu Photonics	Analog (VIDEO), High-speed CLK/ST/TRG	synchro-nized acquisition
BME280 (AE-BME280)	Bosch Sensortec / Akizuki Denshi	I ² C	Temperature / humidity / pressure
S300L-3V CO ₂ sensor	ELT SENSOR	I ² C	CO ₂ concentration
MCU	STMicroelectronics	—	STM32F446RE (F4) / STM32H723ZG (H7)

Table 4.3 Limits of acquisition frequency with conventional methods

Method	MCU	Achieved frequency
Interrupt only	STM32F446RE	25.4 kHz
Interrupt + DMA	STM32F446RE	130 kHz

実験により、CPUによるソフトウェア処理が、高速化を妨げる主な原因であることを確認した。

4.3 分光データのハードウェア同期取得アーキテクチャ

本研究では、5 MHz 級の高速読み出しにおいてサンプリング位相の決定性を確保するため、ソフトウェア割込みを介在させないハードウェア同期取得を構築した。C12880MA は、CLK 信号を連続的に入力し、ST 信号によって積分区間を制御する仕様である。提案手法では、TRG 信号に同期したハードウェアトリガで ADC 変換を直接駆動し、DMA を用いて画素データをス逐次転送する。

4.3.1 取得タイミング設計

1 フレームの取得は次の手順で構成される。 (i) ST を High に設定して積分を開始し、所定の積分時間 T_{int} だけ待機する。 (ii) ST を Low へ遷移させて積分を終了し、直後に ADC を DMA モー

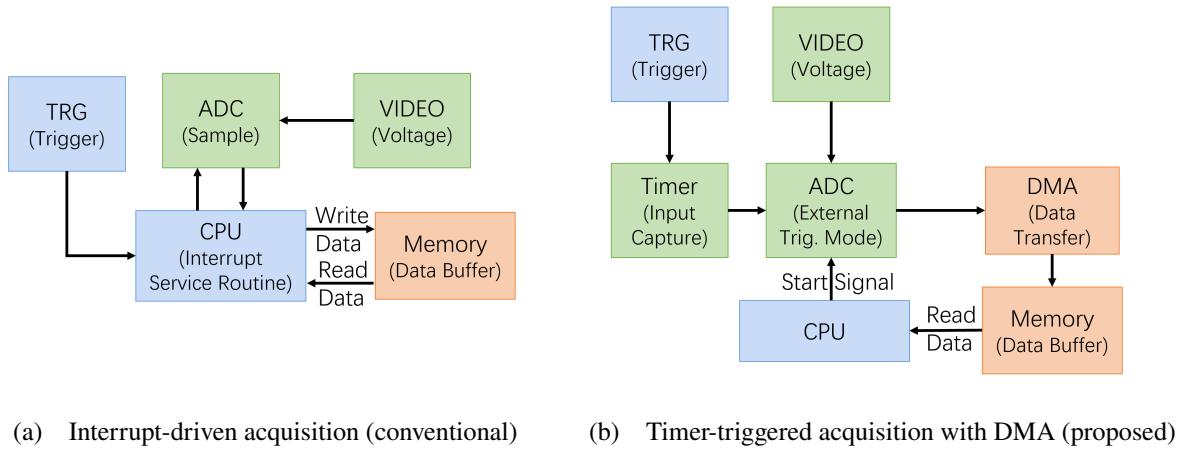


Fig. 4.4 Comparison of acquisition data paths. In the conventional method, the CPU handles every TRG event in an ISR, which becomes the bottleneck at MHz rates. In the proposed method, the TRG edge is captured by a timer and directly drives ADC conversion via an external trigger, while DMA streams samples to memory; CPU involvement is limited to frame start/end control.

ドで開始する。 (iii) 以降は TRG 信号の立上りに同期して ADC 変換が自動的に実行され、 DMA によりバッファへ連続転送される。 (iv) DMA 転送完了 MCU の callback によりフレーム完了を検知し、次フレーム準備として ST を High へ戻す。この構成により、各サンプルの取得タイミングは TRG 信号によって規定され、CPU の介入はフレームの開始と終了のみに限定される。

4.3.2 サンプリング実装

Fig. 4.5 に示した通り、C12880MA は入力される CLK 信号に同期して TRG 信号を出力する。本実装では、汎用タイマ (TIM2) の PWM 出力機能を用いてセンサへの CLK 信号を生成する。さらに、別のタイマ (TIM15) を用いて TRG 信号のエッジを検出し、そのイベントを ADC の外部トリガとして接続した。これにより、TRG 信号の周期に同期した正確なサンプリングが、CPU の処理状況に依存せず実行される。

4.3.3 有効画素範囲の補正

前述の通り、本実装では ST 信号の立ち下がり後にソフトウェアで ADC と DMA を開始するため、わずかな起動遅延が生じる。この遅延は、取得される画素列の開始位置における固定のオフセットとして現れる。実測の結果、このオフセットは TRG 周期換算で約 4 画素分 (#1~#4) であることが確認された。したがって、DMA バッファ上では本来 89 番目にあるはずの有効画素の先頭が、85 番目付近に出現する。本研究ではこの挙動を固定遅延として扱い、バッファの先

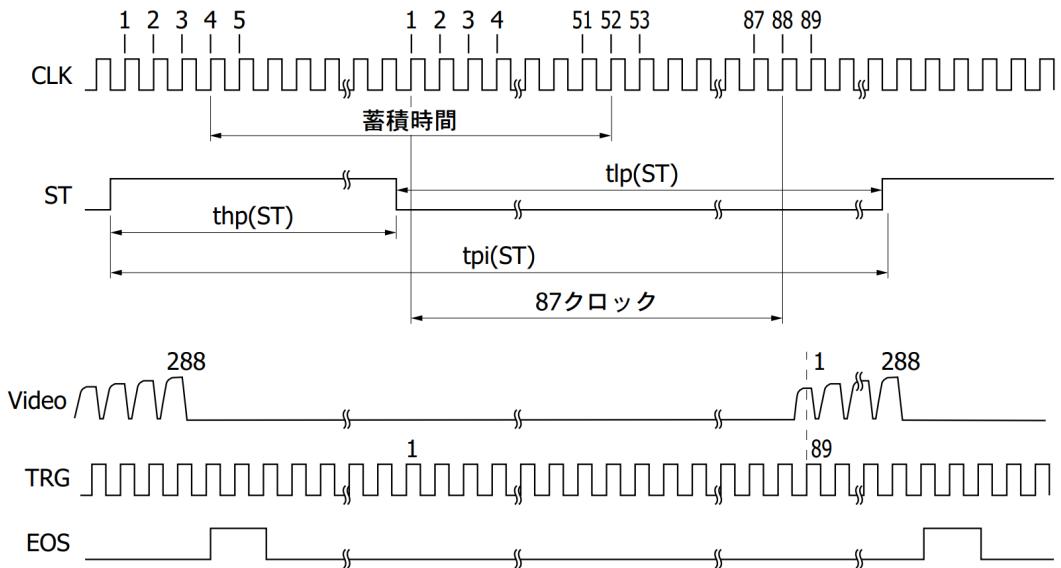


Fig. 4.5 Timing diagram of the C12880MA: excerpted from the datasheet[20]

頭 85 画素分を無効データとして除外することで、有効なスペクトルデータを安定して抽出した。

4.4 評価

本節では、提案アーキテクチャが安定したデータ取得を実現していることを検証する。具体的には、まずオシロスコープを用いた信号タイミングの実測を行い、ハードウェアレベルでの同期動作を確認する。次に、連続取得時におけるデータの完全性、すなわちデータの欠落やズレがないかを検証する。最後に、既知の光源を用いたスペクトルの再現性を評価する。なお、本実験で使用した STM32 NUCLEO-H723ZG 開発ボードとセンサユニットの接続構成を Fig. A.1 に示す。

4.4.1 高速動作の検証

本研究では最大 5 MHz のサンプリング速度を実現するため、STM32H723ZG に提案アーキテクチャを実装した。STM32H7 シリーズではデータキャッシュが有効に機能するため、DMA がメモリに書き込んだ最新データを CPU が即座に読み出せないキャッシュ・コヒーレンシの問題が発生する場合がある。そこで本実装では、DMA の転送先バッファをキャッシュの影響を受けない DTCM (Data Tightly Coupled Memory) 領域に配置することで、データの整合性を確保した。加えて、ADC のハードウェアキャリブレーションとトリガ設定を最適化することで、目標とする 5 MHz での連続取得に成功した。

