

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	1
1.3	本研究の目的	2
1.4	本論文の構成要素	2
第 2 章	関連研究と本研究の位置づけ	3
2.1	圃場巡回システム	3
2.2	農業環境における自己位置推定	3
2.2.1	LiDAR を用いた自己位置推定	3
2.2.2	GNSS/INS/LiDAR のセンサフュージョン	4
2.3	農業用生育環境センシングセンサと分光計測	4
2.3.1	小型分光センサの農業利用	4
2.3.2	浜松ホトニクス社製評価基板の課題	5
2.4	本研究の位置づけと新規性	5
第 3 章	GNSS 品質監視に基づくロバストな自己位置推定	7
3.1	システム構成	7
3.1.1	移動ロボットプラットフォームと搭載センサ	8
3.1.2	ソフトウェアアーキテクチャ	8
3.2	農業環境における課題と故障モード	10
3.3	提案手法：GNSS 品質監視モジュールの設計	11
3.3.1	入出力と二値ポリシー	12
3.3.2	可用性スクリーニング	12
3.3.3	完全性監視：短時間増分整合性に基づく遮断判定	13
3.3.4	NLOS 外れ値発生直後の 1 サンプル注入を防ぐ設計	13
3.4	WGS84 から局所 ENU への変換	14

3.5	実験と評価 ······	15
3.5.1	実験環境とデータ収集 ······	15
3.5.2	評価対象ログと NLOS 起因の測位逸脱の観測 ······	16
3.5.3	比較手法 ······	16
3.5.4	評価観点 ······	16
3.5.5	実環境評価結果 ······	17
3.5.6	NLOS 疑い区間における挙動の詳細 ······	17
3.5.7	品質監視の時間応答 ······	17
3.5.8	考察 ······	17
第 4 章	高速分光センシングシステムの構築 ······	23
4.1	本章で用いるセンサユニットの概要 ······	23
4.1.1	構成要素と主仕様 ······	23
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 ······	24
4.2.1	従来方式の再検証 ······	25
4.3	提案手法：連続 CLK 下での ST 制御と TRG 同期ハードウェア取得 ······	26
4.3.1	フレーム取得シーケンス (ST 制御と DMA ストリーミング) ······	27
4.3.2	TIM-ADC-DMA の連携機構 ······	27
4.3.3	ST 立下り後の開始遅延と有効画素ウィンドウ補正 ······	28
4.3.4	割り込み負荷を伴うシステムへの拡張 (論理ゲートによる完全同期) ···	29
4.4	実装要点 ······	29
4.4.1	ハードウェアトリガ連鎖 (Timer-ADC-DMA) ······	29
4.4.2	STM32H7 系列におけるキャッシュ・コヒーレンシ対策 ······	30
4.5	性能検証 ······	30
4.5.1	STM32F446RE でのアーキテクチャ検証 ······	30
4.5.2	STM32H723ZG での 5 MHz 高速取得 ······	30
4.5.3	オシロスコープのスクリーンショットによる 5 MHz 動作確認 ······	31
4.5.4	CSV ファイルから再描画した EOS 信号, ST 信号および VIDEO 信号の波形	31
4.5.5	サンプリングレート成立性の検討 (ADC 仕様に基づく) ······	32
4.6	その他センサのデータ取得と統合 ······	33
4.7	まとめ ······	33
第 5 章	生育環境マッピング ······	36

5.1	マッピング手法と実験条件	36
5.2	データの同期と空間投影	36
5.2.1	分光スペクトル（288 次元）の特徴抽出と空間マッピング	37
5.2.2	スペクトル特徴による植生・非植生の識別可能性	37
5.2.3	微気象データの安定性と環境勾配	37
5.3	生成された生育環境マップ	38
5.4	考察	39
第 6 章	結言	42
6.1	本研究の成果	42
6.2	今後の課題と展望	42
参考文献		43
謝辞		45
付録 A	インターフェース回路	46

第1章 緒言

1.1 研究背景

日本の農業分野では、基幹的農業従事者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 [1, 2]。実際に、平成 27 年から令和 5 年にかけて基幹的農業従事者数は 175.7 万人から 116.4 万人へ減少しており、高齢層の比率増加と平均年齢の上昇も報告されている [2]。この課題に対し、農業現場で取得される各種データの利活用を通じた生産性向上・省力化の推進が政策的に進められている [3]。

近年は、土壤・気象・生育・作業履歴などの農業データを継続的に収集し、圃場状態を定量的に把握するデータ駆動型の営農が注目されている。これを実現するうえで、広大な圃場を自律的に巡回し、人手に頼らずモニタリングを行う自律移動ロボット（Automatic Guided Vehicle, 以下 AGV）による圃場巡回モニタリングは有力な手段である。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。

1.2 農業環境における課題

自律移動ロボットの実用化において、農業用ビニールハウスのような環境は、一般的な屋外環境や屋内環境とは異なる独自の課題を有する半構造化環境 [4] である。第一に、ハウスの骨組みや被覆材、周囲の作物により GNSS (Global Navigation Satellite System, 以下 GNSS) 信号の遮蔽やマルチパスが頻発するため、安定した衛星測位が困難である。第二に、ハウス内の通路は狭隘かつ単調な形状であり、3D-LiDAR を用いた SLAM (Simultaneous Localization and Mapping, 以下 SLAM) において、幾何学的特徴の欠落による自己位置推定の破綻が生じやすい。これらの要因により、農業環境では单一のセンサに依存した自己位置推定は信頼性に欠ける傾向にある。

