

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	6
2.2.1	LiDAR を用いた自己位置推定	6
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	8
2.3	農業用生育環境センシングセンサと分光計測	8
2.3.1	小型分光センサの農業利用	8
2.3.2	浜松ホトニクス社製評価基板の課題	9
2.4	本研究の位置づけと新規性	9
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	外れ値発生直後の注入防止	18
3.4	完全性監視のための座標変換	19
3.5	実験と評価	20
3.5.1	実験環境とデータ収集	20
3.5.2	評価対象データにおける GNSS 軌跡不連続の観測	21
3.5.3	比較手法	21
3.5.4	評価観点	21
3.5.5	実環境評価結果	22
3.5.6	NLOS 疑い区間における挙動の詳細	25
3.5.7	品質監視の時間応答	25
3.5.8	考察	25
第 4 章	高速分光センシングシステムの構築	27
4.1	本章で用いるセンサユニットの概要	28
4.2	分光センサ駆動モジュールの開発における従来の課題	29
4.2.1	従来方式の再検証	31
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	フレーム取得シーケンス	32
4.3.2	TIM-ADC-DMA の連携機構	32
4.3.3	ST 立下り後の開始遅延と有効画素範囲の補正	33
4.4	実装	33
4.4.1	ハードウェアトリガ連鎖	33
4.4.2	STM32H7 におけるキャッシュ整合性対策	34
4.5	性能検証	35
4.5.1	STM32F446RE でのアーキテクチャ検証	35
4.5.2	STM32H723ZG での 5 MHz 高速取得	35
4.5.3	オシロスコープによる 5 MHz 動作確認	35
4.5.4	CSV に基づく EOS / ST / VIDEO 波形の再構成	36
4.5.5	サンプリングレート成立性の検討	37
4.6	その他センサのデータ取得と統合	38
4.7	まとめ	38
第 5 章	生育環境マッピング	40

5.1	マッピング手法と実験条件	40
5.2	データの同期と生育環境	40
5.2.1	分光スペクトルの特徴抽出と空間マッピング	41
5.2.2	スペクトル特徴による植生・非植生の識別可能性	41
5.2.3	微気象データの安定性と環境勾配	41
5.3	生成された生育環境マップ	42
5.4	考察	42
第6章	結言	46
6.1	本研究のまとめ	46
6.2	今後の課題	47
参考文献		48
謝辞		51
付録A	使用したセンサ	52
A.1	STM32 NUCLEO-H723ZG 開発ボード	52
A.2	BME280	53
A.3	S300L-3V CO ₂ センサ	54
A.4	u-blox ZED-F9P RTK-GNSS 受信機	55
A.5	u-blox ANN-MB-00 RTK-GNSS アンテナ	56
A.6	Livox MID-360 3D-LiDAR	57
付録B	インターフェース回路	58
付録C	付録参考文献	60

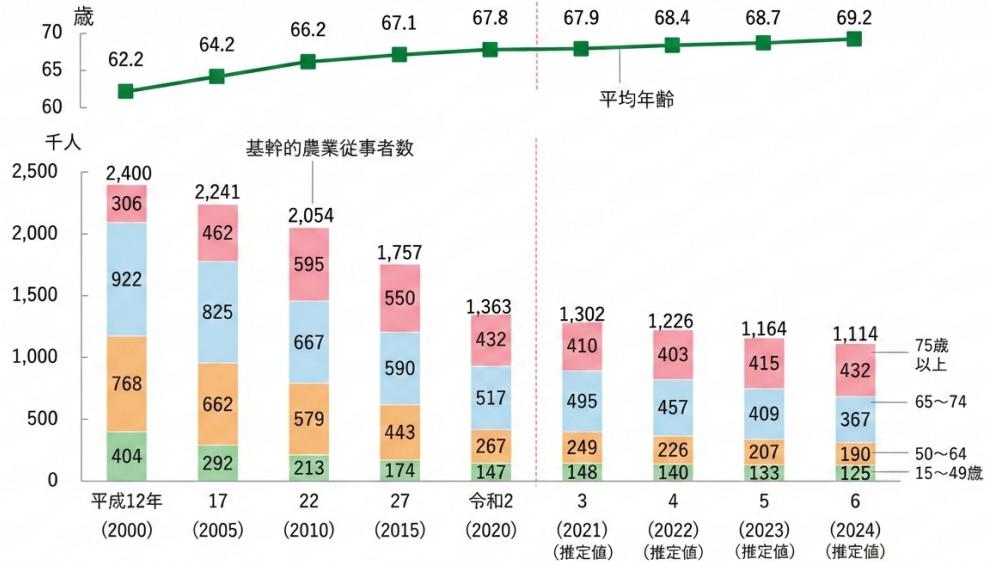
第1章 緒言

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信頼な自己位置推定が前提となる。しかし、農業用ビニールハウスのような半構造環境 [3] では、屋外・屋内のいずれとも異なる複合的困難が存在する。

第一に、ハウス骨組み、被覆材、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) に起因する偏り外れ値が生じ得る。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、地図整合性を破壊し、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幾何形状となりやすく、LiDAR スキャンマッチングにおける幾何学的縮退が生じやすい。その結果、LiDAR–IMU Odometry (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し、絶対位置基準との整合が課題となる。

第三に、農業計測はマルチモーダル化が進み、温湿度や CO₂ などの環境量に加え、分光情報のような高次元データを用いた生育評価も重要となっている。移動体に搭載する場合、取得周期・遅延・同期精度が空間マップ品質を支配するため、計測と位置推定が同時に要求される。し



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

たがって、農業用ハウス環境での巡回センシングを意思決定へ接続するには、劣化し得る GNSS を前提としたロバストな統合測位と高頻度センシングの空間マッピングを統合的に設計する必要がある。

1.3 本研究の目的

本研究の目的は、GNSS 測位品質が動的に変動する農業用ハウス環境において、3D-LiDAR, IMU, および品質情報を伴う RTK-GNSS(Real Time Kinematic Global Navigation Satellite System)を統合し、バックエンド最適化の破綻を回避しながら高信頼な自己位置推定を実現することである。特に、受信機状態量のみでは判別が難しい NLOS 外れ値に着目し、LIO の短時間増分との整合性に基づき GNSS 観測の採否・重み付けをオンラインに制御する GNSS 品質監視モジュールを提案する。

さらに、得られた軌跡に基づき、温湿度、CO₂ 濃度、気圧等の環境センサ値を取得し、小型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、生育環境の高分解能マップを生成することを目的とする。これにより、人手による観測頻度・空間密度の制約を緩和し、圃場状態の定量把握と管理作業の高度化に資する巡回計測を提示する。

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 品質監視に基づくロバストな自己位置推定手法の設計と評価を述べる。第 4 章では、高速なデータ取得を実現する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

本研究は、農業移動ロボットによる自律巡回を前提として、高信頼な自己位置推定と生育環境センシングを統合し、圃場空間マップを生成することを目的とする。本章では、圃場巡回システム、自己位置推定、GNSS の NLOS と完全性監視、および農業用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明確化する。

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 [4]。同研究は、圃場での巡回観測の有効性を示した一方で、自律走行は主として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 による補正を前提としていなかった。

これに対し筆者は、AGV に搭載した 2D-LiDAR、IMU、ホイルオドメトリを用い、圃場の短距離区間における自動走行を実機で実現した [5]。しかし、2D-LiDAR ベースの SLAM は圃場・ハウス環境において観測幾何が単純化しやすく、自己位置推定の安定性に限界がある。加えて、2D 計測では障害物の高さ情報を直接取得できず、通路脇の枝葉や棚構造など三次元的干渉を伴う状況での安全性評価が困難である。またホイルオドメトリは、空転・スリップにより誤差が累積しやすい。以上より、本研究では 3D-LiDAR と IMU に基づく自己位置推定の主軸とし、RTK-GNSS を絶対位置拘束として統合するセンサフュージョンを採用することで、圃場・ハウスでの巡回に必要なロバスト性を確保する。

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 が利用できない、あるいは不安定な環境下では、3D-LiDAR と IMU を組み合わせた LiDAR-Inertial Odometry（以下、LIO）が自己位置推定の中核となる。LOAM [6] 以降、LeGO-LOAM [7]、LIO-SAM [8] などの最適化ベース手法が発展し、近年では直接法とフィルタ推定を組み合わせた FAST-LIO2 [9] が、計算効率とロバスト性の観点から広く利用されている。

一方、農業用ハウスや圃場のような半構造環境では課題が残る。特に、長い通路では、進行方向に対して有効な幾何特徴が不足し、スキャンマッチングが不定となる縮退が発生しやすい。その結果、長時間走行におけるドリフトが蓄積し、地図の整合性が低下することが報告されている [10]。したがって、農業環境での実運用には、LIO 単独に依存せず、外部基準によるドリフト抑制が重要となる。

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、GNSS による絶対位置情報を統合する手法が広く研究されている。一般に、拡張カルマンフィルタやグラフ最適化により GNSS 観測を拘束として導入するが、多くの手法は GNSS 誤差が概ねガウス的であること、および受信機が報告する測位状態が信頼できることを暗黙に前提としている [11]。

しかし農業用ハウス環境では、ガラス・金属フレーム等に起因する遮蔽・反射により、NLOS 受信やマルチパスが発生し、見かけ上の受信機状態が良好であっても数メートルのバイアス外れ値が混入し得る。このような外れ値をバックエンドへ入力すると、推定軌跡に位置飛びが生じ、ループ閉合や因子グラフ最適化を介して地図全体が破壊される危険性がある。したがって、GNSS を使う／使わないの二択ではなく、GNSS 拘束を動的に選別し、安全に統合するための品質監視の枠組みが必要となる。

2.2.3 NLOS/マルチパスと完全性監視

GNSS 外れ値の典型要因として、マルチパスおよび 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り誤差が正負に振れ得る一方、NLOS では直達波が遮蔽され反射経路の

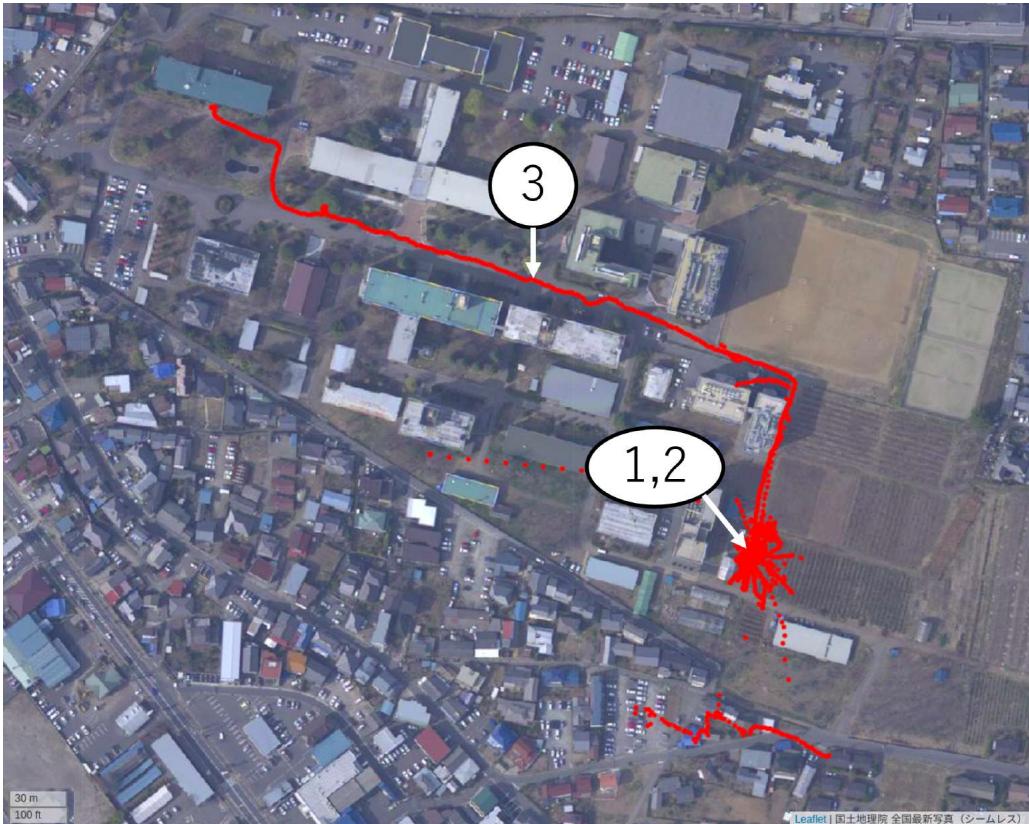


Fig. 2.1 GNSS trajectory disturbances observed in agricultural environments. The numbered segments represent different positioning situations; segments 2 and 3 are located near farmland and facilities, where environmental effects can degrade GNSS measurements. (reproduced from [4]).