Fig. 4.7 に、5 MHz 動作時におけるオシロスコープの計測画面を示す。ここでは CH1 を TRG

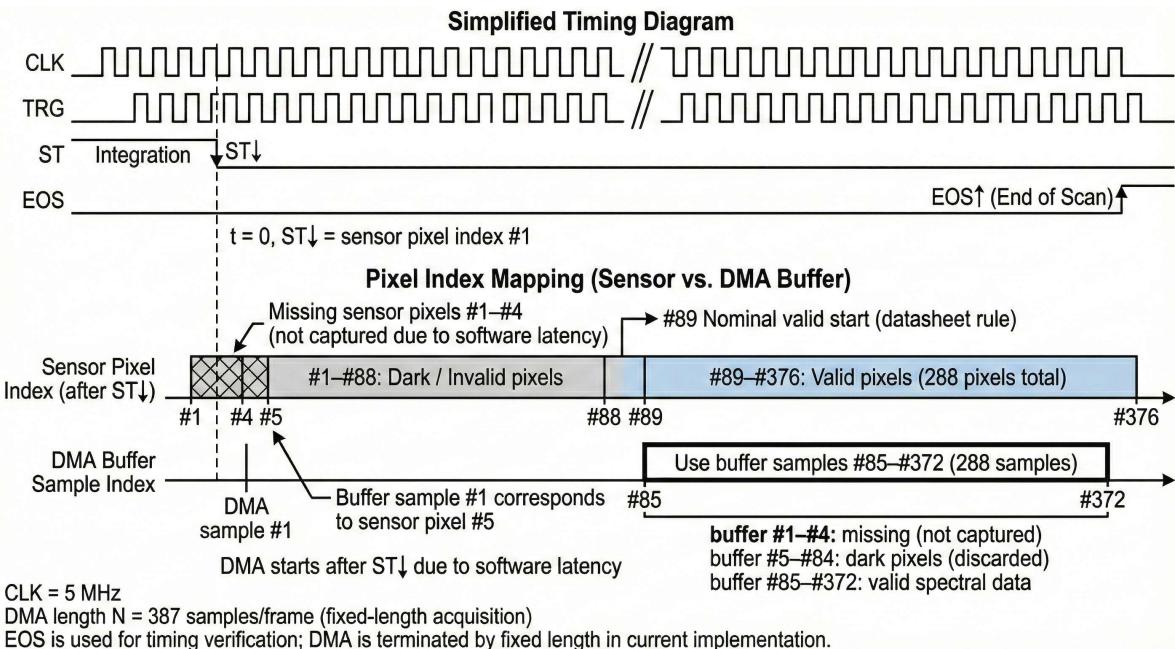


Fig. 4.6 C12880MA readout rule and pixel index mapping between sensor-side definition and DMA buffer in this work. The sensor pixel index is defined from the falling edge of ST ($t = 0$), where pixels #1–#88 are invalid and pixels #89–#376 are valid (288 pixels). Due to software start latency, sensor pixels #1–#4 are not captured. therefore, the nominal valid start at sensor pixel #89 appears at DMA buffer sample #85.

信号, CH2 を CLK 信号, CH3 を EOS 信号, CH4 を VIDEO 信号としている。波形を確認すると, TRG の立ち上がりに同期して VIDEO 信号が遷移している様子や, EOS 信号の発生付近でデータ出力が停止する正常な挙動が確認できる。

4.4.2 取得データの妥当性確認

オシロスコープから保存した CSV データを用い, EOS 信号, ST 信号と VIDEO 信号の関係をグラフとしてプロットした。

まず, Fig. 4.8 に EOS 信号と VIDEO 信号の波形を示す。強い光を当てた場合 (Fig. 4.8(a)) と遮光した場合 (Fig. 4.8(b)) のいずれにおいても, EOS 信号の立ち上がりに同期して VIDEO 出力が停止している。これにより, ゲートロジックによる読み出し停止機能が正しく動作していることを確認した。

次に, 様々な照明環境および光源距離における ST 信号と VIDEO 信号の応答特性を Fig. 4.9 に示す。Fig. 4.9(a) の遮光条件ではノイズのみが観測されているのに対し, 同 (b) の自然光下では光源のスペクトルピークが捉えられている。また, 光源との距離を変えた同 (c) および同 (d) を

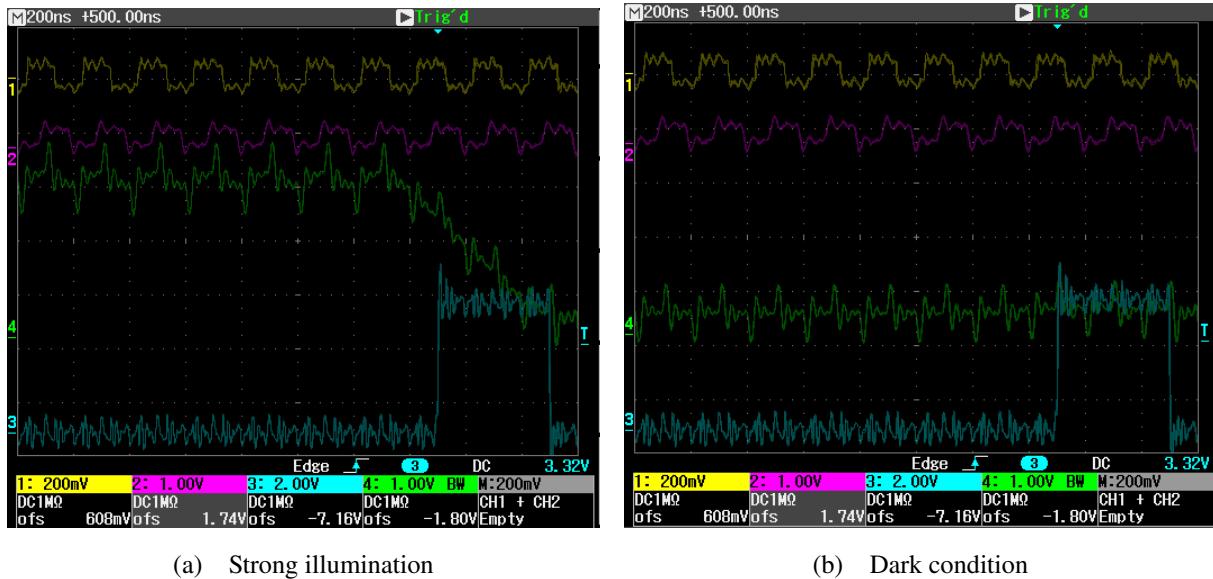


Fig. 4.7 Oscilloscope screenshots of the End-of-Scan (EOS) timing at 5 MHz. (a) Strong illumination.
(b) Dark condition. Yellow: TRG, magenta: CLK.

Table 4.4 Acquisition frequency of the proposed architecture

Method	MCU	Achieved frequency
Proposed architecture	STM32F446RE	1.5 MHz (theory)
Proposed architecture	STM32H723ZG	5.0 MHz (achieved)

比較すると、光量に応じて VIDEO 信号の振幅が適切に変化している。この結果から、光量に対する応答性を維持していることが確認された。

4.5 その他センサのデータ取得と統合

分光データと同時に、生育環境の基礎量として温度・湿度・気圧および CO₂ 濃度を取得するため、BME280 および S300L-3V をシステムに統合した。これら環境センサの取得処理そのものは先行研究で確立された実装に基づくが、本研究ではセンサユニットの MCU を STM32 へ変更したことに伴い、デバイスドライバおよび制御を再設計し、既存処理を STM32 環境へポーティングした。具体的には、S300L-3V や BME280 は I²C 通信により所定周期で計測する。各計測値には MCU 内の単調増加タイムスタンプを付与し、分光フレームと同一の時刻系でログ化することで、走行中の計測データとして統合可能とした。