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 (Inertial Measurement Unit, 以下 IMU), および品質情報を伴う GNSS を統合し、高信頼性を有する 3 次元自己位置推定を実現する手法を開発することである。さらに、得られた高信頼な軌跡に基づき、温湿度、CO₂ 濃度、気圧、および分光センサによるスペクトル情報などの生育環境情報を圃場空間へ高精度に投影し、作物の生育管理に資する高分解能な生育環境マップを生成することを目的とする。

1.4 本論文の構成要素

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と本研究の位置づけを述べる。第 3 章では、GNSS の品質監視 (Supervisor) に基づくロバストな自己位置推定手法の提案と評価について述べる。第 4 章では、高速かつ低遅延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および駆動手法について述べる。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た実環境実験を行い、生成された生育環境空間マップの整合性と有効性を論じる。第 6 章では、本研究の結論と今後の展望を述べる。

なお、本システムは遠隔監視のための無線通信機能を有するが、本論文では自律移動の基盤となるロバストな自己位置推定および高速センシング技術の確立に焦点を当てるため、通信アーキテクチャの詳細な実装や評価については本論文の範囲外とする。

すなわち、本研究は「測位品質が変動する農業環境においても破綻しない自己位置推定」を基盤として、巡回センシングによる圃場全体の高分解能マップ化を実現する統合システムの確立を目指す。

第2章 関連研究と本研究の位置づけ

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、自己位置推定および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。

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 [5]。しかし、AGV を使用し、その自動走行の可能性をシミュレーション上で検証したが、実機には実装されていなかった。筆者は、AGV に搭載された 2D-LiDAR と IMU やホイルオドメトリを使用し、圃場での短距離で自律走行を実現した [ref:my'paper'agv]。しかし、2D-LiDAR ベースの SLAM は、圃場の単調な環境においては位置推定の信頼性に欠ける。または障害物認識では、3D 情報が得られないため、障害物の高さ情報を取得できない。また、ホイルオドメトリは、車輪の空転やスリップにより誤差が蓄積しやすい。これらの課題を解決するため、本研究では 3D-LiDAR を用いた自己位置推定を採用する。

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

自律移動ロボットの自己位置推定において、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 (LIO) が主流となっている。特に、LOAM (Lidar Odometry and Mapping in Real-time) [6] の登場以降、LeGO-LOAM [7] や LIO-SAM [8] といったグラフ最適化ベースの手法が開発され、近年では直接法とカルマンフィルタを組み合わせた FAST-LIO2 [9] が、計算負荷の低さとロバスト性の高さから注目されている。これらの手法は、一般的な屋外環境や市街地では高精度な推定が可能であるが、農業用ハウスや圃

場のような半構造化環境では課題が残る。特に、ハウス内の長い通路のような環境では、進行方向に対する幾何学的特徴が欠落するため、LiDAR スキャンマッチングの解が不定となる縮退問題が発生しやすく、長時間走行における位置ドリフトが不可避となる [10]。

または、先行研究では、GNSS を使用し、測位精度を検証したが、数メートルの誤差が発生していた。

2.2.2 GNSS/INS/LiDAR のセンサフュージョン

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 (GNSS/INS/LiDAR Fusion) が広く研究されている。一般に、拡張カルマンフィルタ（以下、EKF）やグラフ最適化を用いて GNSS 観測を拘束条件として追加するが、既存手法の多くは、GNSS の観測誤差がガウス分布に従うことや、測位状態が安定していることを前提としている [11]。しかし、農業用ハウス環境では、ビニールやガラス、金属フレームによる信号遮蔽やマルチパスが頻発し、測位品質が突発的に劣化する。不正確な GNSS 観測値を不用意に統合すれば、推定軌跡に位置飛びが生じ、マッピングの整合性が破壊される危険性がある。したがって、農業環境特有の GNSS 品質変動に適応的な、より高度なセンサフュージョンが必要とされている。

2.3 農業用生育環境センシングセンサと分光計測

生育環境情報を圃場空間へ投影してマップ化するためには、各時刻のセンサ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。固定式の IoT センサノードを用いたモニタリングは広く行われているが、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、巡回計測を行うことで、高密度な環境マップを作成する試みがなされている [12]。

2.3.1 小型分光センサの農業利用

近年、作物の生理状態を非破壊で診断するために、分光反射率の計測が注目されている。従来の分光器は大型かつ高価であったが、MEMS 技術を用いた超小型分光センサ（浜松ホトニクス

製 C12880MA 等) が登場し, ドローンや AGV への搭載が可能となった [13].

本研究室の先行研究 [5] では, C12880MA を搭載した AGV 計測システムが構築されたが, 以下の 2 つの課題が残されていた. 第一に, 当時は AGV の自律走行システムが十分に確立されていなかったため, 移動しながらの連続計測ではなく, 特定地点に停止してデータを取得するに留まった点である. 第二に, データ取得速度の不足である. 先行研究の手法は, LPC1768 MCU と外部 AD コンバータを用い, データ取得のトリガ信号ごとに CPU が割り込みサービスルーチン(以下, ISR) を実行する割り込み駆動方式を採用していた. この方式では, ISR 実行に伴うオーバーヘッドが支配的となり, サンプリングレートは最大でも 50 kHz に制限されていた. 一方で, C12880MA 自体は数 MHz オーダーでの駆動能力を有しており, 観測された性能制限はセンサ固有の制約ではなく, 読み出し回路系の設計に起因するものであった.

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は評価回路基板 C13016 が提供されている [14, 15]. この評価基板は, PC と USB 接続し, 専用ソフトウェアを用いてスペクトル波形を確認・保存することができる. しかし, 以下の点において, 本研究のような組み込みロボットシステムへの統合には不向きである.