みを受信するため、測距誤差が系統的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。このような環境影響の一例として、先行研究 [4] では、農業施設周辺において取得された GNSS 軌跡が局所的に乱れる様子が報告されている。Fig. 2.1 は、農業環境における遮蔽・反射の影響を示す事例である。

完全性監視は、測位情報が要求性能を満たさない場合に利用者へ適時に警告・排除判断を提供する枠組みであり、航空分野で RAIM 等として体系化されてきた。一方、地上移動体では衛星可視数の変動や環境起因の多重劣化が顕著であり、GNSS 内部冗長性に基づく検定のみでは限界がある。この背景から近年は、深層学習を用いて GNSS の擬似距離誤差をモデル化し、LiDAR データと融合させる DeepPCO [12] のようなエンドツーエンドの手法も提案されている。しかし、これらの手法は膨大な学習データを必要とする。

また、SLAM やマルチセンサ融合においては、外れ値拘束が少数混入しただけでも、推定解が大きく歪み、地図整合性が破綻し得る。この問題に対し、スイッチ変数を用いて拘束を自動的に無効化する手法 [13] が提案されている。これは最適化内部でのロバスト化により外れ値影響を

抑える枠組みである。

2.2.4 本研究の特徴

以上の研究動向に対し、本研究は圃場環境でも一部区間で利用可能な RTK-GNSS を活用しつつ、NLOS/マルチパスに起因する外れ値がバックエンドへ注入されるリスクを、LIO を短時間の基準として用いた整合性検定により抑制する点に特徴がある。すなわち、最適化内部のロバスト閾数に全面的に依存するのではなく、因子投入前の段階で GNSS 拘束を選別することで、地図破壊の発生確率を低減する。

2.3 農業用生育環境センシングセンサと分光計測

生育環境情報を圃場空間上に配置してマップ化するためには、各時刻の観測に対応する自己位置の誤差がマップ品質を直接規定する。したがって、自己位置推定の信頼性向上は、高分解能なセンシング結果を空間マップとして整合的に統合する上で不可欠である。

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 IoT センサノードは広く用いられているが、設置コストや電源確保の観点から空間分解能に限界がある。これに対し、移動ロボットにセンサを搭載し巡回計測することで、高密度な環境マップを作成する試みが報告されている [14]。

2.3.1 小型分光センサの農業利用

作物の生理状態を非破壊で診断する手段として、分光反射率の計測が注目されている。近年、MEMS 技術により小型分光センサ（浜松ホトニクス C12880MA 等）が普及し、ドローンや AGV への搭載を前提とした計測システムが提案されている [15]。

先行研究 [4] では、C12880MA を搭載した AGV 計測システムが構築されたが、(1) 移動しながらの連続計測が限定的であった点、(2) 読み出し回路の設計に起因してデータ取得速度が最大 50 kHz 程度に制約された点、の 2 点が課題として残されていた。C12880MA 自体は MHz オーダーの駆動能力を有するため、観測された性能制限はセンサ固有の制約ではなく、読み出しアーキテクチャの制約に起因すると解釈できる。

2.3.2 浜松ホトニクス社製評価基板の課題

C12880MA の開発・評価用として、浜松ホトニクス社から評価基板 C13016 が提供されている [16, 17]. 同基板は PC と USB 接続し、専用ソフトウェアによりスペクトル波形の確認・保存が可能である。しかし、(1) 高コスト・大型であり多数搭載や低コスト化の障壁となる点、(2) PC 前提であり、組み込みロボットで必要となる MCU からの直接・高速制御に最適化されていない点、から、本研究のような AGV 統合には不向きである。したがって、AGV 走行速度に整合した高密度分光マッピングを実現するには、C12880MA を MCU から直接、かつ限界性能で駆動できる専用ドライバの開発が不可欠である。

2.4 本研究の位置づけと新規性

以上の背景を踏まえ、本研究の新規性は以下の 3 点に集約される。

1. 農業環境特有の GNSS 品質変動の実データ分析：ハウス環境における測位モードの遷移と、NLOS/マルチパスに起因する外れ値の発生傾向を実データに基づき整理し、センサフェュージョンで問題となる誤拘束注入の条件を明確化する点。
2. GNSS 品質監視による安全な統合：受信機状態量に依存した単純な閾値処理ではなく、LIO と GNSS の短時間増分の整合性に基づく検定とヒステリシス制御を組み合わせた GNSS 品質監視モジュールを提案し、測位品質が突発的に劣化する状況下でも地図破壊を回避しつつ絶対位置補正を行う点。
3. 高速分光センシングと空間マッピングの統合実証：C12880MA の性能を最大限に引き出す駆動方式を開発し、従来の ISR ベース手法に対して 5 MHz のサンプリングを達成する。さらに、自己位置推定と統合する点。

第3章 GNSS品質監視に基づく自己位置推定

本章では、農業用ハウス環境のような半構造環境において、RTK-GNSSの測位品質が遮蔽・マルチパス・差分補正途絶等により間欠的に変動する課題に対処するため、LIOとRTK-GNSSを統合した自己位置推定系を構築する。特に、受信機状態量に基づく可用性判定と、LIOとの短時間増分整合性に基づく完全性監視の考え方を採用し、見かけ上は高品質であっても、遮蔽・マルチパスに起因するNLOS環境下で大きく偏り得る誤測位を抑制するGNSS品質監視モジュールを提案する。提案手法は、バックエンドのグラフ最適化に注入するGNSS制約を選別・重み付け調整し、長時間走行における自己位置推定の安定性向上を目的とする。

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、農業用ハウスを含む半構造化環境において、自己位置推定と生育環境センシングを同時に実現することを目的として設計されている。本システムは、周囲環境およびロボット自身の運動状態を観測するハードウェア系と、それらの観測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から構成される。全体構成と主要な情報流れをFig. 3.1に示す。以降ではハードウェア、ソフトウェア、各座標系の関係を順に述べる。

農業環境では、GNSS測位品質が遮蔽やマルチパスの影響により時間的に大きく変動し、またハウス内通路のような単調な幾何構造に起因して、LiDARを用いた自己位置推定が幾何学的に縮退する局面が生じ得る。このような環境特性を踏まえ、本研究では、観測品質の変動を前提とした情報統合手法を採用する。

以下では、まず移動ロボットプラットフォームおよび搭載センサについて述べ、次にLIO、ナビゲーションシステム、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、不整地走行を想定した AGV 車体を用い、圃場内を巡回しながら各種センサデータを取得できる構成とした。AGV 車体では Gmade 社の GS02 を採用した。環境認識・自己位置推定のために 3D-LiDAR (Livox 社 Mid-360) を使用する。LiDAR 点群は地図生成および自己位置推定の主要な観測情報として用いる。LiDAR に内蔵された IMU は、点群の運動歪み補正および短時間の姿勢推定に利用される。

絶対位置計測には 2 周波 RTK-GNSS 受信機 (u-blox 社 ZED-F9P) を用い、基準局から配信される RTCM 補正情報を利用することで、屋外環境においてセンチメータ級の測位精度を目指す。また、RTCM 補正情報の取得にあたり、森林総合研究所が公開している RTK 基準局サービスを利用した [18]。RTCM 補正情報は無線 LAN を介してロボットに入力され、GNSS 受信機によりリアルタイムで適用される。

一方で、農業用ハウス周辺では、作物や構造物による遮蔽およびマルチパスの影響により、測位状態や共分散が時間的に大きく変動することが確認されている。そのため、本研究では GNSS 観測を常に信頼可能な情報として扱うのではなく、後述する品質監視に基づいて、自己位置推定への寄与を動的に制御する。

また、ロボットの駆動には BLDC (Brushless Direct Current) モータを使用するが、本研究では不整地でのスリップがあったため、車輪オドメトリは自己位置推定の主要情報源として用いない。センサデータ取得と推定処理は Raspberry Pi 4B 上で実行し、無線 LAN を介して PC と通信を行う。AGV の写真や構成を 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)[19] を基盤とし、自己位置推定・地図生成・自律走行をモジュール化して構成する。自己位置推定およびマッピングは、フロントエンドとして LIO を用いて高頻度の相対運動推定を行い、バックエンドとして RTAB-Map[20] によりループ閉合と因子グラフ最適化を実行する。さらに、GNSS 品質監視モジュールにより観測の採否および共分散調整を行った RTK-GNSS 観測を、バックエンド最適化の位置制約として導入する。自律走行は Navigation 2[21] を用いて実装し、地図およびロボット姿勢に基づく経路計画と追従制御を行う。

3.1.2.1 ROS 2

ソフトウェア基盤には ROS 2(Robot Operating System 2)[19] 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、および自律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

自律走行には Navigation2 を用いる。Navigation2 は、グローバル経路計画、ローカルプランニング、Behavior Tree によるタスク実行を統合的に提供する。本システムでは、バックエンド SLAM が提供する地図座標系における自己位置に基づいて経路計画を行い、LiDAR 観測に基づく局所障害物回避を併用する。局所コストマップ生成には Spatio-Temporal Voxel Layer (STVL) [22] を用い、3 次元点群を時系列に保持するボクセル表現により、近傍障害物の占有推定を行う。これにより、農業環境における不整地や局所的な遮蔽物に対しても、走行時の安全性と追従安定性の向上を図る。

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[9] 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、リアルタイム動作に適したオドメトリを提供する。

バックエンドには RTAB-Map を用い、ループ閉合検出と因子グラフ最適化により地図整合性を向上させる。RTAB-Map を採用した理由は、(i) ループ閉合に基づく長期ドリフト抑制を実装容易に実現できること、(ii) 複数センサ入力を制約として扱える枠組みを有すること、(iii) 将来的に視覚センサ等を追加した場合でも入力モダリティの拡張が比較的容易であり、農業環境マッピングへの発展性が高いこと、の 3 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以下のように構成する。

- FAST-LIO2 : `odom` → `base_link`
- RTAB-Map : `map` → `odom`
- 静的パラメータ : `base_link` → `lidar`, `base_link` → `gps_antenna`

これにより、制御・追従は odom 系の連続性を保持しつつ、地図参照のナビゲーションおよび環境マッピングは map 系でのグローバル整合を利用できる。

3.1.2.5 データ処理フロー

主なデータフローを以下に示す。

- FAST-LIO2：点群・IMU → ${}^{\text{odom}}T_{\text{base}}(t)$
- GNSS 品質監視モジュール：NavSatFix + 受信機状態量 + LIO オドメトリ → 採否・共分散調整済み GNSS 観測
- RTAB-Map：点群 + LIO オドメトリ + 品質監視後 GNSS → ループ閉合／因子グラフ最適化 → $\text{map} \rightarrow \text{odom}$ 、最適化軌跡
- Nav2：地図（ map ）+自己位置（ map 系）+局所コストマップ（STVL）→ 経路計画／追従制御
- 生育環境マッピング：最適化軌跡に基づき環境センサ値を map 座標系へ対応付け

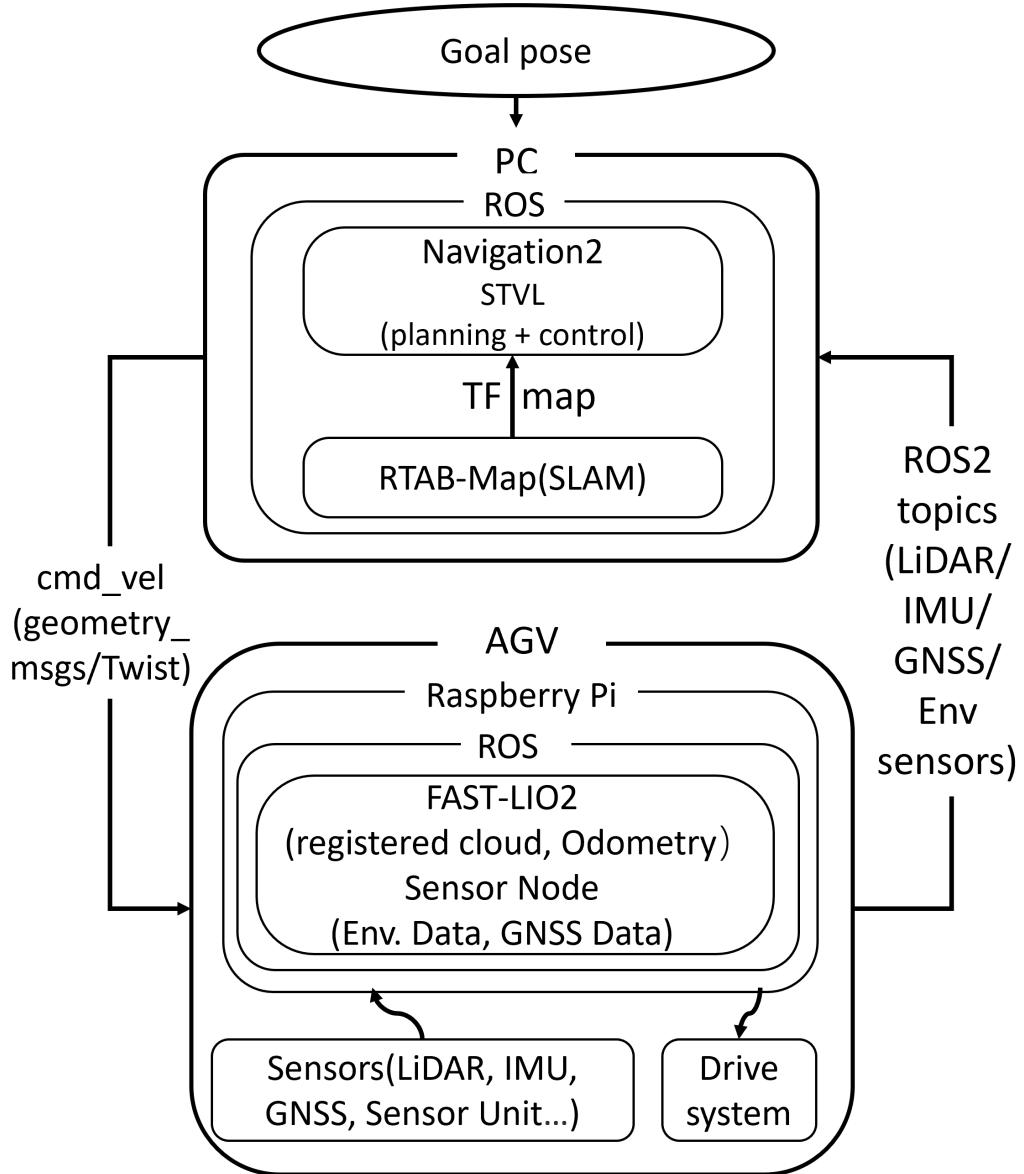


Fig. 3.1 Overview of the system architecture and data flow. The PC-side ROS 2 stack runs RTAB-Map (SLAM) and Navigation2 with STVL (planning and control), while the AGV-side ROS 2 stack runs FAST-LIO2 to provide registered point clouds and odometry. Sensor topics (LiDAR/IMU/GNSS/environment) are exchanged via ROS 2, and velocity commands are sent as cmd_vel (geometry_msgs/Twist). The TF/map frame relationship used for navigation is also illustrated.