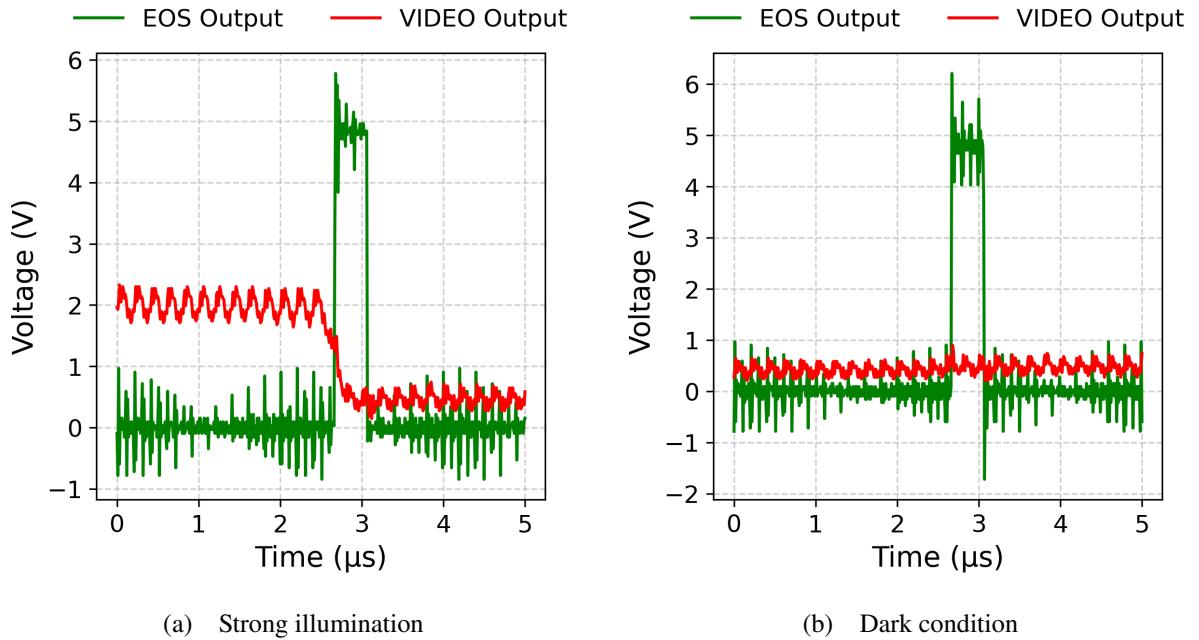


Fig. 4.8 Replotted EOS (green) and VIDEO (red) waveforms from CSV data at 5 MHz. (a) Strong illumination. (b) Dark condition.

4.6 まとめ

本章では、C12880MA を用いた高速分光センシングの実現に向け、ハードウェア同期に基づくデータ取得システムを構築した。まず、従来の割込み駆動方式では高速化に限界があることを実験により示した。その上で、タイマと DMA を連携させ、CPU を介さずに連続的に画素データを取得するアーキテクチャを提案した。また、読み出し開始時の遅延によって生じる画素ズレを定量化し、有効画素範囲を補正することで、正確なスペクトル計測を可能にした。最後 STM32H723ZG に実装し、5 MHz での安定した連続取得を実証した。

次章では、本センサユニットを用いて取得したデータに基づき、環境マッピングおよびその評価を行った結果について述べる。

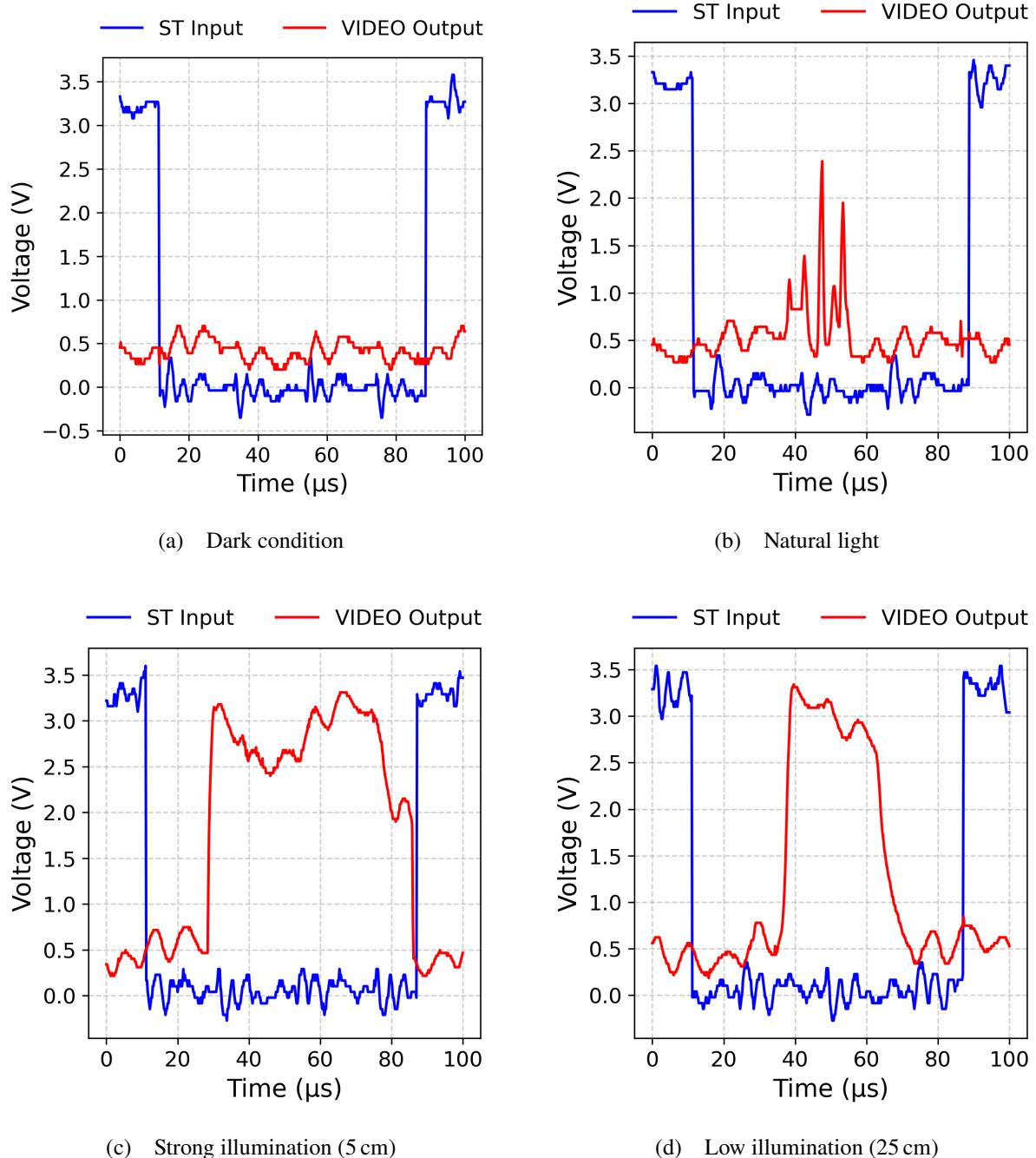


Fig. 4.9 ST and VIDEO signal waveforms under different illumination conditions. (a) Dark condition.
 (b) Natural light. (c) Strong illumination at 5 cm. (d) Low illumination at 25 cm.

第5章 生育環境マッピング

本章では、開発したセンサユニットと位置推定システムを統合し、実際の圃場環境における生育情報のマッピングを行う。

5.1 マッピング手法と実験条件

本研究の最終目標は完全自律走行によるモニタリングであるが、本実験の段階では自律走行アルゴリズムの検証を並行して行っているため、AGVを手動操作して走行させ、データを取得した。具体的には、GNSS/LiDARに基づく自己位置推定の結果を基準時刻系とし、非同期に取得される環境センサの観測値を補間・同期することで、同一の走行データとして統合し、生育情報マップを生成する。これにより、将来的な自律走行システムにおいて要求される環境マッピング機能の実現可能性を示す。

5.2 データの同期と生育環境

具体的なデータ処理手順は以下の通りである。

1. データの同期: センサユニットから得られた環境データに対し、時刻情報をもとに最も近い自己位置を割り当てる。
2. 正規化: 本章のマップでは、場所によるわずかな変化を見やすくするため、取得データの範囲に合わせて色の表示レンジを調整する。なお、これはあくまで視認性を良くするための処理であり、数値の比較は各センサの出力値そのものに基づく。
3. 配置と可視化: 2次元平面上の走行軌跡としてプロットし、各地点におけるセンサ値を色情報として重ねて表示する。