1. **コストとサイズ:** 評価基板単体で高価(約 20 万円程度)であり, AGV への多数搭載や低コスト化の障壁となる.
2. **インターフェースの制約:** 基本的に PC (Windows) ベースでの動作を前提としており, マイコンから直接かつ高速に制御するための GPIO/SPI 等のインターフェースが公開・最適化されていない.

したがって, AGV の走行速度に合わせて高密度な分光マッピングを行うためには, 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 品質変動のモデル化:** ハウス環境における GNSS 測位モード (Fix/Float/No-Fix) の遷移特性と, マルチパスによる外れ値の発生傾向を実データに基づき

分析し、センサ融合に必要な統計的特性を明らかにする点.

2. **GNSS Supervisor** によるロバストな統合: 従来の単純な閾値処理ではなく、時系列の整合性検定 (NIS 検定) とヒステリシス制御を導入した「GNSS Supervisor」を提案し、測位品質が激しく変動する状況下でも、LIO の軌跡を破綻させずに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実証: C12880MA の性能を最大限に引き出す「デュアルスイッチ FSM」駆動方式を独自に開発し、従来の ISR ベース手法に対して二桁以上高速な 5 MHz クラスのサンプリングを達成するとともに、高精度な自己位置推定結果と統合することで、実用的な分解能を持つ生育環境マップの生成を実証する点.

第3章 GNSS品質監視に基づくロバストな自己位置推定

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、LiDAR-Inertial Odometry (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 (Integrity Monitoring) の考え方を援用し、見かけ上は高品質（小共分散、RTK-FIX相当の状態）であっても、遮蔽・マルチパスに起因する NLOS (Non-Line-of-Sight) 環境下で大きく偏り得る誤測位（大偏差外れ値）を抑制する GNSS 品質監視モジュール (GNSS Supervisor) を提案する。提案手法は、バックエンドのグラフ最適化に投入する GNSS 制約をオンラインに選別・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。

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、センサ構成そのものの冗長化ではなく、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 LiDAR-IMU オドメトリ、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ーキテクチャについて説明する。

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 シャーシを用い、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 シャーシでは Gmade 社の GS02 を採用した。環境認識・自己位置推定のために全方位ソリッドステート式 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 [16]。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顕著であったため、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 を介して通信を行う。AGV の写真や構成を Fig. 3.1 に示す。

3.1.2 ソフトウェアアーキテクチャ

本システムは ROS 2(Robot Operating System 2)[17] 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 LiDAR-IMU オドメトリ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[18] 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 (GNSS Supervisor) 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[19] フレームワークを用いて実装し、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。

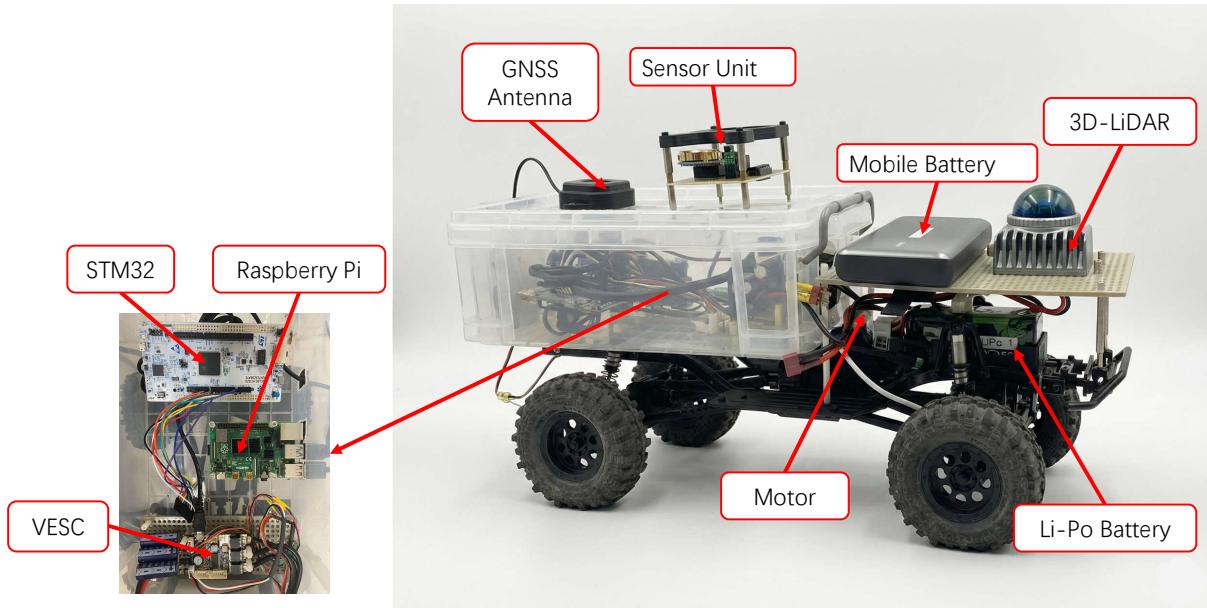


Fig. 3.1 移動ロボットプラットフォームと搭載センサ構成

3.1.2.1 ROS 2

ソフトウェア基盤には ROS 2(Robot Operating System 2)[17] 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) [20] 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 (LiDAR, GNSS 等) 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 : $\text{odom} \rightarrow \text{base_link}$ (高頻度相対オドメトリ)
- RTAB-Map : $\text{map} \rightarrow \text{odom}$ (バックエンド最適化により更新される変換)
- 静的外部パラメータ : $\text{base_link} \rightarrow \text{lidar}, \text{base_link} \rightarrow \text{gps_antenna}$