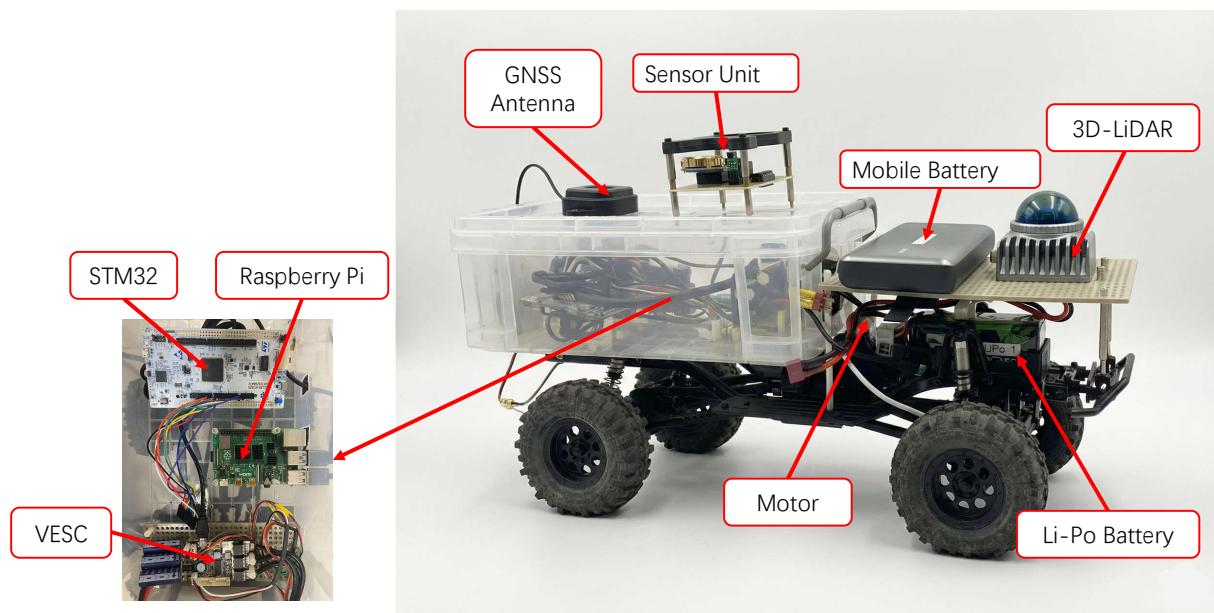


Fig. 3.2 移動ロボットプラットフォームと搭載センサ構成

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ける RTK-GNSS は、多くの時間帯で高精度に利用可能である一方、遮蔽・マルチパス・差分補正の途絶等により、測位品質が間欠的に劣化する。本研究では、この品質劣化を単一の現象として扱わず、オンラインで区別可能な故障モードとして次の 3 種類に整理する。

1. GNSS 利用不可能

No-Fix、使用衛星数不足、差分補正の途絶等により、測位解が得られない、あるいは測位情報として利用不可能な状態である。これは測定欠落に相当する

2. NLOS／マルチパス起因の大偏差外れ値混入

受信機が RTK-FIX 等の状態を報告し、共分散も小さいにもかかわらず、遮蔽・マルチパスに起因する NLOS 環境下で実際の測位が大きく偏り、推定軌跡に不連続な位置の飛びが生じる状態である。本研究の焦点は、この見かけ上は良好だが誤っている測位外れ値の抑制にある。

3. LIO の幾何学的縮退と不整地擾乱

ハウス内通路等では点群の幾何的特徴が乏しく、可観測性が低下して LIO が縮退し得る。また不整地では車輪スリップが顕著であり、実験では、Wheel Odometry は自己位置推定源としては不適切と判断した。

本研究の目的は、GNSS が高精度に利用可能な時間帯が多い一方で、遮蔽・マルチパス・補正途絶に起因して利用不可が間欠的に発生し、まれに NLOS 由来の大偏差外れ値が混入する統計的特性をもつ状況下で、バックエンドのグラフ最適化を誤拘束の注入しないことを最優先としつつ、高品質 RTK 拘束により LIO の長期ドリフトを抑制する統合推定系を構築することである。そのために、後端へ注入する GNSS 拘束をオンラインで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

本研究では、RTAB-Map に導入される GNSS 制約が因子グラフ最適化の結果を劣化させないことを最優先課題とし、GNSS 観測をオンラインで選別する GNSS 品質監視モジュールを設計した。農業用ハウス環境において、RTK-GNSS は多くの時間帯で高精度に利用可能である一方、遮蔽、マルチパス、および差分補正の途絶に起因して、NLOS 環境下の大偏差外れ値が混入する可能性がある。このとき、誤拘束が 1 サンプルでも RTAB-Map へ注入されると、地図作成結果を劣化させる場合がある。したがって本研究では、GNSS 出力の重みを段階的に調整するのではなく、採用または遮断によって RTAB-Map への拘束注入を制御する。

3.3.1 入出力仕様と遮断の実装

品質監視モジュールの入力は、GNSS 観測 `NavSatFix`、受信機の補助状態量、および `LIO` が出力する相対オドメトリである。出力は RTAB-Map へ与える `NavSatFix` であり、観測の扱いを次の二値で決定する。

- **採用:** 観測を RTAB-Map へ注入する、観測が持つ共分散を基本的に保持する。
- **遮断:** 観測を RTAB-Map へ注入しない、または固定の大きな対角共分散へ置換し、拘束として確実に無効化する。

NLOS／マルチパス環境下では、受信機が共分散を過小評価して報告する場合があり、単純な倍率拡大による重み調整に依存すると誤拘束が残存し得る。そこで本研究では遮断時に倍率拡大へ依存せず、固定値の共分散により拘束を確実に無効化する実装とした。具体的には、遮断時の出力共分散を $\text{diag}(C_{\text{blk}}, C_{\text{blk}}, C_{\text{blk}})$ とし、 C_{blk} は十分大きい定数（例：99999）として設定する。

3.3.2 可用性判定

可用性判定は、`LIO` 等の外部推定に依存せず、受信機自身が提供する状態量に基づいて GNSS 観測の基本的な入力妥当性を判定する。目的は、測位不成立や補正途絶などの利用不可能状態を確実に遮断し、バックエンドグラフへ不正な拘束が注入されることを防ぐことである。

本研究では、補助状態量が一時的に欠落・遅延する状況を考慮し、補助情報が未取得であること自体では直ちに遮断せず、ハード不成立条件のみを遮断トリガとした。

また、起動直後は履歴が十分でなく増分整合性検定が成立しない場合があるため、初期の一定サンプルは Integrity gate を適用せず、Availability gate のみで妥当性を確認した上で暫定的に採用する初期化区間を設けた。これにより、正常区間であっても開始直後から連続して遮断となる挙動を抑制する。

3.3.3 完全性監視：短時間増分整合性検定

完全性監視は、受信機状態が良好に見えるにもかかわらず、遮蔽・マルチパスに起因するNLOS環境下で外れ値を含む誤測位が混入する状況を抑制するための機構である。本研究では絶対位置の一致を仮定せず、短時間窓 ΔT の位置増分を比較する。時刻 t におけるGNSS位置(ENU)を $\mathbf{p}_{\text{gnss}}(t)$ 、LIOオドメトリを $\mathbf{p}_{\text{lio}}(t)$ とし、増分残差を

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

で定義する。GNSS共分散 $\Sigma_{\text{gnss}}(t)$ は NavSatFix から抽出し、LIO側は等方近似 $\Sigma_{\text{lio}} = \sigma_{\text{lio}}^2 \mathbf{I}$ を用いる。

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

を計算し、 $d(t)$ が閾値 γ を超える場合に Reject とする。

ここで、NLOSによる過小共分散偽装に対して検定が過敏化しないよう、 Σ_{gnss} の対角要素には下限値を与える。さらに、判定のチャタリングを避けるため、 $d(t)$ に短い履歴の中央値フィルタを適用し、連続不合格が一定回数に達した場合に遮断を維持する。

3.3.4 外れ値発生直後の注入防止

増分整合性検定は窓幅や履歴処理を伴うため、原理的に検知遅延が生じ得る。しかし NLOS 由来の大偏差外れ値においては、異常発生直後の最初の観測がバックエンド最適化へ注入されるだけで、地図推定結果が大きく損なわれる場合がある。そこで本研究では、外れ値発生直後の 1 サンプル目を確実に遮断することを目的として、以下の二つの機構を組み合わせた。

(1) **即時遮断ルール**：GNSS が極端に小さい共分散、すなわち過剰な信頼度を報告している場合に限り、増分残差のノルム $\|\mathbf{r}(t)\|$ が微小閾値 r_{tw} を超えた瞬間に、当該観測を遮断と判定する。本規則は、小共分散かつ系統的偏りを伴う NLOS 外れ値に対して、同一サンプルでの即時遮断を実現することを目的としている。

(2) 1 サンプル遅延による決定後出力：時刻 t における GNSS 観測は即時に RTAB-Map へ渡さず、一旦バッファに保持する。次サンプル $t + \delta$ において得られた判定結果が Reject であった場合には、バッファされていた時刻 t の観測を破棄する。この処理により、窓検定に起因する検知遅延が存在する場合であっても、外れ値発生直後の最初の観測がバックエンド最適化へ注入される確率を低減できる。本研究では、地図破綻リスクの低減を最優先とし、1 サンプル分のレイテンシ増加を許容した。

3.4 完全性監視のための座標変換

完全性監視では、GNSS と LIO の短時間増分を同一の直交座標系で比較する必要があるため、GNSS 測位を局所直交座標へ変換する。GNSS が出力する測位は一般に WGS84 (World Geodetic System 1984) に基づく地理座標 (φ, λ, h) (緯度・経度・楕円体高) で表される。一方、完全性検定に用いる残差計算は、距離・増分を扱いやすい ENU 座標系 (East–North–Up, 東・北・上の局所直交座標) で行うことが望ましい。

なお、本研究では ENU 座標を品質監視モジュール内部の計算にのみ使用し、RTAB-Map への入力は既存インターフェース互換性を優先して NavSatFix 形式のまま維持する。

GNSS の地理座標から局所 ENU への厳密変換には、GeographicLib[23] 等による楕円体モデルに基づく座標変換が広く用いられる。GeographicLib は高精度かつ汎用的であり、広範囲移動や標高変化を含む条件で特に有効である。しかし本研究の対象はハウス周辺の狭い走行範囲であり、さらに監視モジュールは Raspberry Pi 4B 上で常時動作するため、依存ライブラリ追加を避けた実装を優先した。このため、完全性監視で必要な精度に対して十分と判断し、以下の短距離平面近似による WGS84→ENU 変換を採用した。

原点 (φ_0, λ_0) は、初期の高品質測位（例：RTK-FIX が連続し、可用性判定を満たす区間）から定め、以降は同一原点に対して一貫して変換を行う。地球半径 R を用いて

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

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

により局所座標 (x, y) を得る。ここで x は East, y は North に対応する。本研究の完全性監視は増分に基づくため、同一原点のもとで一貫して変換が行われる限り、数 cm~数 m スケールの局所運動に対して近似誤差は支配的とならない。ただし、走行範囲が大きくなる場合や高度差が無視できない場合には、楕円体モデルに基づく厳密変換の導入が望ましい。

3.5 実験と評価

本節では、実環境（信州大学農場のハウス内通路）で収集した ROS 2 bag データを用い、提案する GNSS 品質監視が RTAB-Map の因子グラフ最適化に対する誤拘束注入リスクを低減し、地図整合性を改善できることを検証する。なお、本環境では RTK-GNSS が安定して利用可能な時間帯が多い一方で、遮蔽・マルチパスに起因する明確な NLOS 外れ値は発生頻度が低く、再現性のある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 ROS 2 bag に基づく走行記録（以下、ログ）を解析し、品質監視の有効性を主として定性的に示す。

3.5.1 実験環境とデータ収集

実験は信州大学農場のハウス内通路で実施し、AGV を走行させながら LiDAR 点群、IMU、GNSS (/fix)，および受信機状態量を ROS 2 bag として同期記録した。収集後の解析は研究室環境でオフライン実行し、同一 bag に対して各手法を適用した。実験環境の概観を Fig. 3.3 に示す。



(a) Experimental site overview (near the greenhouse field) (b) Experimental site overview (inside the greenhouse)

Fig. 3.3 Experimental environment

3.5.2 評価対象データにおける GNSS 軌跡不連続の観測

記録した GNSS 観測 (`/fix`) を Foxglove 上で可視化したところ、本来連続であるべき走行軌跡に対し、短時間の不連続に相当する挙動が確認された。Fig. 3.4 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 のログでは走行途中で不自然な横方向の逸脱が現れており、本研究の評価対象ログとして用いる。一方、10/20 のログでも同様の挙動が観測されたが、走行開始直後に発生しており、異常発生後の有効な走行区間が短いため、最適化挙動の比較評価には適さない。なお、本研究では、当該不連続が遮蔽・マルチパスに起因する NLOS 外れ値として現れ得る点に着目し、当該区間を NLOS 由来の測位異常が疑われる区間として解析対象に設定した。

3.5.3 比較手法

以下の 3 手法を比較する。いずれも同一の LiDAR/IMU 入力を用い、RTAB-Map の設定は同一とした。

1. **LIO only:** FAST-LIO2 の相対オドメトリを用い、GNSS 拘束を導入しない。
2. **Naive fusion:** GNSS 品質を考慮せず、`/fix` をそのまま RTAB-Map の位置制約として導入する。
3. **Proposed:** 提案する GNSS 品質監視モジュールにより観測の採否を判定し、採用観測のみを RTAB-Map に入力する。

3.5.4 評価観点

本評価は実環境で取得したログ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 (§3.5.7)。

3.5.5 実環境評価結果

Figs. 3.5–3.8 に、各手法で生成された点群地図と推定軌跡を示す（白：点群地図、黄：推定軌跡）。Naive fusion では NLOS 測位異常が疑われる区間において誤った GNSS 拘束が因子グラフへ注入され、局所的な地図歪みが生じる場合が確認された。一方、Proposed では当該区間の GNSS 観測が遮断され、地図の一貫性が改善されることを確認した。



(a) 2025-10-23: overview



(b) 2025-10-23: zoomed view around the anomaly



(c) 2025-10-20: overview (reference only)



(d) 2025-10-20: zoomed view around the anomaly

Fig. 3.4 Examples of GNSS trajectory discontinuities visualized in Foxglove (topic: /fix)

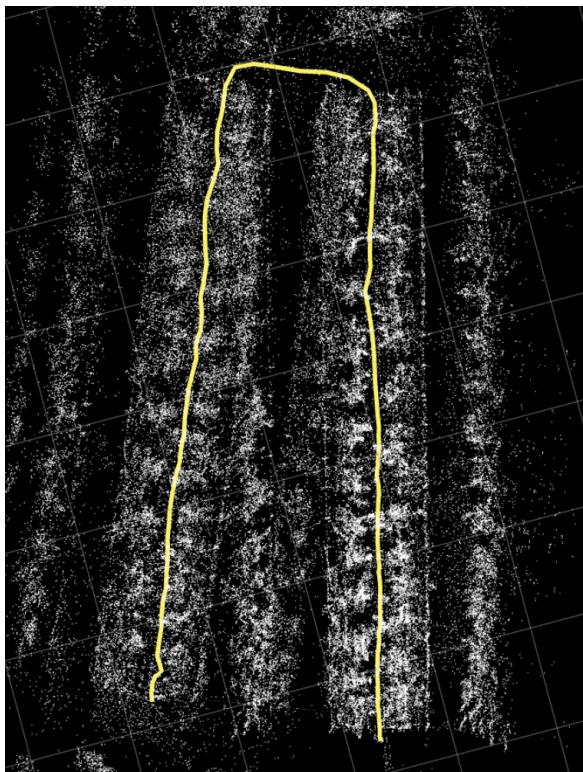


Fig. 3.5 Mapping result with LIO only (white: point cloud map, yellow: estimated trajectory).

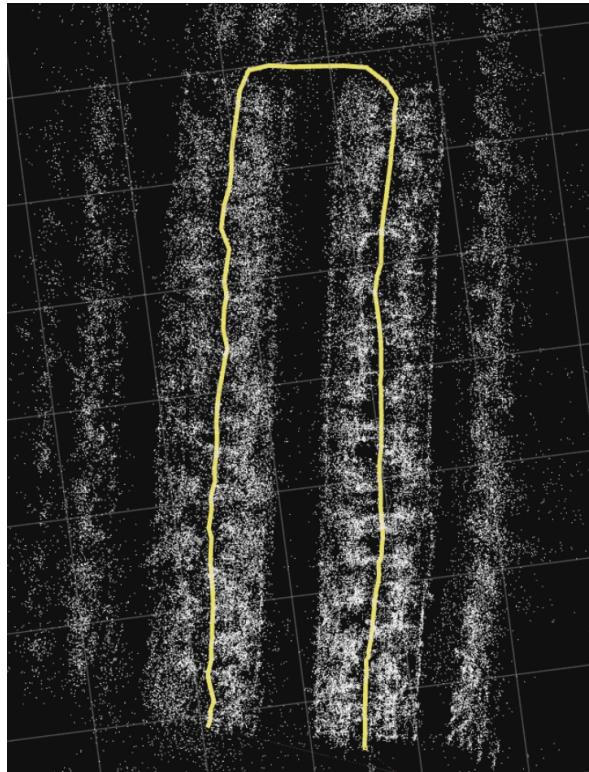


Fig. 3.6 Mapping result with naive GNSS fusion (white: point cloud map, yellow: estimated trajectory).