5.2.1 分光スペクトルの特徴抽出と空間マッピング

分光センサは各観測時刻 t_i において 288 点のスペクトル $\mathbf{I}_i \in \mathbb{R}^{288}$ を出力する。スペクトルは情報量が多いため、本研究では前処理、特徴量の抽出、位置情報との対応付け、という 3 段階の処理を経てマップ化を行った。

まず、ノイズや明るさの変動を抑えるための補正と正規化を行い、正規化スペクトル s_i を得た。次に、植生とそれ以外を見分けるための指標として、NIR 帯域（近赤外）と Red 帯域（赤）の正規化差分（ND）、スペクトル質心 λ_c 、スペクトルの傾きが最大となる波長 λ_{RE} 、および参照データ s_{ref} に対する類似度 θ （SAM 手法）の 4 つの特徴量を計算した。最後に、これらの特徴量を取得時刻に最も近い自己位置 $p(t_i)$ と結びつけることで、走行軌跡上に配置し、空間的な分布として可視化した。

5.2.2 スペクトル特徴による植生・非植生の識別可能性

288 のデータから計算した各特徴量のマップを Fig. 5.5 に示す。ND やスペクトルの傾きが最大となる波長は植物の特徴を強く反映する指標であるため、マップ上においても植生があるエリアとないエリアの違いがある程度明確に確認できた。また、SAM やスペクトル質心は、スペクトルの形状変化を表す補助的な指標として用いた。なお、Fig. 5.6 は参考として作成したピーク波長のマップである。

5.2.3 環境データと場所による変化

次に、環境センサのマッピング結果 Fig. 5.1–5.4 に示す。実験場所は通気性の高いハウスであり、場所による環境差は非常に小さい条件であったが、マップ化することによっていくつかの特徴が確認できた。

具体的には、Fig. 5.1 と Fig. 5.2 を比較すると、温度が高い場所では湿度が低く、温度が低い場所では湿度が高いという逆相関の傾向が見られた。また、Fig. 5.3 に示すように、CO₂ 濃度はおよそ 400–510 ppm の範囲で推移している。

一方で、Fig. 5.4 に示す気圧については、開放型ハウスでの短時間計測であったため、変動幅は約 1 hPa 程度に留まり、顕著な空間的勾配は見られなかった。

5.3 生成された生育環境マップ

10月23日に収集したデータに基づき生成された各種環境マップを以下に示す。実験当日の天候は晴れであり、ハウス側面は換気のため開放された状態であった。

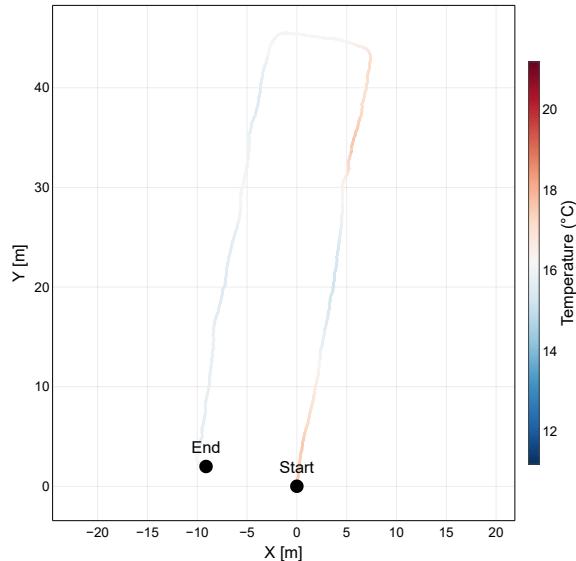


Fig. 5.1 Temperature map ($^{\circ}\text{C}$).

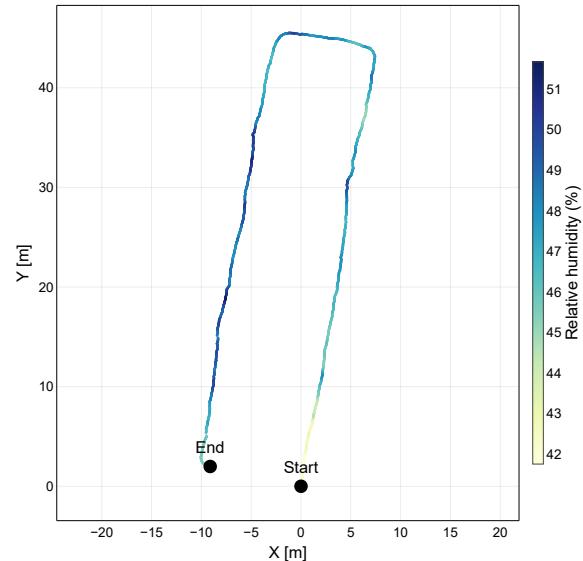


Fig. 5.2 Relative humidity map (%).

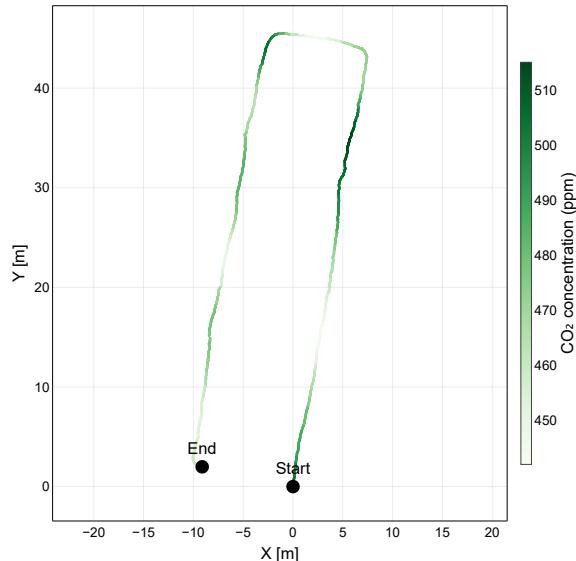


Fig. 5.3 CO₂ concentration map (ppm).

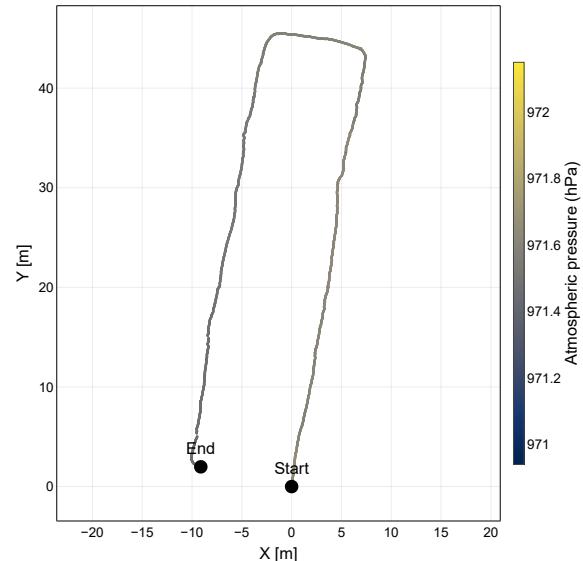
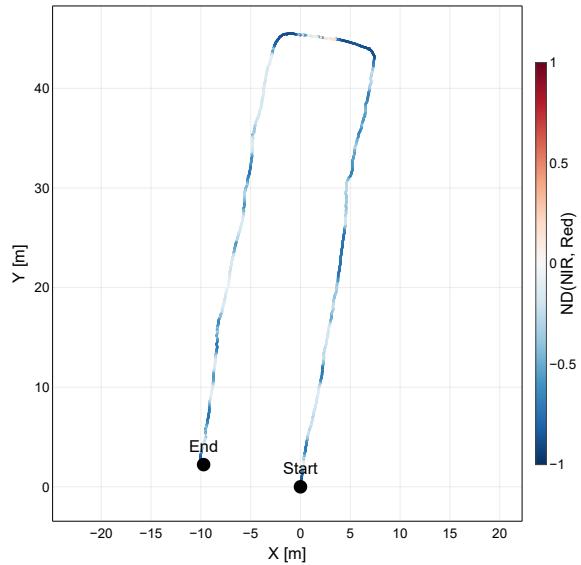
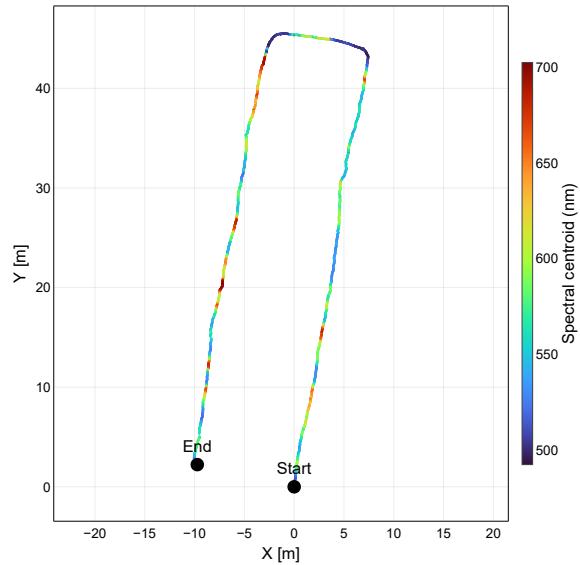