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 データフロー

主なデータフローを以下に示す。

- FAST-LIO2 : 点群・IMU $\rightarrow {}^{\text{odom}}T_{\text{base}}(t)$
- GNSS Supervisor : NavSatFix + 受信機状態量 + LIO オドメトリ \rightarrow 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 \rightarrow ループ閉合／因子グラフ最適化 $\rightarrow \text{map} \rightarrow \text{odom}$, 最適化軌跡
- Nav2 : 地図 (map) + 自己位置 (map 系) + 局所コストマップ (STVL) \rightarrow 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 座標系へ投影

3.2 農業環境における課題と故障モード

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

質劣化を单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 (RTCM age の増大) 等により、測位が成立しない、あるいは測定として利用できない状態である。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（位置ジャンプ）や断裂を生じる状態である。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 の幾何学的退化 (LiDAR デジエネラシー) と不整地擾乱

ハウス内通路等では点群幾何が単調となり、可観測性が低下して LIO が退化し得る。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汚染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、地図作成に劣化を引き起こす場合がある。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 入出力と二値ポリシー

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（測位状態、衛星数、DOP、補正受信状況など）、および LIO が output 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。

- **Accept (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）。
- **Reject (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、固定値の対角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 可用性スクリーニング

可用性スクリーニングは、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（UBX 等）が一時的に欠落・遅延する状況を考慮し、「補助情報が古い／未取得」であること自体では直ちに遮断せず、明確なハード不成立条件のみを遮断トリガとした。例として、(1) 測位状態が規定未満、(2) 衛星数不足、(3) PDOP 過大、(4) 水平精度 (hAcc) が閾値超過、(5) RTCM 途絶が閾値超過、などを用いる。

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暫定的に採用として扱う初期化区間を設けた。これにより正常区間が開始直後から連続して遮断になる挙動を抑制する。

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：短時間増分整合性に基づく遮断判定

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 $p_{\text{gnss}}(t)$ 、LIOオドメトリを $p_{\text{lio}}(t)$ とし、増分残差を

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

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(covariance floor)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Rejectを維持する(ヒステリシス)。

3.3.4 NLOS外れ値発生直後の1サンプル注入を防ぐ設計

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観測は同時に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 WGS84 から局所 ENU への変換

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（緯度・経度）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[21] 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 (GeographicLib 等) の導入が望ましい。



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

Fig. 3.2 Experimental environment

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（GNSS Supervisor）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 由来の測位逸脱が疑われる走行ログをケーススタディとして詳細に解析し、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（例：測位状態、衛星数、DOP、RTCM age 等）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. 3.2 に示す。

3.5.2 評価対象ログと NLOS 起因の測位逸脱の観測

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（ジャンプ／断裂）に相当する挙動が確認された。Fig. 3.3 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、走行終盤での発生であり、以降の区間が短く最適化過程の比較に適さないため、本節では「同様の現象が複数日に渡って観測され得る」ことの補助的証拠として提示するに留める。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（受信機状態が一見良好でも測位が大きく偏る事象）として現れ得る点に着目し、当該区間を NLOS 由来の測位逸脱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 の設定は可能な限り同一とした。

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 Supervisor により観測の採否 (Accept/Reject) 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

本ケーススタディでは外部計測機器による高精度 Ground Truth が利用できないため、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（通路形状の崩れ、二重壁、ねじれ等）、(ii) 推定軌跡の連続性と不自然な折れ曲がり、(iii) NLOS 由来の測位逸脱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 Reject 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

Fig. 3.4 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 由来の測位逸脱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（壁・通路形状の崩れ）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。

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. 3.5 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、バックエンド汚染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（中央値）と最終判定（PASS/FAIL）の時系列を Fig. 3.6 に示す。図中の破線は判定閾値 γ_{pass} を表し、上部のバーは最終的な採否（Accept/Reject）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（例：fix 品質、補助状態量の鮮度）や回復ロックアウトにより Reject 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、このような保守的な判定方針を採用した。

3.5.8 考察

本ケーススタディにより、実環境において NLOS 由来の測位逸脱が疑われる 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確認した。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、および外部基準（既知基準

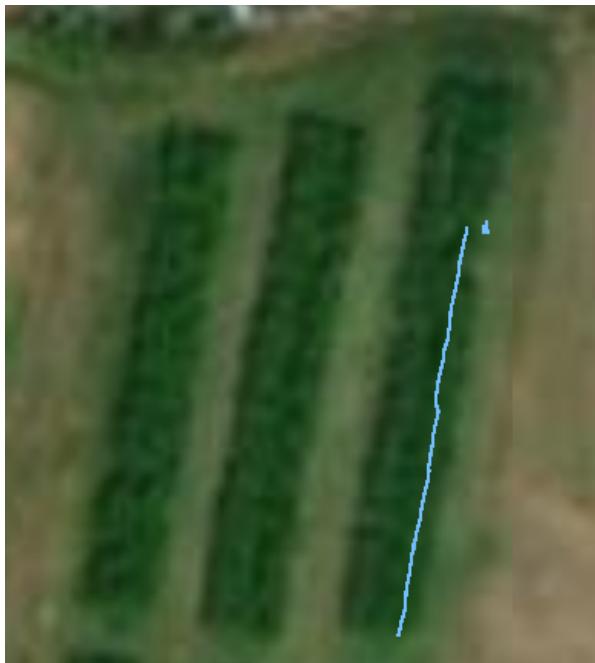
点, 測量, あるいは高精度参照軌跡) を用いた定量評価を課題とする.