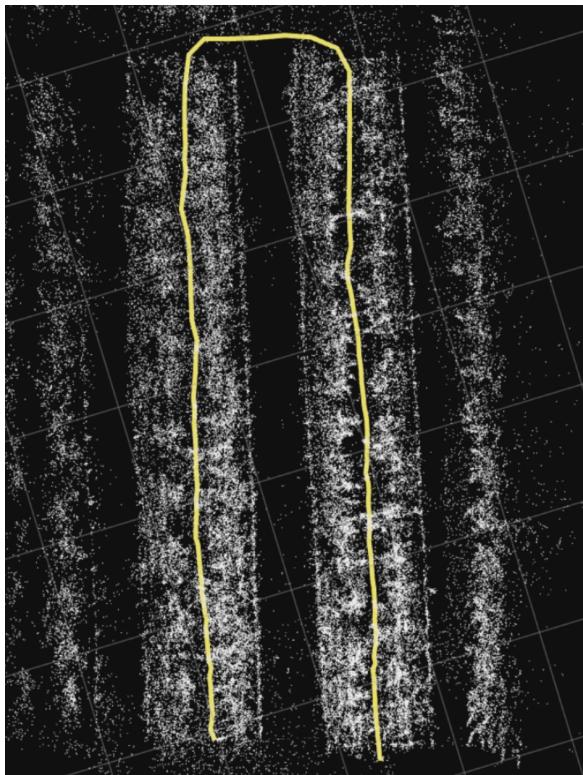


Fig. 3.7 Mapping result with the proposed GNSS Supervisor (white: point cloud map, yellow: estimated trajectory).

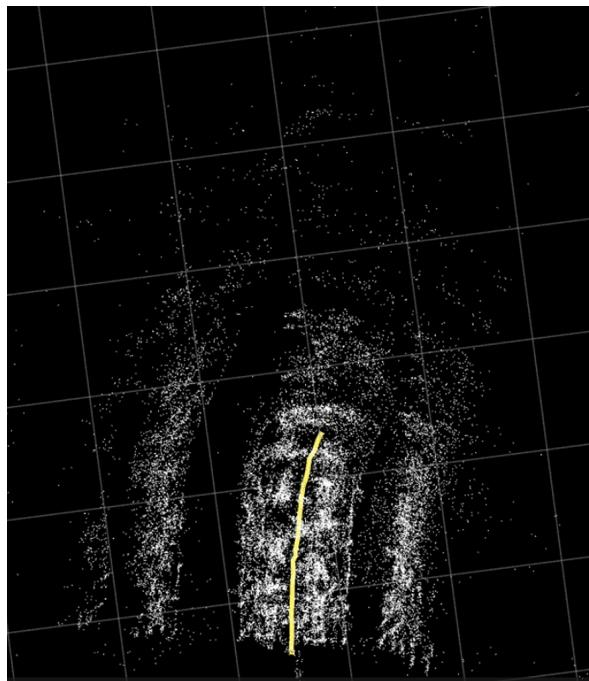


Fig. 3.8 Example of local distortion observed after the anomaly in naive fusion (partial view).
24

3.5.6 NLOS 疑い区間における挙動の詳細

NLOS 由来の外れ値の影響をより明確に示すため, Naive fusionにおいて推定が不安定化した区間の例を Fig. 3.8 に示す. 本ログでは, 異常区間の直後に局所的な歪みが生じたものの, 後続区間で得られた整合的な観測およびループ閉合により, 全体としては回復する挙動も観測された. しかし, この回復は常に保証されるものではなく, 異常の大きさや注入タイミングによっては地図破綻が回復不能となる可能性がある. したがって, バックエンド誤拘束の注入リスクを低減する観点からは, NLOS 由来の外れ値が疑われる観測を事前に遮断し, 最適化へ投入しないことが重要である.

3.5.7 品質監視の時間応答

提案法が異常区間をどのように検知し遮断したかを示すため, 2025-10-23 ログに対する NIS と最終判定の時系列を Fig. 3.9 に示す. 図の破線は判定閾値 γ_{pass} を表し, 上部のバーは最終的な採否を示す. 異常区間では NIS が急増し, GNSS 観測が Reject として遮断されていることが分かる. また, NIS が閾値未満であっても, 可用性判定や回復ロックアウトにより遮断となる場合がある. 本研究ではバックエンド最適化への誤拘束注入を最小化するため, このような慎重な判定方針を採用した.

3.5.8 考察

本評価により, 実環境において NLOS 由来の測位異常が疑われる GNSS 観測が発生し得ること, および品質監視により誤拘束の注入を抑制することで地図整合性が改善されることを示した. 一方で, 本環境では NLOS の発生頻度が低く, 統計的な再現実験を行うには追加の長時間収集が必要である. 今後は, 複数ログに対する再現性評価を課題とする.

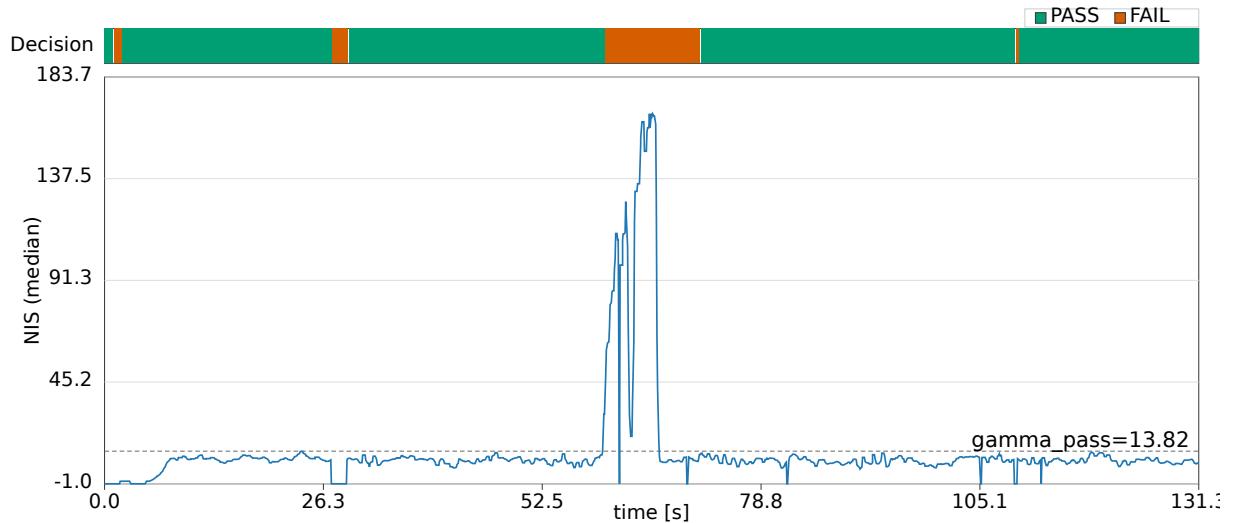


Fig. 3.9 Time history of the median NIS and the acceptance decision on the 2025-10-23 dataset. The dashed line indicates the threshold γ_{pass} . The top bar shows the final PASS/FAIL decision (Accept/Reject). Note that GNSS updates can be rejected even when NIS is below the threshold due to availability checks (e.g., fix quality, auxiliary-data freshness) or recovery lockout, enforcing conservative integrity protection.

第4章 高速分光センシングシステム の構築

本章では、農業ロボットによる植生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。対象とする農業環境（信州大学繊維学部の圃場）では、走行しながら連続的に計測を行うため、分光データの取得は高い時間分解能と安定性が要求される。一方、本研究で使用する浜松ホトニクス製ミニ分光器 C12880MA は、外部クロックに同期して出力が更新されるため、割込み駆動に基づく一般的な取得方式では高周波領域で取得欠落やタイミングずれが生じやすい。そこで本研究では、割込み駆動方式の限界を再現実験により示した上で、タイマを用いて C12880MA の CLK を連続生成し、TRG に同期したハードウェアトリガで ADC 変換を駆動し、DMA により画素列をストリーミング取得するアーキテクチャを設計・実装した。さらに、ST 立下り後のソフトウェア起動遅延を実測により定量化し、有効画素範囲の補正として取り込むことで、5 MHz 級の安定取得を実現した。提案手法は STM32F446RE および STM32H723ZG に実装し、最終的に 5 MHz での連続取得を実証した。Fig. 4.1 に、本研究で使用した小型分光センサ C12880MA を示す。Table 4.1 に、本研究におけるシステム設計上、特に重要な主要仕様を示す。



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 本章で用いる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とし、生育環境の基礎量（温度・湿度・気圧、CO₂濃度）を同時取得できるよう構成した。ユニット全体の構成を Fig. 4.2 に示す。なお、環境量センサを含むユニットの基本構成および計測ロジックは先行研究で確立されており、本章では C12880MA の高速取得に直接関与する要素に焦点を当てる。各センサおよび MCU のインターフェース回路は付録に示す (Fig. B.1, Fig. B.2, Fig. B.3(a), Fig. B.3(b))。

センサユニットの構成要素と主仕様を Table 4.2 に示す。また、開発したセンサユニットの外観を Fig. 4.3 に示す。C12880MA は外部クロックに同期して VIDEO 信号が更新されるラインセンサであり、MCU 側ではトリガ生成とサンプリングタイミングの厳密な同期が必要となる。BME280 および S300L-3V は比較的低速な環境量計測であるが、分光フレームと同一の時刻系で統合することで走行中の計測を可能とする。

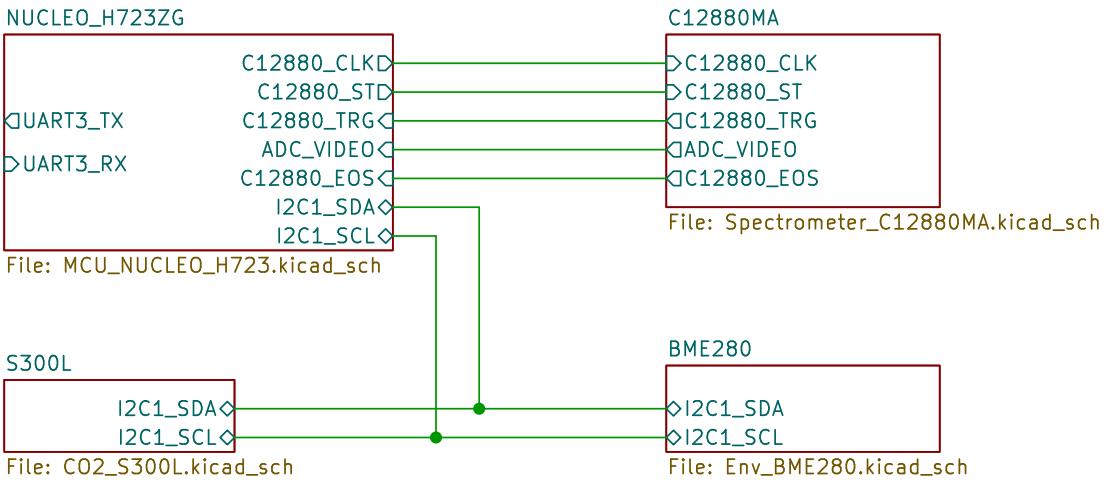


Fig. 4.2 Overall multisensor system architecture

4.2 分光センサ駆動モジュールの開発における従来の課題

C12880MA センサは、入力 ST 信号立下り後に TRG 信号を出力し、所定回数の TRG に同期して VIDEO 信号が有効となる。そのタイミング概要を Fig. 4.5 に示す。従来は、TRG 信号の立ち上がりで割り込みを発生させ、割り込みサービスルーチン（以下、ISR）内で ADC 起動・読出を行う方式が用いられてきた。本研究室の先行研究では、LPC1768 MCU と外部 AD コンバータを用い、この方式で C12880MA から 50 kHz でのデータ取得が報告されている [4]。しかし数 MHz 帯では、 $O(100\text{ ns})$ オーダの周期でイベントが到来するため、ソフトウェア介在の起動遅延が無視できず、ISR 實行時間が主要な性能制約となる。したがって、センサ性能を引き出すにはソフトウェア割込みに依存しないハードウェア同期機構が必要である。

従来方式では、C12880MA が output する TRG 周期ごとに割込みを発生させ、ISR 内で ADC 起動とデータ読出を実行する構成が一般的である。しかし MHz 帯ではイベント周期が 200 ns オーダとなり、割込み遅延および ISR 實行時間のばらつきがサンプリング位相へ直接反映されるため、取得欠落やタイミングずれが顕在化しやすい。そこで本研究では、従来方式（ISR）と提案方式（TIM-ADC-DMA 連鎖）におけるデータパスの差異を図示し、性能制約の発生要因を明確化する。両方式の比較を Fig. 4.4 に示す。