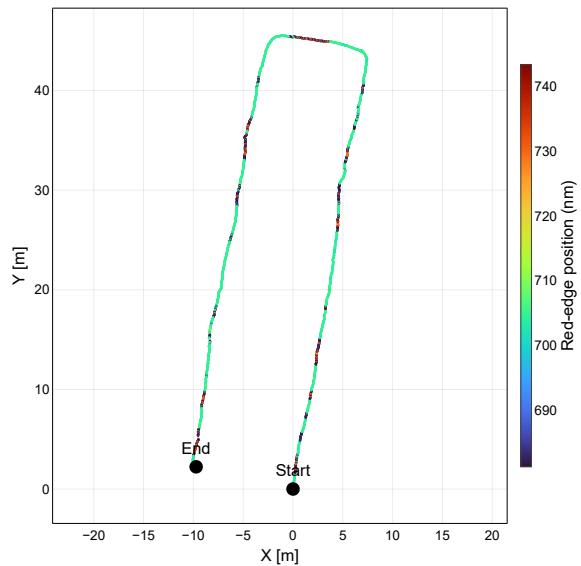
Fig. 5.4 Atmospheric pressure map (hPa).



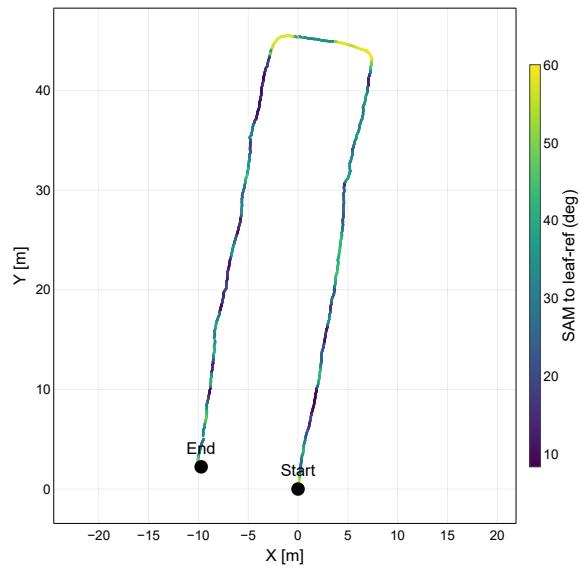
(a) ND(NIR, Red) map.



(b) Spectral centroid map.



(c) Red-edge position map.



(d) SAM similarity to vegetation reference.

Fig. 5.5 Spatial maps of spectral features along the trajectory, extracted from 288-band measurements.

(a) ND(NIR, Red) map. (b) Spectral centroid map. (c) Red-edge position map. (d) SAM similarity map.

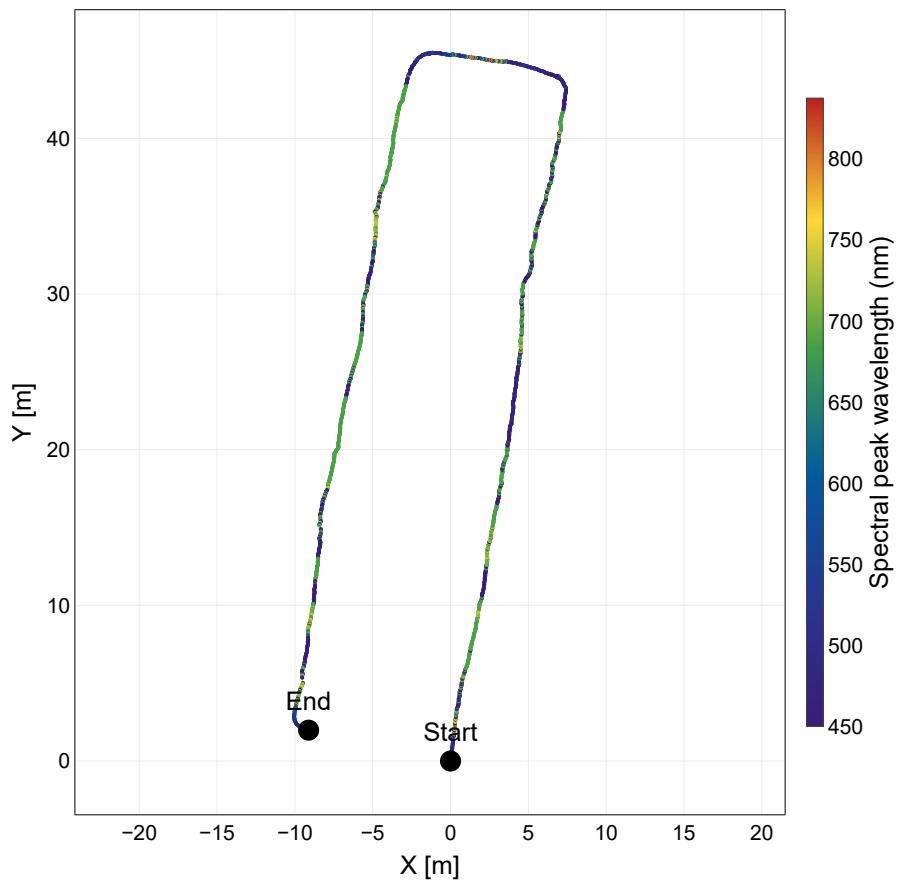


Fig. 5.6 Spectral peak wavelength map extracted from 288-band measurements. The map is shown as an exploratory visualization along the trajectory.

5.4 考察

本実験により、走行中に取得した環境センサデータを自己位置推定の結果と同期させ、圃場内の空間分布として可視化できることを確認した。特に分光データについては、288次元のスペクトルを正規化した上で、植生に関連する特徴量や類似度として抽出することで、生育環境の空間的な違いをマップ上に反映できることが示された。

第6章 結言

6.1 本研究のまとめ

本研究では、農業用ハウス内を巡回して計測を行う自動走行システムを開発し、GNSS の測位精度が不安定な環境における自己位置推定の安定化と、高速分光センシングを用いた環境情報の可視化について検討した。

まず、ハウス環境における RTK-GNSS の挙動を調査した。その結果、多くの時間帯では高精度な測位ができるものの、遮蔽物やマルチパスの影響により、受信機の状態が良好であっても大きな誤差が発生する場合があることを実測データから確認した。このような突発的な外れ値が地図作成に入力されると、地図の整合性が大きく損なわれることが課題であった。

次に、この課題への解決策として、LIO (LiDAR Inertial Odometry) を短時間の基準とした GNSS 品質監視手法を構築した。本手法は、GNSS の観測値をそのまま採用するのではなく、移動量の整合性をチェックして採否を判定する仕組みである。実環境の走行データを用いた検証により、NLOS の影響が疑われる区間において適切に GNSS データを遮断することで、地図の大きな歪みを防げることを確認した。ただし、今回の検証は限られたデータに基づくものであり、手法の汎用性や定量的な性能評価については今後の課題である。

また、より高密度な環境計測を実現するため、小型分光センサ C12880MA の高速駆動方式を開発した。従来の割込み処理による制御では高速化に限界があることを示した上で、ハードウェアトリガと DMA を用いた取得方式を実装した。これにより、STM32H723ZG において 5 MHz での安定した連続取得を実現した。さらに、データの読み出し開始時に生じる画素位置のズレを補正することで、高速取得時でも正確なスペクトルが得られるようにした。