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

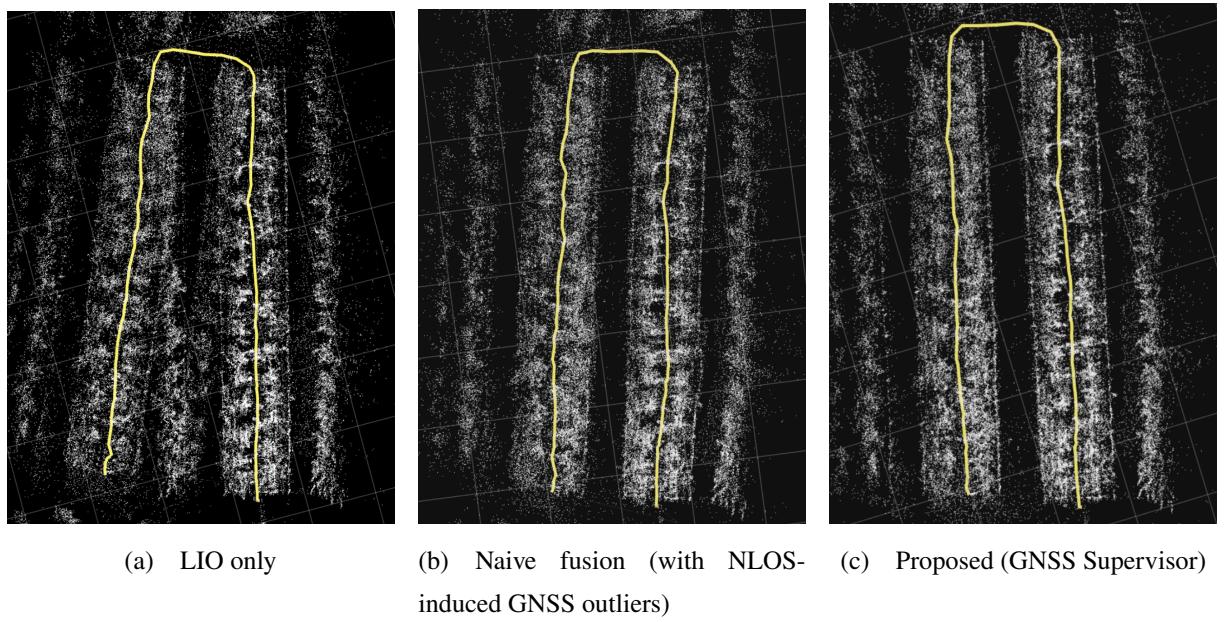


Fig. 3.4 Qualitative comparison of mapping results (white: point cloud map, yellow: estimated trajectory)

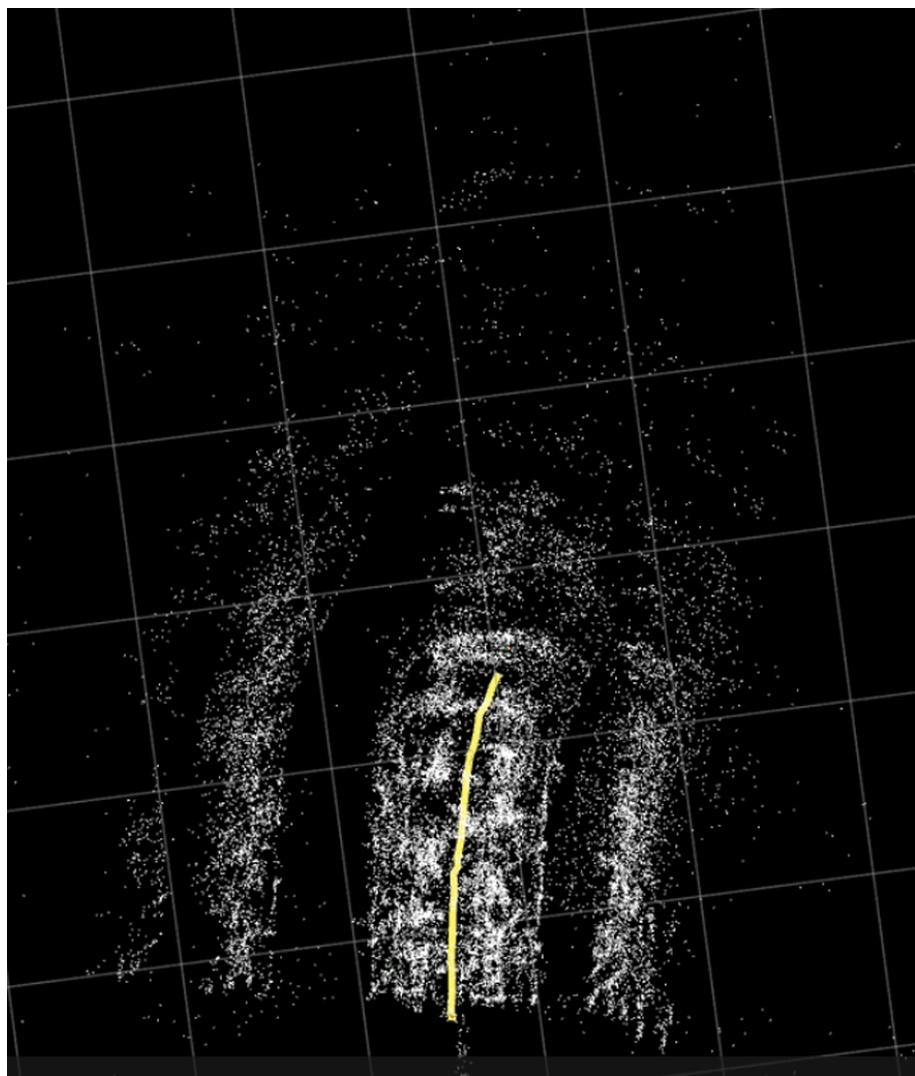


Fig. 3.5 Example of local distortion observed after the anomaly in naive fusion (partial view)