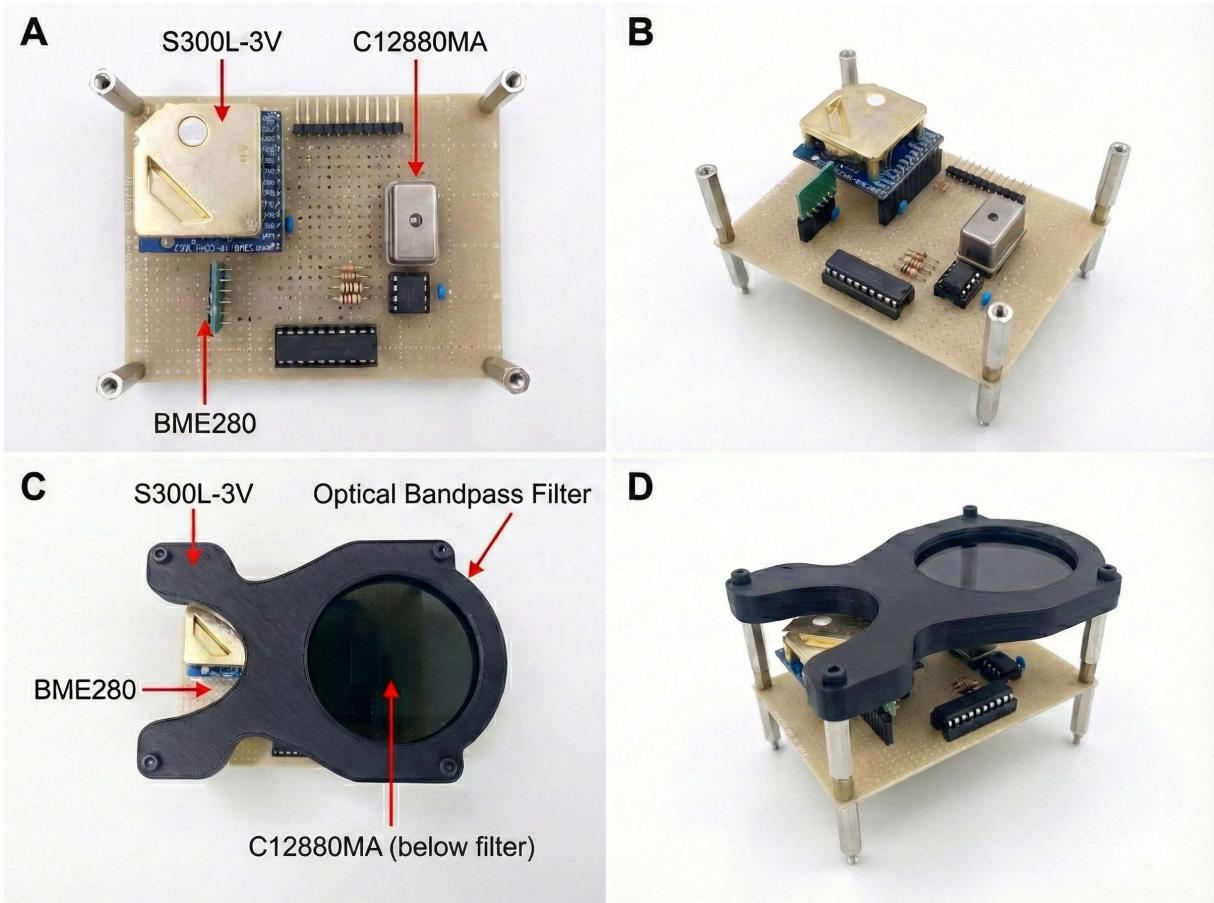


Fig. 4.3 Photographs of the developed sensor unit. (A) Top view of the sensor board integrating the C12880MA, BME280, and S300L-3V. (B) Oblique view showing the component layout. (C) Top view with the optical bandpass filter holder mounted. (D) The fully assembled unit ready for installation.

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，ST 立下り後の第 1 画素を#1 として画素番号を定義する。データシートの読出規則では，#1–#88 は無効画素であり，#89–#376 が有効画素（288 画素）である。一方，実装では ST 立下り後に ADC/DMA をソフトウェアで開始するため起動遅延が生じ，センサ側の#1–#4 に相当するサンプルが取得できないことを実測により確認した。その結果，有効画素開始（センサ側#89）は DMA バッファ上では #85 として観測されるため，本研究では DMA バッファの#85–#372（288 サンプル）を有効分光データとして採用する。なお，EOS 信号は読出終端タイミングの検証に用い，現実装では DMA 転送は固定長 ($N = 387$) で終了する。ここで $N = 387$ は，無効画素区間を含む 1 フレーム分の

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

総サンプル数である.

4.2.1 従来方式の再検証

本研究では、内部 ADC が比較的高速な STM32F446RE を用いて従来方式の制約を再検証した。結果を Table 4.3 に示す。割込みのみでは 25.4 kHz 付近で欠落が発生し、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。以上より、従来方式の主要な性能制約が割込み起動遅延および ISR 処理時間に起因することを確認した。

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、CLK を停止・再開することなく連続供給し、ST 信号により積分区間を定義した上で、ST 立下り後に読出を開始する C12880MA の基本動作に整合する形で取得系を構成した。5 MHz 級の周期イベントに対してソフトウェア割込み処理を介在させると、起動遅延および処理

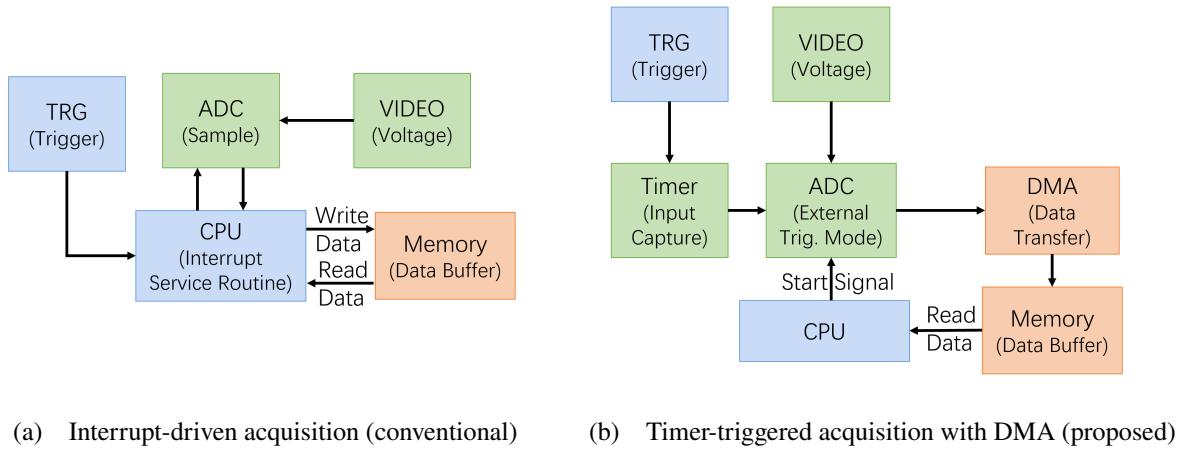


Fig. 4.4 Comparison of acquisition data paths. In the conventional method, the CPU handles every TRG event in an ISR, which becomes the bottleneck at MHz rates. In the proposed method, the TRG edge is captured by a timer and directly drives ADC conversion via an external trigger, while DMA streams samples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

時間ばらつきが不可避となるため、本研究では TRG 同期のハードウェアトリガを用いて ADC 変換を駆動し、DMA により画素列をストリーミング転送することで、サンプリング位相の決定性を確保する。

4.3.1 フレーム取得シーケンス

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} を保持する。 (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 転送完了コールバック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、高周波領域においても各サンプルの時刻は TRG により規定され、CPU 介在はフレーム境界に限定される。

4.3.2 TIM-ADC-DMA の連携機構

Fig. 4.5 に示すように、C12880MA は CLK に同期して TRG を生成する。本研究では、汎用タイマ (TIM2) の PWM 出力により CLK を生成し、別タイマ (TIM15) で TRG エッジを取り込み、そのイベントを ADC の外部トリガとして用いる。ADC は外部トリガ入力により変換を開始し、変換結果は DMA によりメモリへ逐次転送されるため、TRG 周期に同期した一様なサンプリングが CPU の介在なしに実行される。

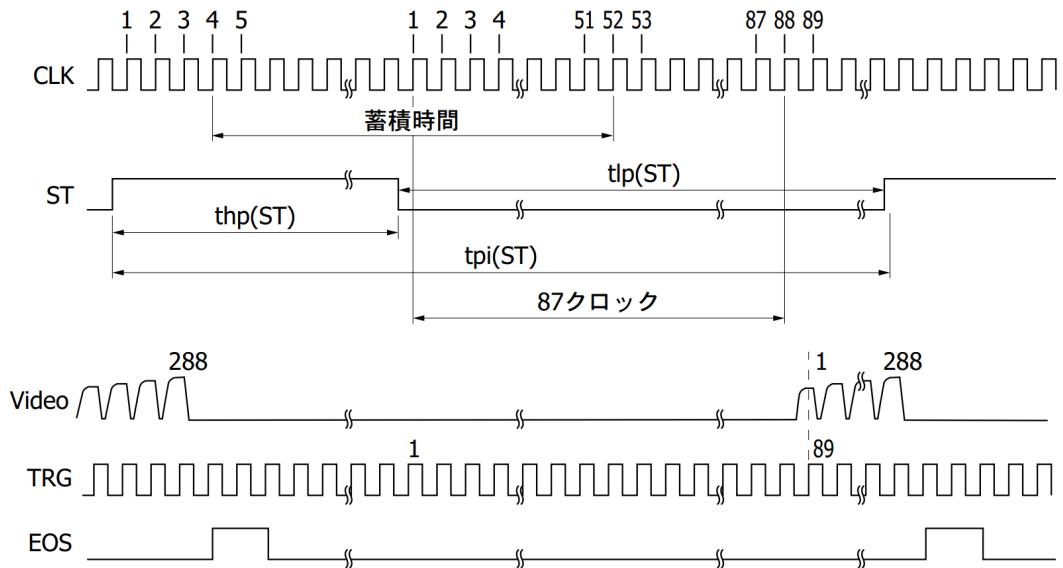


Fig. 4.5 Timing diagram of the C12880MA: excerpted from the datasheet[17]

4.3.3 ST 立下り後の開始遅延と有効画素範囲の補正

C12880MA のデータシートでは、ST 立下り後の所定回数の TRG を経て VIDEO が有効化される。一方、本実装では ST 立下り後に ADC/DMA を開始するため、ST 遷移から DMA 開始までのソフトウェア起動遅延が、画素列上の開始位置に固定オフセットとして現れる。

本研究環境では、このオフセットは TRG 周期換算で約 4 画素分に相当することが実測により一貫して確認された。そのため、DMA バッファ上で有効画素が安定して出現する位置は理論値(89 番目)ではなく、およそ 85 番目付近となる。本研究ではこの挙動を系統的な固定遅延として扱い、先頭 85 画素を無効画素として除外することで、有効スペクトルデータを安定に抽出した。

4.4 実装

本節では、提案アーキテクチャを MCU 上で安定動作させるための実装要点を述べる。

4.4.1 ハードウェアトリガ連鎖

ADC は外部トリガ入力により変換を開始し、変換結果を DMA でメモリへ連続転送する。本システムでは、TIM2 の PWM により C12880MA へ CLK を供給し、TRG は TIM15 でエッジ同期イベントとして取得した上で、ADC 外部トリガへ接続する。このとき、ADC の変換開始は

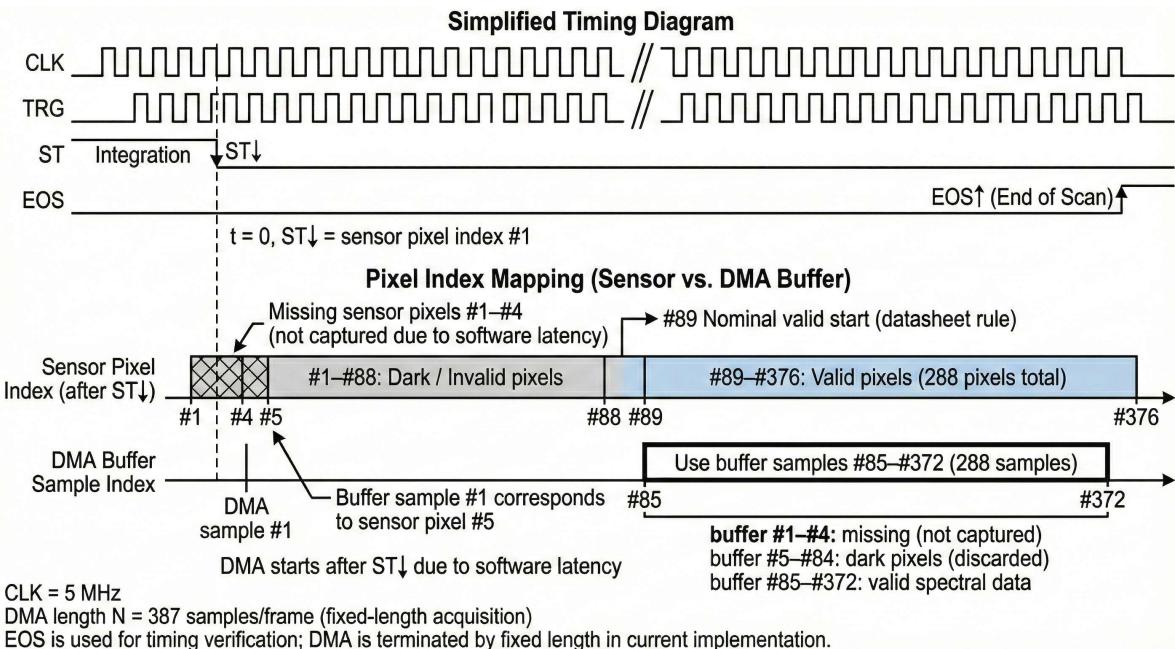


Fig. 4.6 C12880MA readout rule and pixel index mapping between sensor-side definition and DMA buffer in this work. The sensor pixel index is defined from the falling edge of ST ($t = 0$), where pixels #1–#88 are dark/invalid and pixels #89–#376 are valid (288 pixels). Due to software start latency, sensor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

TRG エッジにより駆動されるため、CPU が周期ごとに ADC を起動する必要がなく、5 MHz 級の高頻度でもサンプリング位相の決定性を維持できる。

また、DMA は各変換結果を逐次バッファへ転送し、フレーム終端は DMA 転送完了で検知する。これにより、CPU 介在はフレーム境界に限定され、周期イベントごとの ISR 負荷が性能制約となる問題を本質的に回避できる。

4.4.2 STM32H7 におけるキャッシュ整合性対策

STM32H7 シリーズではデータキャッシュにより DMA 転送データの可視性が損なわれる場合がある。本研究では DMA 転送先バッファを DTCM (Data Tightly Coupled Memory) 領域へ配置し、キャッシュの影響を受けないメモリによりデータ整合性を確保した。

4.5 性能検証

本節では、提案アーキテクチャが高速取得を実現していることを、(i) 信号タイミングの実測、(ii) 連続取得時のデータ完全性、(iii) スペクトルの再現性、の 3 観点から検証する。なお、本実験に用いた STM32 NUCLEO-H723ZG 開発ボードとセンサユニットの接続インターフェース詳細については付録を参照する。

4.5.1 STM32F446RE でのアーキテクチャ検証

従来方式では 130 kHz が限界であった STM32F446RE に提案アーキテクチャを実装したところ、0.5 MHz および 1 MHz での安定取得を確認した。これにより、従来方式の主要制約が割込み起動遅延に起因していたこと、および提案アーキテクチャがその解消に有効であることが示された。なお、本 MCU に搭載される ADC の仕様により、達成可能な最大周波数は理論上 1.5 MHz 程度に制限される。

4.5.2 STM32H723ZG での 5 MHz 高速取得

最大 5 MHz 級のサンプリングを実現するため、STM32H723ZG に同アーキテクチャを実装した。前述のキャッシュ・コヒーレンシ対策として DMA バッファを DTCM へ配置し、ADC のハードウェアキャリブレーションおよびトリガ設定を最適化した。その結果、5 MHz での連続取得に成功した。