加えて、上記の自己位置推定システムとセンシングシステムを統合し、温度・湿度・CO₂ 濃度・気圧、および分光データの特徴量を、空間上の位置と対応付けてマッピングする処理系を構築した。これにより、巡回計測によって得られた多様な環境情報を、位置情報と紐付けて可視化できることを示した。

なお、本研究では自律走行ための 3D-LiDAR を用いたナビゲーションシステムを導入し、研究室内での基本的な動作確認までは行った。しかし、実際の圃場環境における自律走行実験につい

ては、時間的な制約により十分な検証ができておらず、本論文では自動走行システムの構築と要素技術の検証に留まっている。

以上より、本研究は、GNSS が劣化しやすい農業環境における自己位置推定と環境センシングの統合システムについて、基礎的な設計・実装を行い、実データに基づく検証を行ったものである。特に、見かけ上は良好な GNSS 観測に含まれる外れ値に対し、実際には大きくズレているデータを検出し、地図作成への悪影響を防ぐ方法を提案した。

6.2 今後の課題

今後の課題として、まず、検出精度の定量的な評価である。本研究では正確な基準軌跡との比較が行えていないため、今後は測量機器などの信頼できるデータを用いて、提案手法がどれくらい正確に異常を検知できるかを数値で評価する必要がある。

また、判定ロジックの拡張である。本研究では GNSS の異常のみを判定対象としたが、LiDAR の特徴量が不足する場所や、IMU の誤差といった他の要因も考慮する必要がある。複数のセンサの異常を総合的に判断することで、実環境における信頼性をさらに向上させることが期待される。

さらに、自動走行システムと統合した検証である。実際にロボットを自動走行させながら長時間の実験を行い、環境の変化に対してシステムが安定して動作するかを確認する必要がある。これにより、実用化に向けて解決すべき課題がより明確になると考えられる。

参考文献

- [1] 農林水産省. 令和6年度食料・農業・農村白書 第3節 担い手の育成・確保と多様な農業者による農業生産活動（図表2-3-2を含む）. https://www.maff.go.jp/j/wpaper/w_maff/r6/r6_h/trend/part1/chap3/c3_3_00.html. (Accessed on 2026/01/25). 2025.
- [2] 農林水産省. スマート農業をめぐる情勢について（2025年12月）. https://www.maff.go.jp/j/kanbo/smart/smart_meguji.pdf. (Accessed on 2026/01/25). 2025.
- [3] 小林拓也. “AGVによる作物の生育状況観察システムに関する研究”. 修士学位論文. 信州大学大学院総合理工学研究科, 2021.
- [4] 許鵬飛, 小林拓也, 河村隆. AGVの自動走行のための直接接触を用いた地図修正手法の開発と評価. ロボティクス・メカトロニクス講演会2024予稿集 (*Robotics and Mechatronics Conference 2024 Proceedings*). 2024, 1P1–K04.
- [5] J. Zhang and S. Singh. LOAM: Lidar Odometry and Mapping in Real-time. *Robotics: Science and Systems* 2.9 (2014).
- [6] T. Shan et al. LIO-SAM: Tightly-coupled Lidar Inertial Odometry via Smoothing and Mapping. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. 2020, pp. 5135–5142.
- [7] W. Xu and Y. Cai. FAST-LIO2: Fast Direct LiDAR-inertial Odometry. *IEEE Transactions on Robotics* 38.4 (2022), pp. 2053–2073.
- [8] Y. Zhang et al. Real-Time Localization and Mapping Utilizing Multi-Sensor Fusion for Agricultural Robots in Greenhouse Environments. *Agronomy* 12.8 (2022), p. 1740.
- [9] M. Li et al. Multi-sensor Fusion for Agricultural Robot Localization: A Review. *Computers and Electronics in Agriculture* 170 (2020).
- [10] W. Wen et al. DeepPCO: End-to-End GNSS/LiDAR Fusion for Robust Urban Localization. arXiv preprint arXiv:2212.05477 (2022).

- [11] N. Sünderhauf and P. Protzel. Switchable constraints for robust pose graph SLAM. *2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. 2012, pp. 1879–1884. doi: 10.1109/IROS.2012.6385590.
- [12] P. Ray. A Review of Smart Greenhouse Farming by Using Sensor Network Technology. *IEEE Internet of Things Journal* 4.5 (2017).
- [13] C. Tim et al. A Small Flying IoT Node for Real-Time Spectral Monitoring in Smart Agriculture. *IEEE Internet of Things Journal* (2023).
- [14] 信州上小森林組合. RTK 基準局公開情報. <http://jforest.jp/rtkkijunkyou.html>. Accessed: 2026-01-19. 2025.
- [15] S. Macenski, T. Foote, B. Gerkey, C. Lalancette, and W. Woodall. Robot Operating System 2: Design, architecture, and uses in the wild. *Science Robotics* 7.66 (2022), eabm6074. doi: 10.1126/scirobotics.abm6074. URL: <https://www.science.org/doi/abs/10.1126/scirobotics.abm6074>.
- [16] M. Labb   and F. Michaud. RTAB-Map as an Open-Source Lidar and Visual SLAM Library for Large-Scale and Long-Term Online Operation. *Journal of Field Robotics* 36.2 (2018), pp. 416–446. doi: 10.1002/rob.21831. eprint: 1809.05952. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/rob.21831>.
- [17] S. Macenski, F. Martin, R. White, and J. Gin  s Clavero. The Marathon 2: A Navigation System. *2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. 2020.
- [18] S. Macenski, D. Tsai, and M. Feinberg. Spatio-temporal voxel layer: A view on robot perception for the dynamic world. *International Journal of Advanced Robotic Systems* 17.2 (2020). doi: 10.1177/1729881420910530. URL: <https://doi.org/10.1177/1729881420910530>.
- [19] C. F. F. Karney. *GeographicLib*. Version 2.7. 2025. URL: <https://geographiclib.sourceforge.io/C++/2.7>.
- [20] Hamamatsu-Photonics. Mini-spectrometers C12880MA / C16767MA Datasheet. https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/99_SALES_LIBRARY/ssd/c12880ma_c16767ma_kacc1226e.pdf. (Accessed on 10/9/2025).

謝辞

本研究の遂行にあたり，指導教官として終始多大なご指導を賜った河村隆教授に深謝致します。留学生として日本で研究生活を開始するにあたり，研究面のみならず生活面においても多大なるご配慮とご支援を賜りましたこと，ここに厚く御礼申し上げます。

また，河村研究室の皆様には，日々頃より多くのご助言をいただき，研究を進める上で大変お世話になりました。特に博士課程の小林拓也さんには，本研究の遂行にあたり貴重なご助言とご協力をいただき，ここに感謝の意を表します。