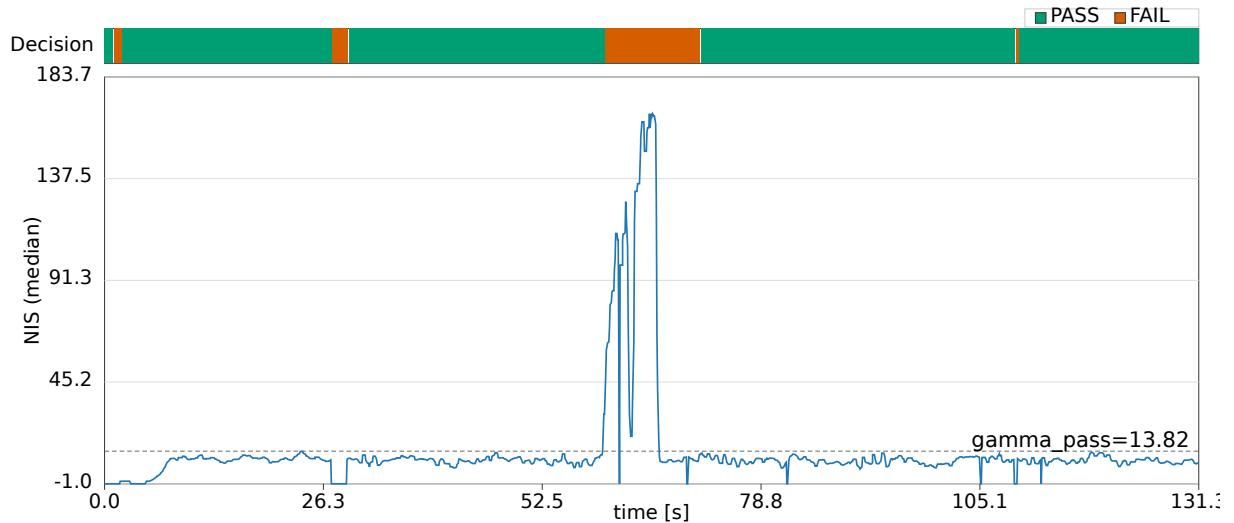


Fig. 3.6 Time history of the median NIS and the acceptance decision on the 2025-10-23 dataset. The dashed line indicates the threshold γ_{pass} . The top bar shows the final PASS/FAIL decision (Accept/Reject). Note that GNSS updates can be rejected even when NIS is below the threshold due to availability 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的に示した上で、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、有効画素ウィンドウ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 (F4 シリーズ) および STM32H723ZG (H7 シリーズ) に実装し、最終的に 5 MHz での連続取得を実証した。

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核に、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. 4.1 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. A.1, Fig. A.2, Fig. A.3(a), Fig. A.3(b)).

4.1.1 構成要素と主仕様

センサユニットの構成要素と主仕様を Table 4.1 に示す。また、開発したセンサユニットの外観を Fig. 4.2 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

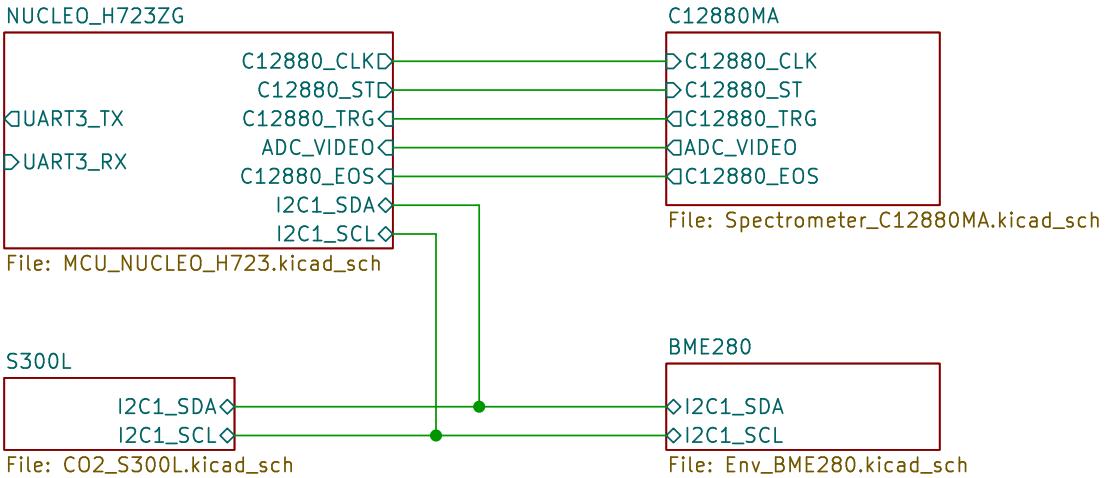


Fig. 4.1 Overall multisensor system architecture

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マルチモーダル計測を可能とする。

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. 4.3 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（SPI 接続）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 [5]。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 処理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。

Fig. 4.4 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 は暗画素（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