4.5.3 オシロスコープによる 5 MHz 動作確認

Fig. 4.7 に、5 MHz 動作時のオシロスコープ画面を示す。CH1 を TRG 信号、CH2 を CLK 信号、CH4 を VIDEO 信号、CH3 を EOS 信号とする。なおスクリーンショットでは TRG および CLK の振幅が実際より小さく表示されているが、これはプローブ減衰設定とスケール設定の不整合に起因する表示上の問題であり、本図は主としてタイミング関係の確認に用いる。強光照射時と遮光時を比較すると、EOS 近傍で VIDEO 出力が停止する挙動が確認できる。

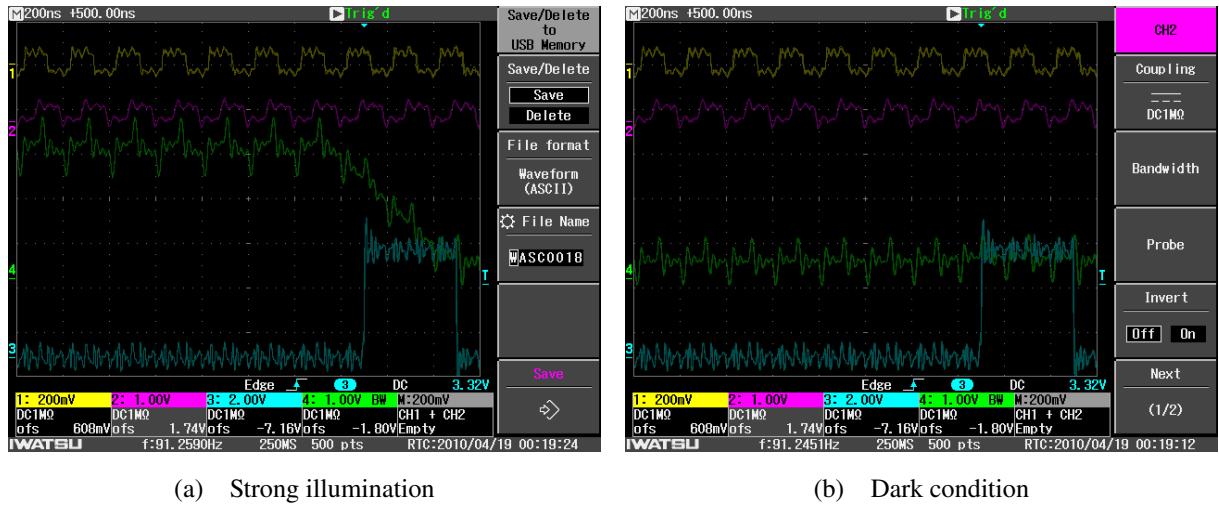


Fig. 4.7 Oscilloscope screenshots of the End-of-Scan (EOS) timing at 5 MHz. (a) Under strong illumination, VIDEO (green) drops before EOS (blue) rises. (b) In dark condition. Note: Yellow: TRG, Magenta: CLK. The displayed amplitudes of CLK/TRG are compressed due to probe scaling, but the timing relationship is preserved.

4.5.4 CSVに基づくEOS／ST／VIDEO波形の再構成

オシロスコープから保存した CSV データを用い、制御信号 (EOS, ST) と出力信号 (VIDEO) の関係を再描画した。

まず、Fig. 4.8 に EOS と VIDEO の同時波形を示す。強光照射時 ((a)) と遮光時 ((b)) のいずれにおいても、EOS 信号の立ち上がりエッジに同期して VIDEO 出力が停止（ベースラインへ復帰）しており、ゲートロジックによる読出停止が機能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) の遮光条件ではベースラインノイズのみが観測され、同 (b) の自然光下では光源のスペクトルピークが明瞭に捉えられている。また、光源距離を変化させた同 (c) (5 cm, 強光相当) および同 (d) (25 cm, 弱光相当) を比較すると、光量に応じて VIDEO 信号の振幅が適切に変化しており、本システムが広いダイナミックレンジで線形応答性を維持していることが確認された。

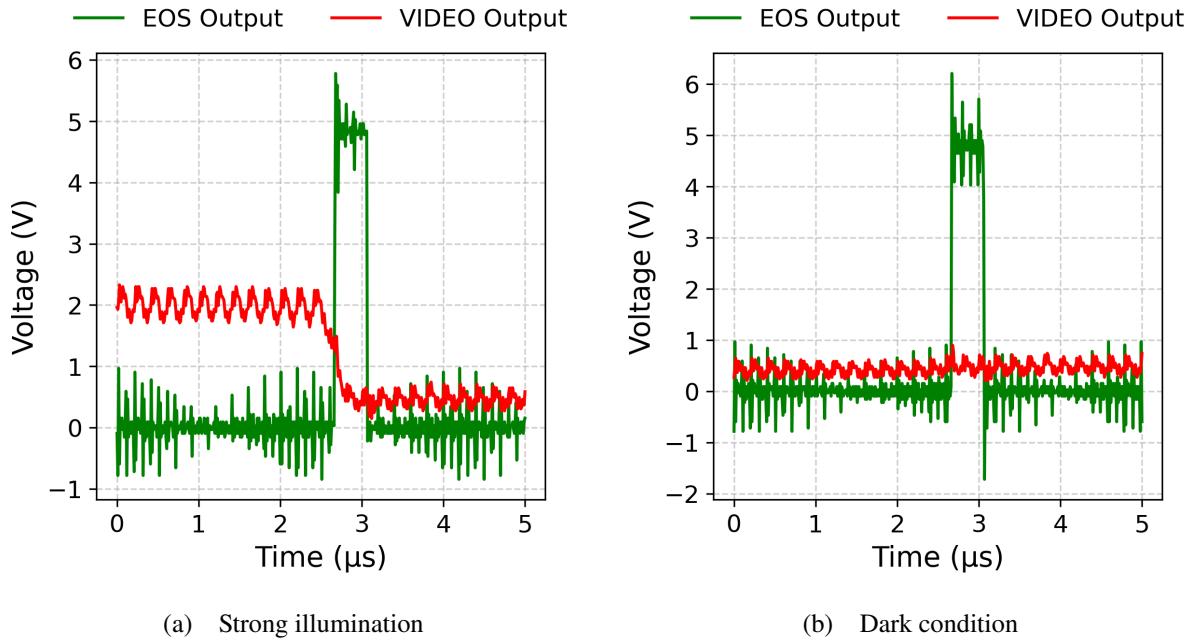


Fig. 4.8 Replotted waveforms from CSV (EOS and VIDEO) at 5 MHz. (a) Under strong illumination. (b) Under dark condition. In both cases, the VIDEO output (red) becomes inactive precisely at the rising edge of the EOS event (green), verifying the readout termination logic.

4.5.5 サンプリングレート成立性の検討

センサに供給するクロックが 5MHz であるため、更新周期は

$$T_{\text{period}} = \frac{1}{5 \text{ MHz}} = 200 \text{ ns}$$

となる。データシートによれば VIDEO 信号が安定しているのは TRG 信号の立上りエッジを中心とした半周期程度であるため、サンプリング可能時間幅は概ね 100 ns となる。本研究ではサンプリング時間 2.5 サイクル、変換時間 12.5 サイクル (12-bit) とし合計 15 サイクルを要するため、必要な ADC クロック周波数 f_{ADCK} は

$$f_{\text{ADCK}} > \frac{15}{200 \text{ ns}} = 75 \text{ MHz} \quad (4.1)$$

となる。STM32H723ZG のデータシートにおいて 12-bit ADC の最大クロック周波数が 75 MHz と規定されていることから、設定が理論上成立する。実測により本条件で安定動作することを確認した。

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)

4.6 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 を併用した。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周辺制御（I²C 設定、割込み・DMA 設定、タイマによる周期実行）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。

4.7 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、割込み駆動方式の制約を再現的に示した上で、連続 CLK 下での ST 制御と TRG 同期ハードウェアトリガに基づく ADC/DMA ストリミング取得を構築した。さらに、ST 立下り後の ADC/DMA 開始に伴う画素レベルの開始オフセットを実測により定量化し、有効画素範囲の補正として取り込むことで、高速取得時のスペクトル整合性を確保した。STM32H723ZG に実装し、5 MHz での安定取得をオシロスコープおよび CSV 再描画により検証した。次章では、本センサユニットにより取得したデータを用いた環境マッピングおよび統合評価について述べる。

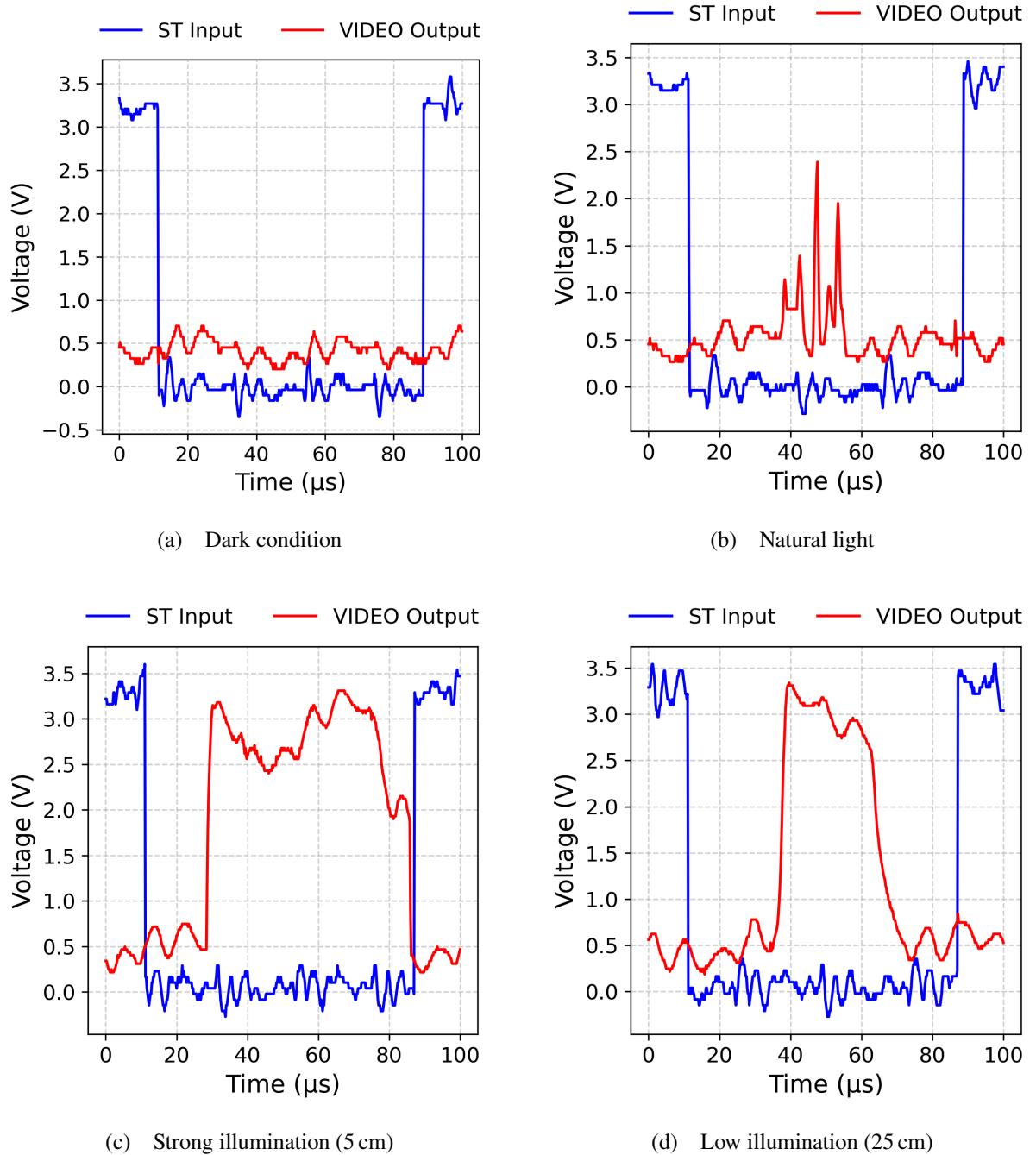


Fig. 4.9 ST and VIDEO signal waveforms under different lighting and distance conditions. (a) Dark condition showing baseline noise. (b) Natural light showing spectral peaks. (c) High intensity at 5 cm distance (equivalent to strong illumination). (d) Low intensity at 25 cm distance. The results confirm the system's ability to capture spectral features and its dynamic response to varying light intensities.

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空間マッピングを行う。

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、データ取得時点では自律走行アルゴリズムを検証中である。そのため、本章で報告する実験は手動操作により AGV を走行させてデータを取得した。本実験では、GNSS/LiDAR に基づく自己位置推定系列を基準時刻系として、非同期な環境センサ観測を補間・同期し、同一の走行ログとして統合した上で空間マップを生成する。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。

- データの同期:** センサユニットから取得された環境データ（分光スペクトル、CO₂、温湿度、気圧）に対し、タイムスタンプに基づいて最も近い自己位置（GNSS/LiDAR オドメトリ）を割り当てる。
- 正規化:** 本章のマップは微細な空間変動を視認しやすくすることを目的として、取得データの範囲に基づきカラーマップの表示レンジを調整する。ただし、これは視認性向上のための処理であり、絶対値の厳密比較は各センサの出力値に基づく。
- 配置と可視化:** 2次元平面（XY 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畠表示する。

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。温湿度などのスカラー観測と異なり、スペクトルは高次元であるため、本研究では以下の三段階の処理を通じて環境マップへの変換を行った。すなわち、(1) 前処理、(2) 特徴量の抽出、(3) 位置情報との対応付けである。

まず、暗電流成分およびオフセットの影響を低減するため、基線補正および平滑化処理を行った後、L1 正規化により照度変動の影響を抑えた正規化スペクトル s_i を得る。次に、植生と非植生の反射特性の違いを表す指標として、以下の特徴量を算出した。(i) NIR 帯域と Red 帯域の正規化差分 (ND)，(ii) スペクトル質心 λ_c ，(iii) 赤縁位置 λ_{RE} (スペクトル一次微分が最大となる波長)，(iv) 参照植生スペクトル s_{ref} に対するスペクトル角 θ (Spectral Angle Mapper, SAM) である。これらの特徴量は、取得時刻に最も近い自己位置 $p(t_i)$ に対応付けることで、走行軌跡上に配置し、空間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

Fig. 5.5 に、288 点分光データから算出した各特徴量の空間マップを示す。ND および赤縁位置は植生の反射特性に対応する指標であり、空間分布上において、植生と非植生を含む領域の違いが一定程度確認できる。

SAM およびスペクトル質心は、分光スペクトル形状の類似度や全体的な変化を表す補助的な指標として用いた。なお、ピーク波長マップ (Fig. 5.6) は探索的な可視化として位置付け、複数の特徴量を併用することで、分光情報の空間的傾向を把握することとした。

5.2.3 微気象データの安定性と環境勾配

環境センサ（温度・湿度・CO₂・気圧）のマッピング結果 (Fig. 5.1–5.4) について考察する。本実験は通気性の高い開放型ハウスで実施されたため、ハウス内外での環境差は極めて小さい条件下であった。それでもかかわらず、空間投影により以下の環境特性が確認できた。

- **温度と湿度の逆相関:** Fig. 5.1 (温度) と Fig. 5.2 (湿度) を比較すると、温度が高いエリアでは湿度が相対的に低く、温度が低いエリアでは湿度が高いという、逆相関の傾向が見られる。

- **CO₂ 濃度の空間勾配:** Fig. 5.3 に示すように、CO₂ 濃度は概ね 400–510 ppm の範囲で推移した。特に、図の上部ループ付近（ハウス奥側）において濃度が高まる傾向が見られる。

以上より、提案システムは自己位置推定と環境センサデータを統合し、圃場内の空間的な環境マップを生成できることが確認された。本章のデータは手動走行により取得したが、同一の処理系は自律走行時にも適用可能であり、走行しながら環境モニタリングを行えることを示唆する。

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セット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。

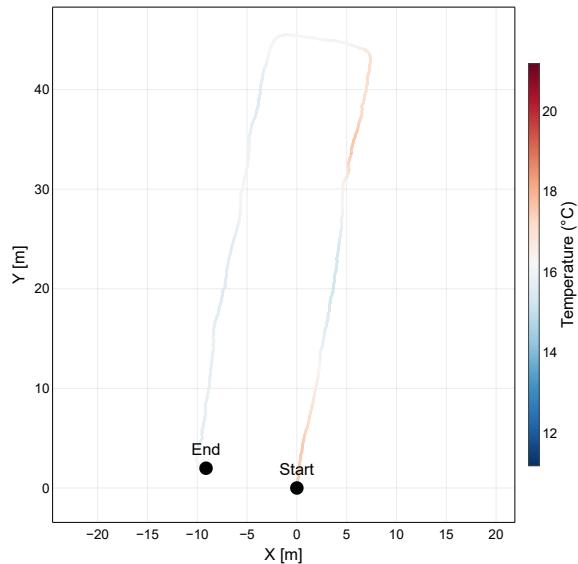


Fig. 5.1 Temperature map (°C).