付録 A 使用したセンサ

STM32 NUCLEO-H723ZG 開発ボード

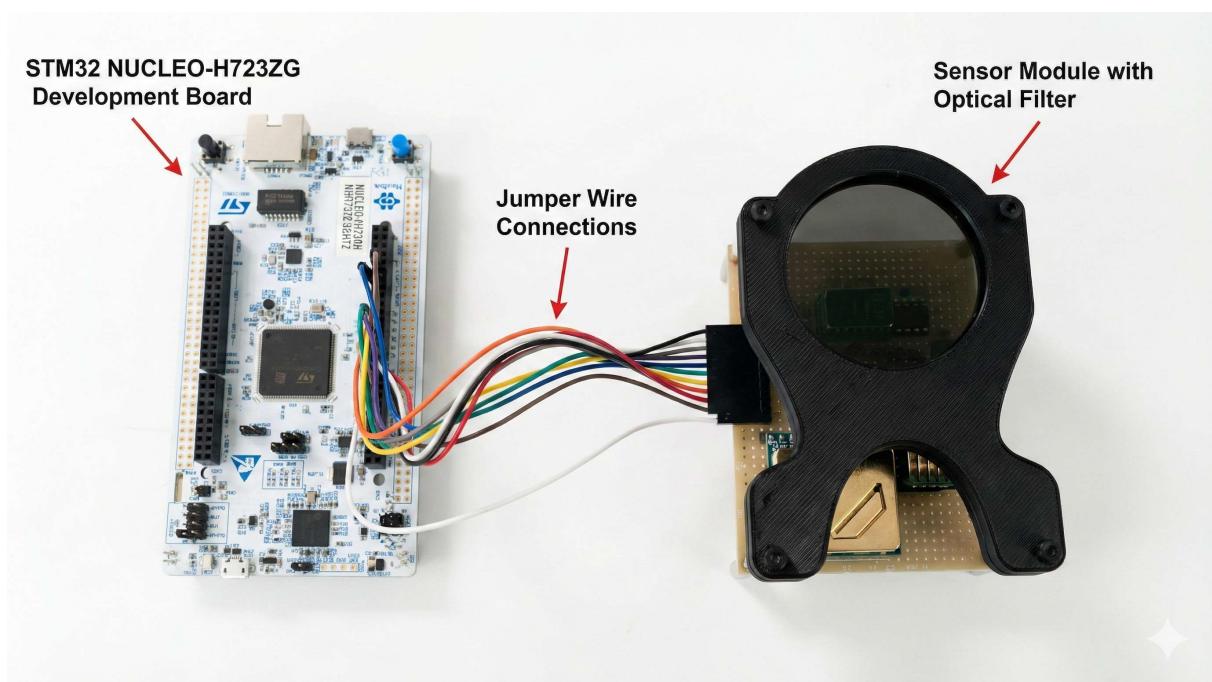


Fig. A.1 Experimental setup for high-speed spectral acquisition. An STM32 NUCLEO-H723ZG development board is connected to the sensor module with an optical bandpass filter via jumper wires for power and signal interfaces.[21]

BME280

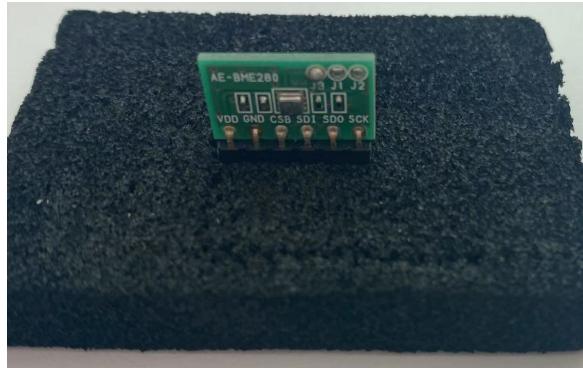


Fig. A.2 Environmental sensor (BME280) used in this study.[22]

Table A.1 Environmental sensor (BME280) used in this study.[22]

Item	Specification
Measured quantities	Temperature, humidity, pressure
Humidity range	0 – 100 %RH
Pressure range	300 – 1100 hPa
Temperature range	– 40 ° C to +85 ° C
Humidity accuracy	± 3 %RH
Interface	I ² C, SPI
Supply voltage	1.71 – 3.6 V
Current consumption	1.8 – 3.6 μ A (typ.)
Package size	2.5 mm × 2.5 mm × 0.93 mm

S300L-3V CO₂ センサ



Fig. A.3 S300L-3V CO₂ sensor used in this study.[23]

Table A.2 S300L-3V CO₂ sensor used in this study.[23]

Item	Specification
Measured gas	CO ₂
Measurement range	0 – 10,000 ppm
Accuracy	± 3 % of reading or ± 30 ppm
Response time ($T_{63\%}$)	60 s
Measurement interval	3 s
Supply voltage	3.2 – 3.55 V
Current consumption	12 mA (normal), 0.3 mA (sleep)
Output interfaces	UART (TTL), I ² C, Analog
Operating temperature	– 20 ° C to +50 ° C

u-blox ZED-F9P RTK-GNSS 受信機

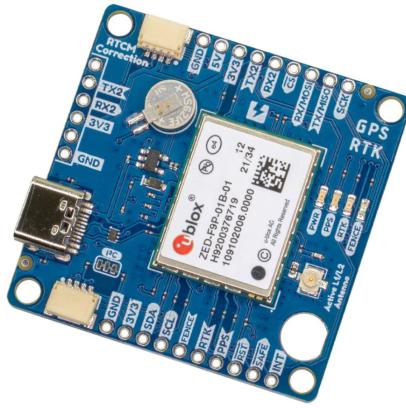


Fig. A.4 RTK-GNSS receiver (u-blox ZED-F9P) used in this study.[24]

Table A.3 RTK-GNSS receiver (u-blox ZED-F9P) used in this study.[24]

Item	Specification
GNSS bands	GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou
RTK support	Yes (multi-band RTK)
Position accuracy	Centimeter-level (RTK FIX)
Maximum update rate	Up to 20 Hz
Communication interfaces	UART, I ² C, SPI, USB
Supply voltage	2.7 – 3.6 V
Operating temperature	– 40 ° C to +85 ° C
Package	LGA
Dimensions	17.0 mm × 22.0 mm × 2.4 mm

u-blox ANN-MB-00 RTK-GNSS アンテナ



Fig. A.5 RTK-GNSS antenna (u-blox ANN-MB-00) used in this study.[25]

Table A.4 RTK-GNSS antenna (u-blox ANN-MB-00) used in this study.[25]

Item	Specification
Type	Active multi-band GNSS antenna (RHCP)
Frequency bands	L1 and L2/E5b/B2I
Supply voltage	3.0–5.0 V
Supply current	Typ. 15 mA
Cable / length	RG174, 5.0 m
Connector options	SMA / SMB / MCX
Size	82.0 × 60.0 × 22.5 mm
Weight	Typ. 173 g (incl. cable)
Ingress protection	IP67
Operating temperature	–40 to +85 °C

Livox MID-360 3D-LiDAR

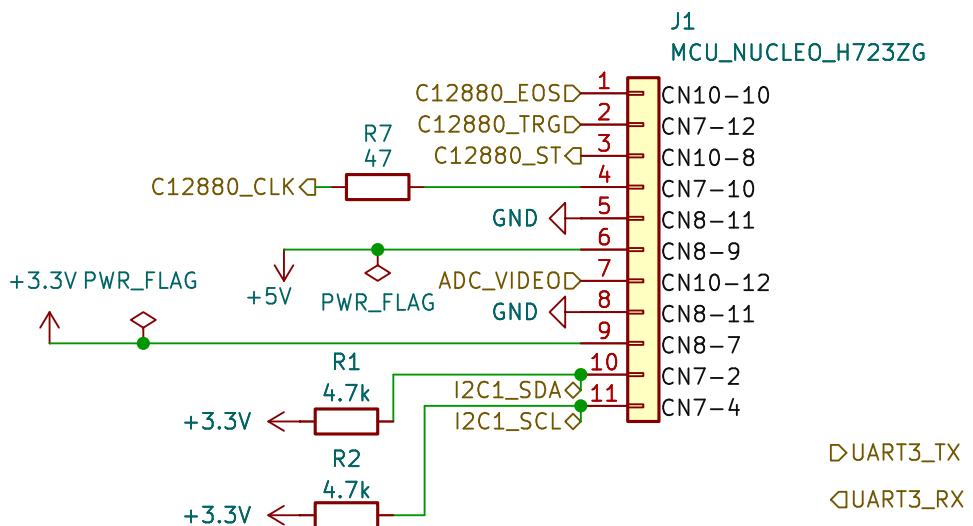


Fig. A.6 LiDAR sensor (Livox MID-360) used in this study.[26]

Table A.5 LiDAR sensor (Livox MID-360) used in this study.[26]

Item	Specification
Measurement principle	3D LiDAR (non-repetitive scanning)
Field of view	360° (horizontal) × 59° (vertical)
Detection range	Up to 70 m (typ.)
Angular resolution	Non-uniform (non-repetitive pattern)
Output rate	Up to 200,000 points/s
Interface	Ethernet (UDP)
Supply voltage	9 – 27 V DC

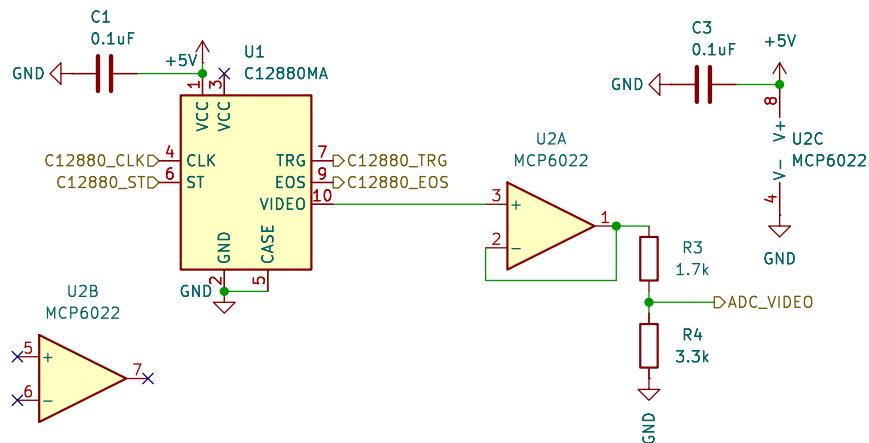
付録 B インタフェース回路



USART3 (PD8/PD9) is routed to the on-board ST-LINK Virtual COM Port (VCP).
Power and UART share the same Micro-USB cable.
Default solder bridges: PD8=SB19 ON; PD9=SB12 ON.