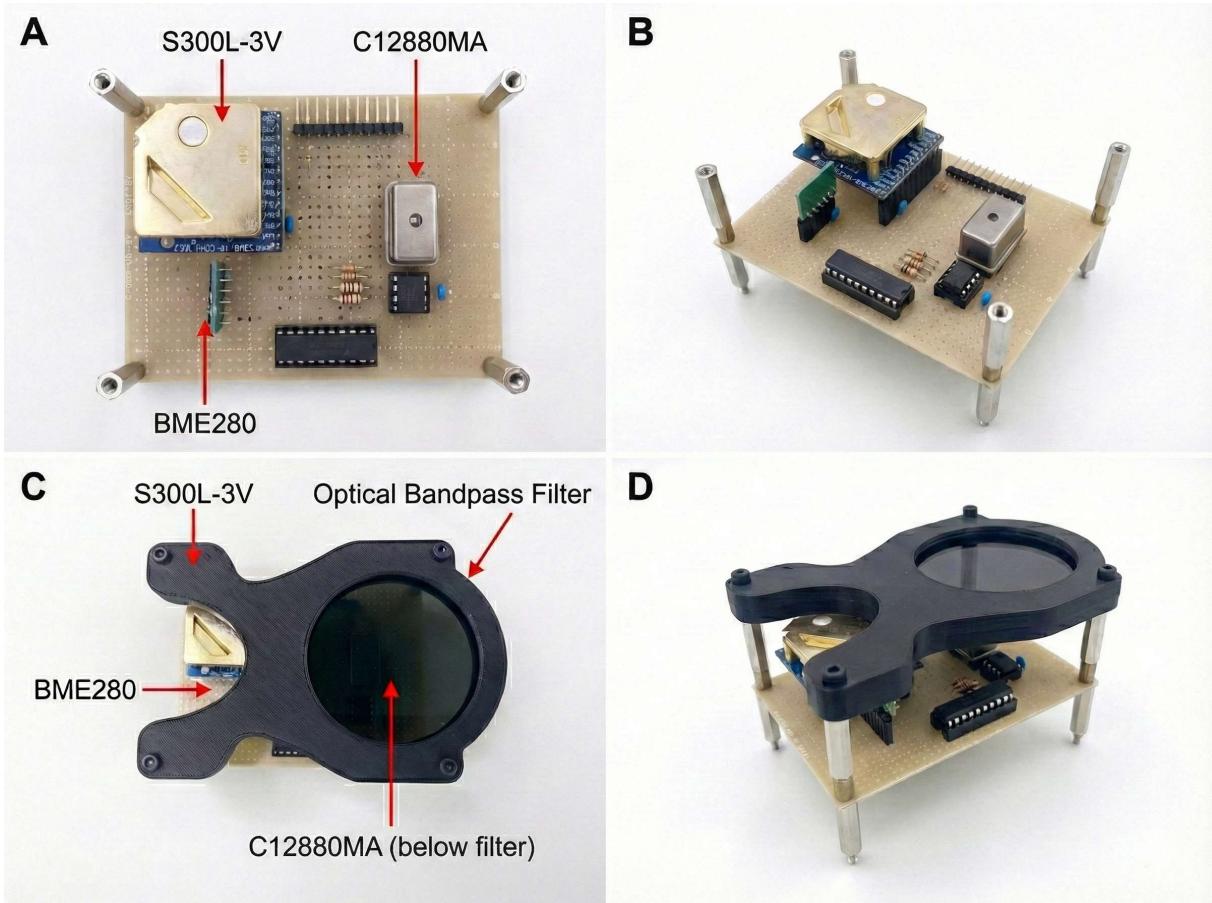


Fig. 4.2 Photographs of the developed sensor unit. (A) Top view of the sensor board integrating the C12880MA, BME280, and S300L-3V. (B) Oblique view showing the component layout. (C) Top view with the optical bandpass filter holder mounted. (D) The fully assembled unit ready for installation.

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信号は読み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。

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 4.2に示す。割込みのみでは25.4kHz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130kHz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。

Table 4.1 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 [15]
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 4.2 Limits of acquisition frequency with conventional methods

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

4.3 提案手法：連続 CLK 下での ST 制御と TRG 同期ハードウェア取得

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時間ばらつき (jitter) 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。

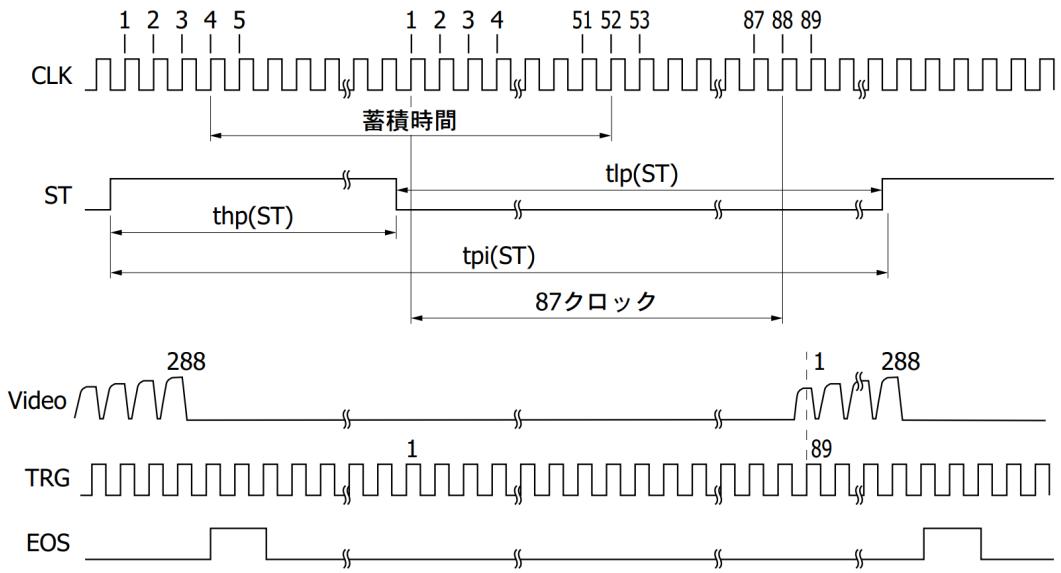


Fig. 4.3 Timing diagram of the C12880MA: excerpted from the datasheet[15]