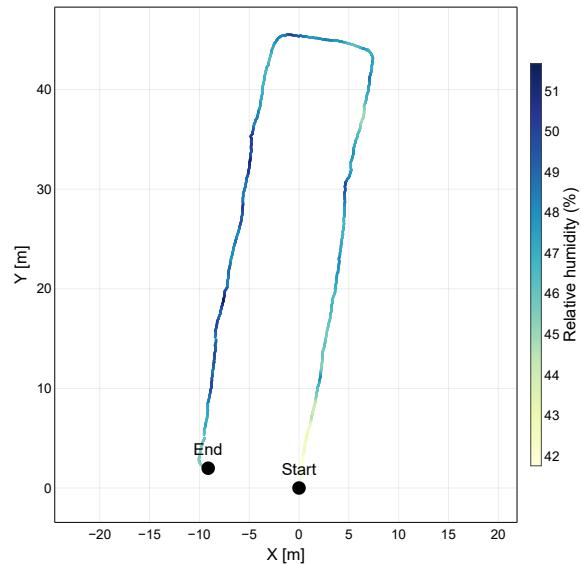


Fig. 5.2 Relative humidity map (%).

5.4 考察

本章では、走行しながら取得された環境センサデータを自己位置推定結果へ同期し、圃場内の空間分布として可視化できることを示した。特に分光データに対しては、288次元スペクトルを正規化した上で、植生に関連する特徴量および類似度指標を用いて空間マップへ反映することで、生育環境マッピングが可能であることを確認した。今後は、自律走行系と統合した長時間計測や、安定化を行い、定量評価を拡充する予定である。

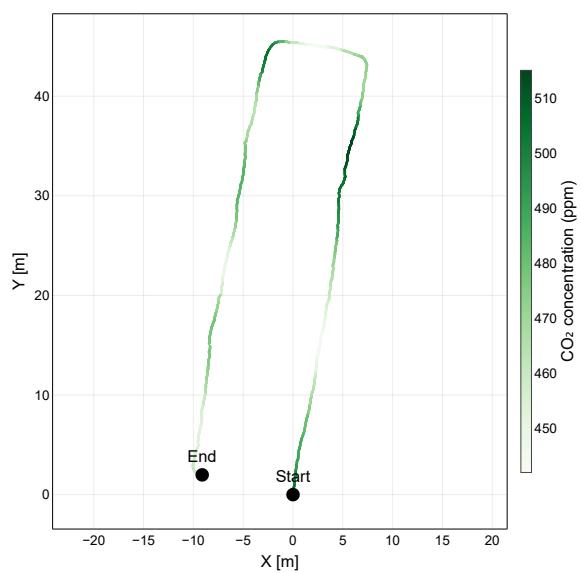


Fig. 5.3 CO₂ concentration map (ppm).

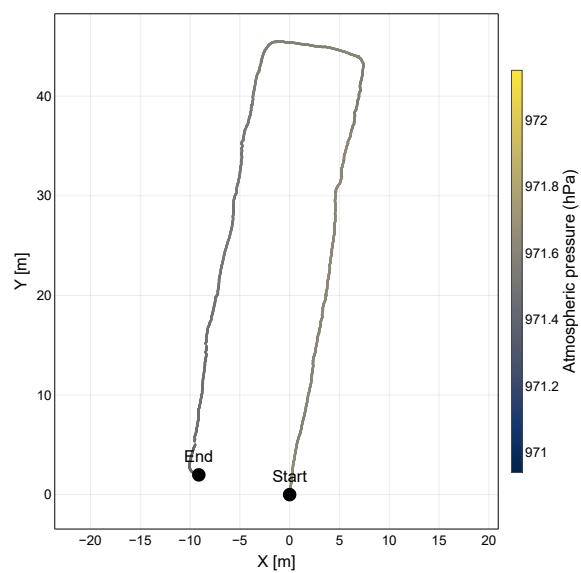


Fig. 5.4 Atmospheric pressure map (hPa).

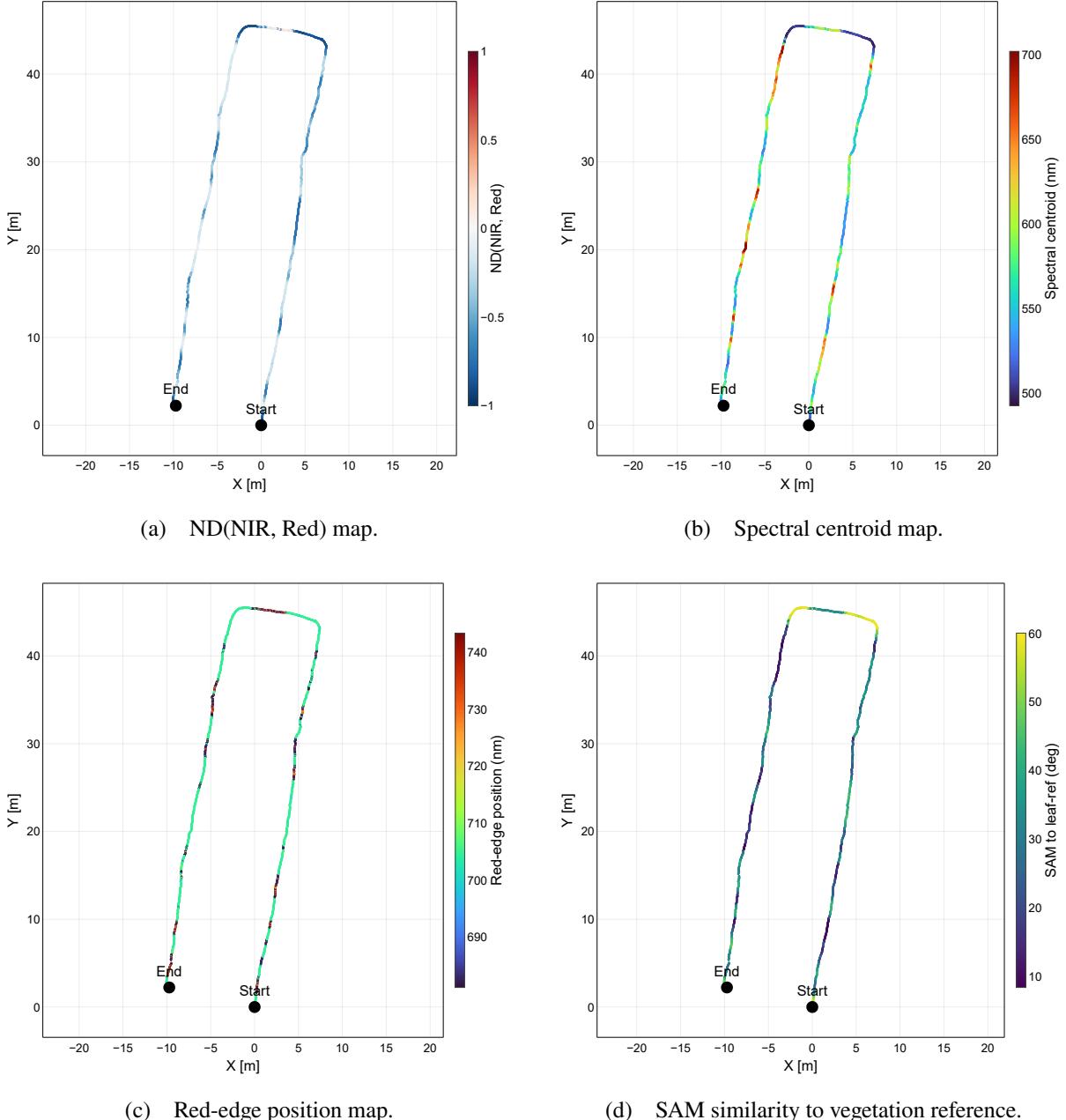


Fig. 5.5 Spatial maps of spectral features extracted from 288-band measurements. Normalized spectral features enable robust comparison under illumination changes and provide interpretable indicators for vegetation/non-vegetation discrimination along the trajectory.

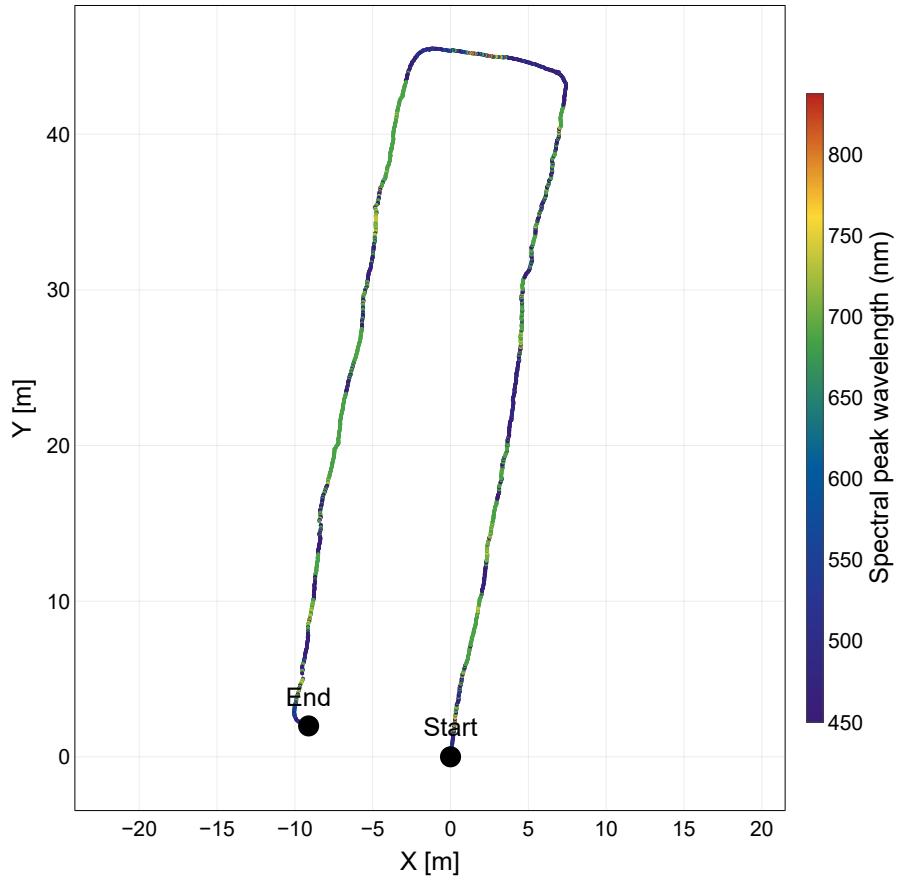


Fig. 5.6 Spectral peak wavelength map (nm) as an exploratory visualization. Frequent color changes along the trajectory indicate spectral variability caused by material differences and illumination conditions.