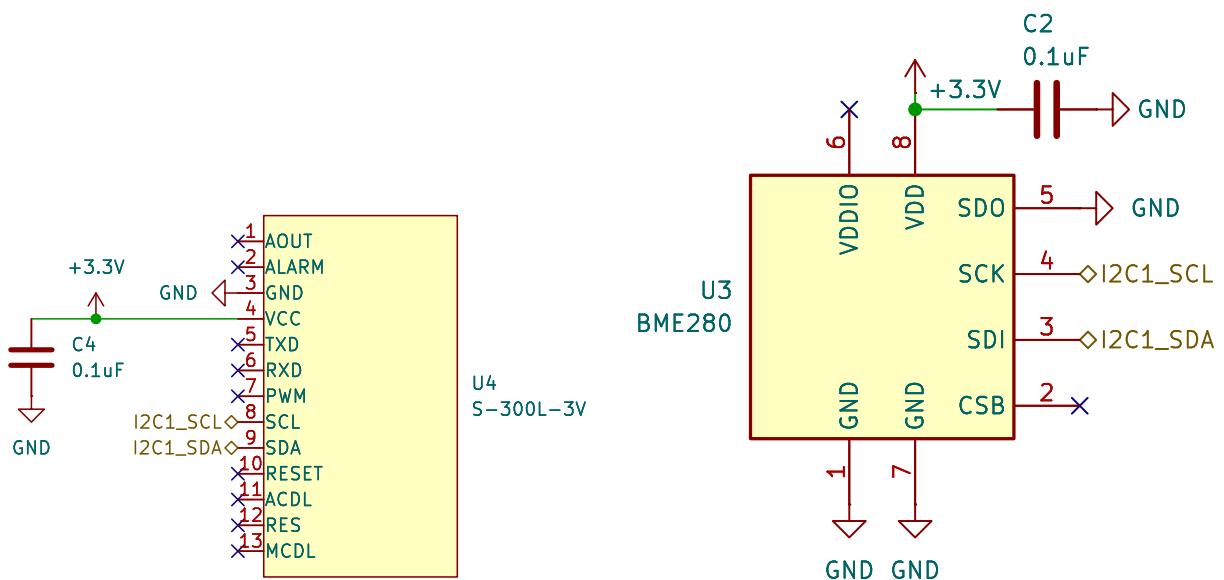
- Power source (USB mode):
- +5V_USB: USB VBUS from on-board ST-LINK (Micro-USB), provided on CN8 5V pin (output).
 - +3V3: Generated by the NUCLEO on-board regulator, provided on CN8 3V3 pin (output).

Fig. B.1 MCU (NUCLEO-H723ZG) interface circuit



DESIGN RATIONALE:
 C12880MA 5V digital outputs (TRG/EOS) connect directly to 5V-tolerant MCU pins.
 A divider is avoided on the high-speed TRG signal to maintain edge integrity.
 The 5V analog VIDEO output is buffered by U2A and scaled down by R3/R4 to fit the MCU's 3.3V ADC input range.

Fig. B.2 Spectrometer (C12880MA) interface circuit



(a) CO₂ sensor (S300L) interface circuit

(b) Environmental sensor (BME280) interface circuit

Fig. B.3 Interface circuits for CO₂ and environmental sensors.

付録 C 室内で検証した Navigation2 の動作確認

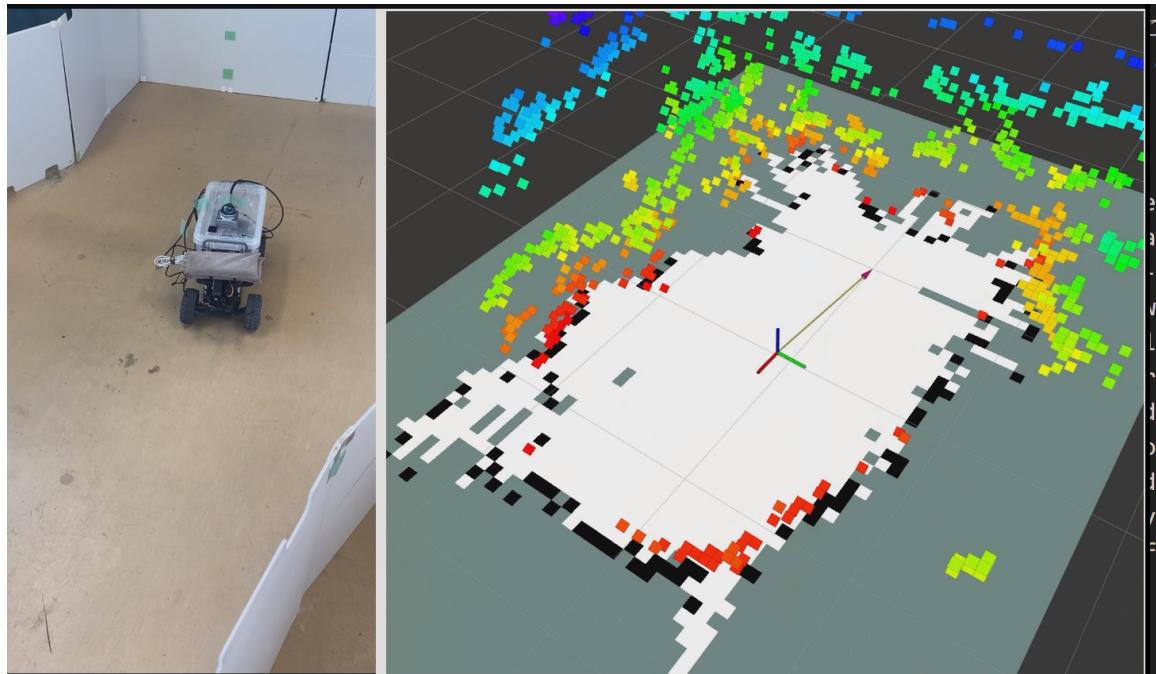


Fig. C.1 Nav2+STVL による室内検証の記録（録画・画面収録より抜粋）。

付録 D 付録参考文献

- [21] STMicroelectronics. stm32h723zg datasheet. <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32h723zg.pdf>. (Accessed on 10/9/2025).
- [22] BOSCH. BME280 Environmental Sensor Datasheet. <https://www.bosch-sensortec.com/media/boschsensortec/downloads/datasheets/bst-bme280-ds002.pdf>. (Accessed on 10/9/2025).
- [23] E. S. Corporation. S300L CO₂ Sensor Datasheet. [https://www.tme.eu/Document/893177870dd3a67b7053e260a748c617/DS_S - 300\(LG\) - 3V_ver1.21_eng.pdf](https://www.tme.eu/Document/893177870dd3a67b7053e260a748c617/DS_S - 300(LG) - 3V_ver1.21_eng.pdf). (Accessed on 10/9/2025).
- [24] U-blox. ZED-F9P-02B Datasheet. https://cdn.sparkfun.com/assets/f/8/d/6/d/ZED-F9P-02B_DataSheet_UBX-21023276.pdf. (Accessed on 10/9/2025).
- [25] U-blox. u-blox ANN-MB-00 【L1 L2 対応】GNSS・GPS アンテナ. <https://doc.switch-science.com/media/files/824c74e3-9139-425c-8836-1740a7acdd03.pdf>. (Accessed on 10/9/2025).
- [26] L. Technology. Livox Mid-360 User Manual. https://terra-1-g.djicdn.com/851d20f7b9f64838a34cd02351370894/Livox/Livox_Mid-360_User_Manual_EN.pdf. (Accessed on 10/9/2025).