第6章 結言

6.1 本研究のまとめ

本研究では、農業用ハウス環境における巡回計測を想定し、GNSS測位品質が時間的に変動する条件下での自己位置推定の安定化と、高速分光センシングを用いた生育環境情報の空間可視化について検討を行った。

まず、農業用ハウス環境におけるRTK-GNSSの挙動を整理し、多くの時間帯では高精度な測位が得られる一方で、遮蔽やマルチパスに起因するNLOSの影響により、受信機状態量が良好である場合でも測位誤差が発生し得ることを、実環境データに基づいて確認した。このような外れ値がバックエンドの地図最適化処理に入力されることで、地図整合性が損なわれる可能性がある点を課題として明確化した。

次に、上記課題に対する対処方策として、LIOを短時間の参照とした増分整合性に基づくGNSS品質監視手法を構築した。本手法は、GNSS観測をバックエンドの因子グラフ最適化に直接入力するのではなく、事前に拘束の採否を判定する構成を採用している。実環境で取得した走行ログを用いた解析により、NLOSの影響が疑われる区間においてGNSS拘束を抑制することで、従来の手法と比較して地図の大きな歪みを回避できることを確認した。ただし、本研究では検証例が限定的であり、手法の一般性や定量的な性能評価については今後の検討課題である。

また、生育環境センシングの高密度化を目的として、小型分光センサC12880MAを対象とした高速駆動方式を検討した。割込み駆動方式の制約を整理した上で、ハードウェアトリガに同期したADC/DMAストリーミング取得方式を実装し、STM32H723ZG上において5MHzの連続取得が可能であることを実験により確認した。さらに、ST信号立下り後の遅延に起因する画素ずれを考慮した有効画素範囲の補正を導入することで、高速取得時におけるスペクトルデータの整合性を確保した。

加えて、上記の自己位置推定系およびセンシング系を統合し、温度・湿度・CO₂濃度・気圧、ならびに分光データに基づく特徴量を空間情報と対応付けて可視化する処理系を構築した。これにより、巡回計測によって取得される環境情報を位置情報と関連付けて整理できることを示した。

なお、本研究では自律走行フレームワークとして3D-LiDARによるナビゲーションシステム

を導入し、ノード構成および経路追従機能について、研究室内環境において基本的な動作確認を行った。しかし、圃場環境における自律走行実験については、時間的制約のため十分な検証には至っておらず、本研究では巡回計測システムとしての実装可能性を示すに留まっている。

以上より、本研究は、農業用ハウス環境における GNSS 劣化の影響を考慮した自己位置推定および環境センシング統合システムについて、基礎的な設計と実装、ならびに限定的な実データに基づく検討を行ったものである。特に、見かけ上良好な GNSS 観測に混入し得る NLOS 外れ値に対し、バックエンド最適化への誤拘束注入を抑制するための実装指針を与えた点に意義がある。

6.2 今後の課題

今後の課題として、まず、本研究では外部基準軌跡を用いた厳密な誤差評価が行えていないため、今後は既知基準点や測量データを用いた比較評価により、検出性能や誤判定率を定量的に評価する必要がある。

また、本研究で用いた増分整合性に基づく判定手法についても、LiDAR の幾何縮退や IMU 異常といった他の誤差要因を考慮した拡張が今後の課題である。複数の外れ値要因を統合的に扱うことでの、実環境における信頼性向上が期待される。

さらに、ナビゲーションシステムを含む自律走行系と完全に統合した長時間巡回実験を実環境で実施し、環境変化を含めた運用時の挙動を検証することが必要である。これにより、本研究で構築した巡回計測基盤の実運用に向けた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] 秀. 田中. 半構造化環境を利用したロボットの自律的環境モデル構築とタスクプランニング. 科学研究費助成事業(若手研究(B)), 課題番号 22700208. 産業技術総合研究所, 2013. URL: <https://kaken.nii.ac.jp/file/KAKENHI-PROJECT-22700208/22700208seika.pdf>.
- [4] 小. 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.
- [5] 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.
- [6] J. Zhang and S. Singh. LOAM: Lidar Odometry and Mapping in Real-time. *Robotics: Science and Systems* 2.9 (2014).
- [7] T. Shan and B. Englot. LeGO-LOAM: Lightweight and Ground-Optimized Lidar Odometry and Mapping on Variable Terrain. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. 2018, pp. 4758–4765.
- [8] 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.
- [9] W. Xu and Y. Cai. FAST-LIO2: Fast Direct LiDAR-inertial Odometry. *IEEE Transactions on Robotics* 38.4 (2022), pp. 2053–2073.
- [10] 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.

- [11] M. Li et al. Multi-sensor Fusion for Agricultural Robot Localization: A Review. *Computers and Electronics in Agriculture* 170 (2020).
- [12] W. Wen et al. DeepPCO: End-to-End GNSS/LiDAR Fusion for Robust Urban Localization. arXiv preprint arXiv:2212.05477 (2022).
- [13] 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.
- [14] P. Ray. A Review of Smart Greenhouse Farming by Using Sensor Network Technology. *IEEE Internet of Things Journal* 4.5 (2017).
- [15] C. Tim et al. A Small Flying IoT Node for Real-Time Spectral Monitoring in Smart Agriculture. *IEEE Internet of Things Journal* (2023).
- [16] H. P. K.K. Evaluation circuit for mini-spectrometer C13016 Datasheet. <https://www.hamamatsu.com/jp/en/product/optical-sensors/spectrometers/mini-spectrometer/C13016.html>. (Accessed on 2026).
- [17] 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).
- [18] 信州上小森林組合. RTK 基準局公開情報. <http://jforest.jp/rtkkijunkyouku.html>. Accessed: 2026-01-19. 2025.
- [19] 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>.
- [20] M. Labbé 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>.
- [21] S. Macenski, F. Martin, R. White, and J. Ginés Clavero. The Marathon 2: A Navigation System. *2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. 2020.
- [22] 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>.

[23] C. F. F. Karney. *GeographicLib*. Version 2.7. 2025. URL: <https://geographiclib.sourceforge.io/C++/2.7>.

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

A.1 STM32 NUCLEO-H723ZG 開発ボード

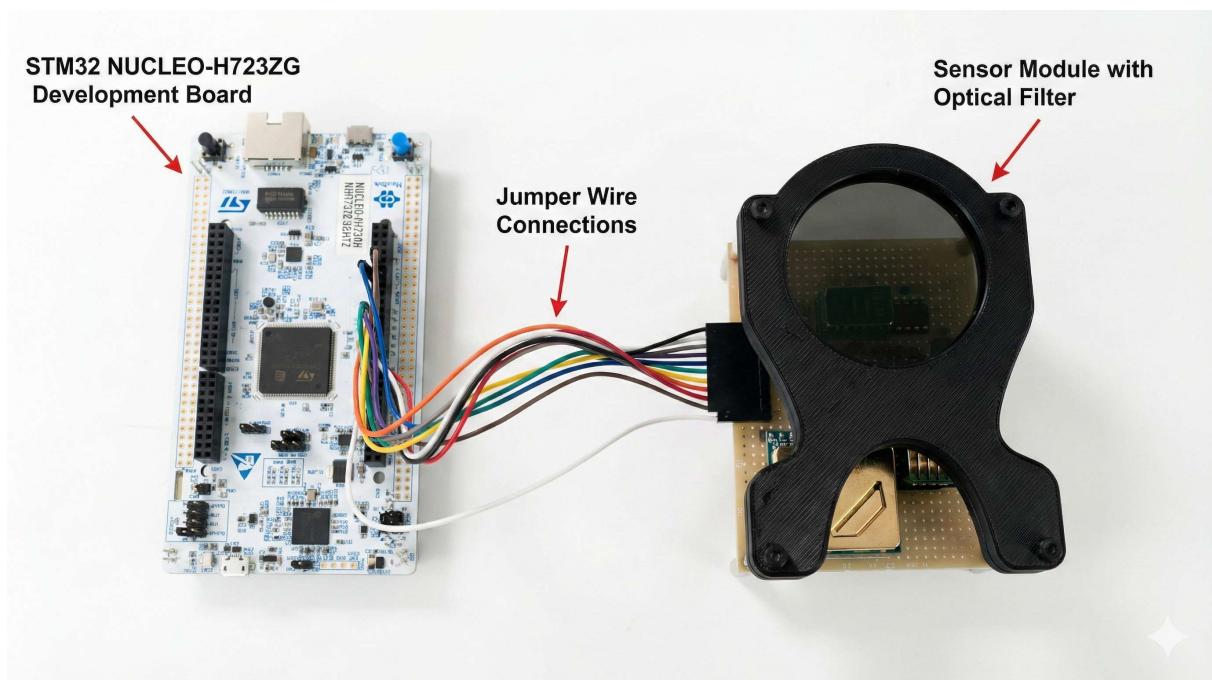


Fig. A.1 Experimental setup for high-speed spectral acquisition. An STM32 NUCLEO-H723ZG development board is connected to the sensor module with an optical bandpass filter via jumper wires for power and signal interfaces.[24]

A.2 BME280

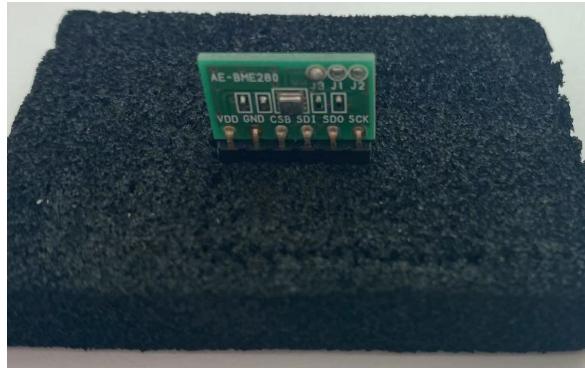


Fig. A.2 Environmental sensor (BME280) used in this study.[25]

Table A.1 Environmental sensor (BME280) used in this study.[25]

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

A.3 S300L-3V CO₂ センサ



Fig. A.3 S300L-3V CO₂ sensor used in this study.[26]

Table A.2 S300L-3V CO₂ sensor used in this study.[26]

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

A.4 u-blox ZED-F9P RTK-GNSS 受信機

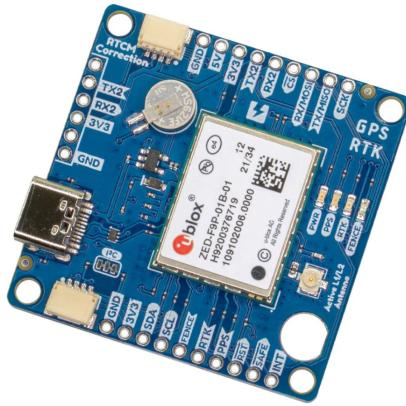


Fig. A.4 RTK-GNSS receiver (u-blox ZED-F9P) used in this study.[27]

Table A.3 RTK-GNSS receiver (u-blox ZED-F9P) used in this study.[27]

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

A.5 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.[28]

Table A.4 RTK-GNSS antenna (u-blox ANN-MB-00) used in this study.[28]

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

A.6 Livox MID-360 3D-LiDAR

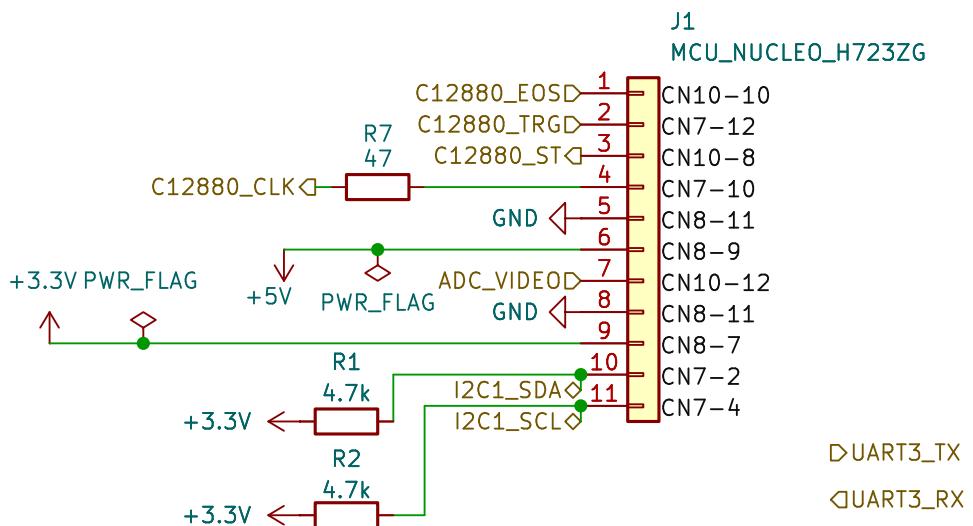


Fig. A.6 LiDAR sensor (Livox MID-360) used in this study.[29]

Table A.5 LiDAR sensor (Livox MID-360) used in this study.[29]

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

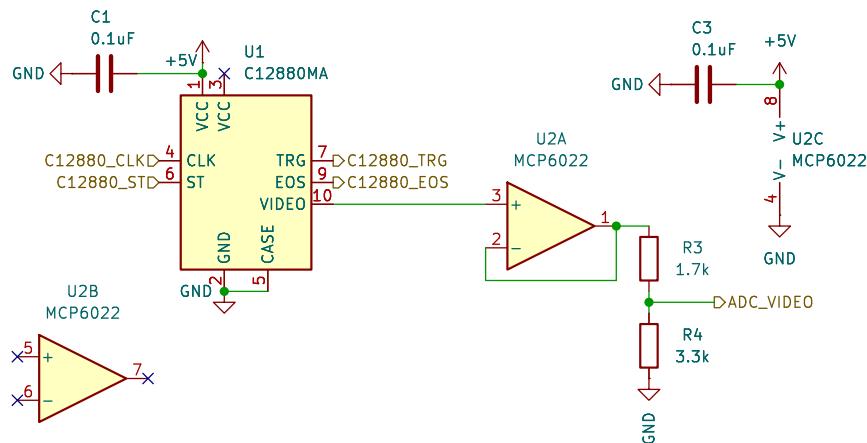
付録 B インタフェース回路



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.

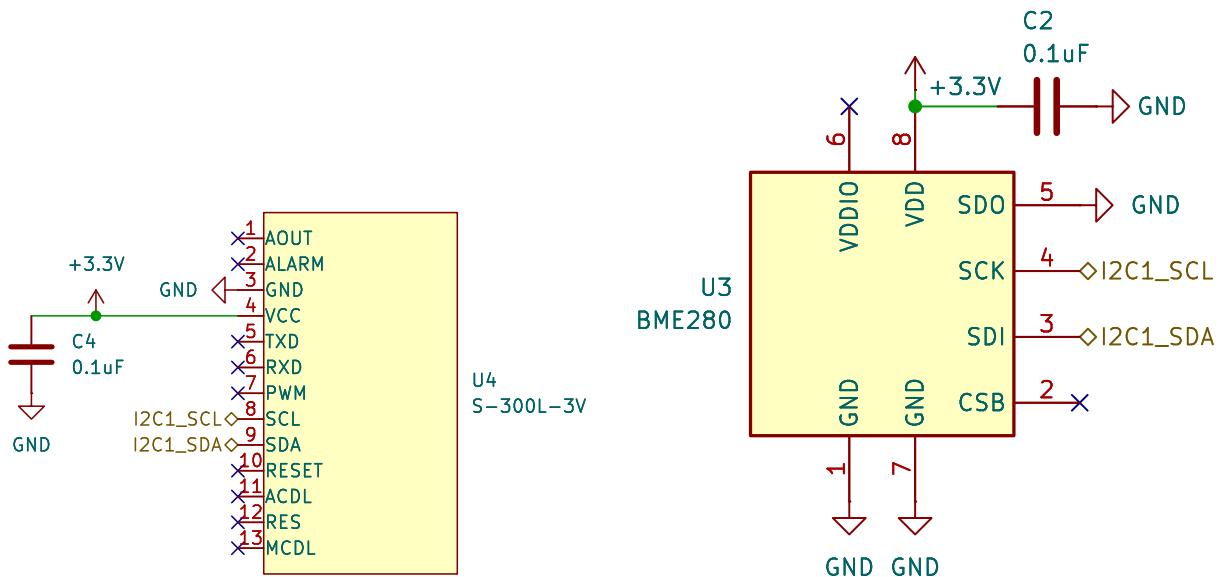
- Power source (USB mode):
- +5V_USB: USB VBUS from on-board ST-LINK (Micro-USB), provided on CN8 5V pin (output).
 - +3V3: Generated by the NUCLEO on-board regulator, provided on CN8 3V3 pin (output).

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 付録参考文献

- [24] STMicroelectronics. stm32h723zg datasheet. <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32h723zg.pdf>. (Accessed on 10/9/2025).
- [25] BOSCH. BME280 Environmental Sensor Datasheet. <https://www.bosch-sensortec.com/media/boschsensortec/downloads/datasheets/bst-bme280-ds002.pdf>. (Accessed on 10/9/2025).
- [26] 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).
- [27] 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).
- [28] 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).
- [29] 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).