4.3.1 フレーム取得シーケンス（ST 制御と DMA ストリーミング）

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 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 (ハードウェアイベント) により規定され、CPU 介在はフレーム境界 (開始/完了) に限定される。

4.3.2 TIM-ADC-DMA の連携機構

図 4.3 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。

重要なのは、ADC 変換の開始条件が「ソフトウェア呼出」ではなく「TRG エッジ」により決

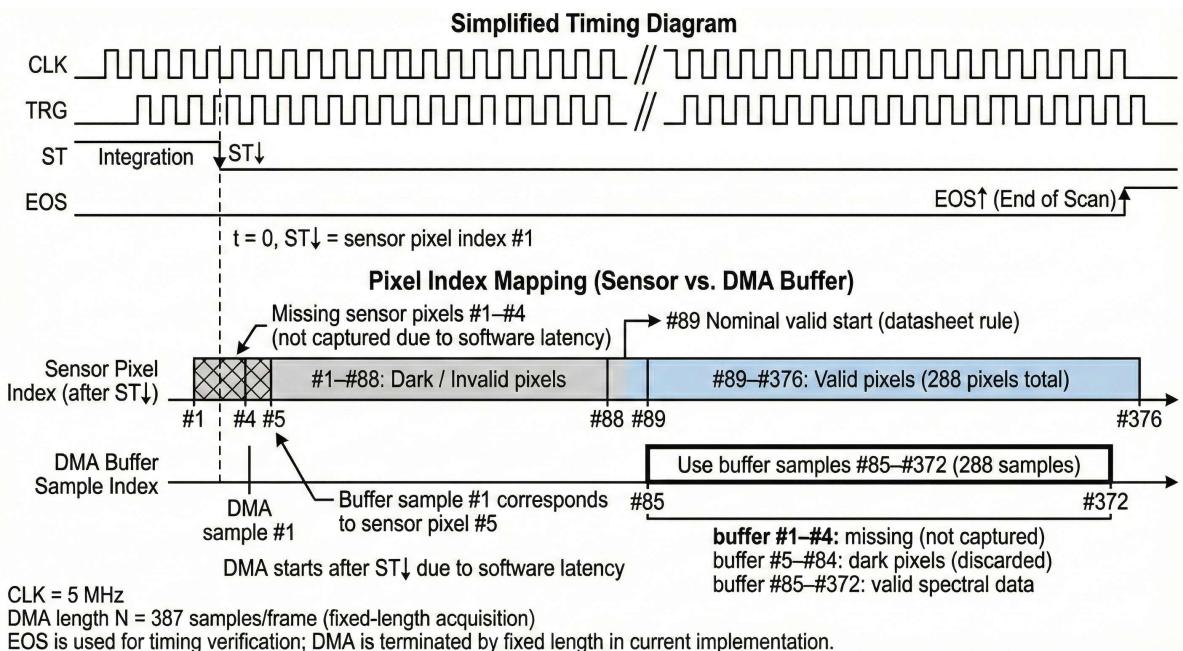


Fig. 4.4 C12880MA readout rule and pixel index mapping between sensor-side definition and DMA buffer in this work. The sensor pixel index is defined from the falling edge of ST ($t = 0$), where pixels #1–#88 are dark/invalid and pixels #89–#376 are valid (288 pixels). Due to software start latency, sensor pixels #1–#4 are not captured; therefore, the nominal valid start at sensor pixel #89 appears at DMA buffer sample #85.

まる点である。これにより、ISR 内処理やタスクスケジューリングに起因する遅延・ばらつきがサンプリング位相へ直接投影されることを抑制し、5 MHz 級の連続取得においてもタイミング決定性を維持できる。

4.3.3 ST 立下り後の開始遅延と有効画素ウィンドウ補正

C12880MA のデータシートでは、ST 立下り後の所定回数（89 回）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。

4.3.4 割り込み負荷を伴うシステムへの拡張（論理ゲートによる完全同期）

本章の評価では、高速取得中に追加の高負荷割り込み処理（通信スタックや制御周期割り込み等）を介在させず、時間決定性を優先した構成としている。この前提下では、前節の画素オフセットはほぼ一定であり、有効画素ウィンドウ補正として安定に吸収できる。

一方、将来的に割り込み負荷が増大し、ST遷移からADC/DMA開始までのレイテンシが変動する場合、画素シフトが非定常となり、定数補正のみでは不十分となる可能性がある。その場合には、ST信号と「ADC/DMA の ARM 完了（開始準備完了）」状態を論理回路（例：与ゲート）で合成し、「ST=LowかつARM完了」の条件成立後にのみTRG（もしくはADCトリガ経路）を有効化するハードウェアゲーティングにより、フレーム開始位置を完全に決定論的に固定できる。本研究は現段階でこの拡張を要さないが、システム統合要件の変化に応じて導入可能である。

4.4 実装要点

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（Timer-ADC-DMA）

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、5MHz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（開始・完了）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 系列におけるキャッシュ・コヒーレンシ対策

STM32H7 系列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。併せて、必要に応じてキャッシュ無効化あるいはキャッシュクリーン／インバリデートを実施し、連続取得時の欠落・破損を抑制した。

4.5 性能検証

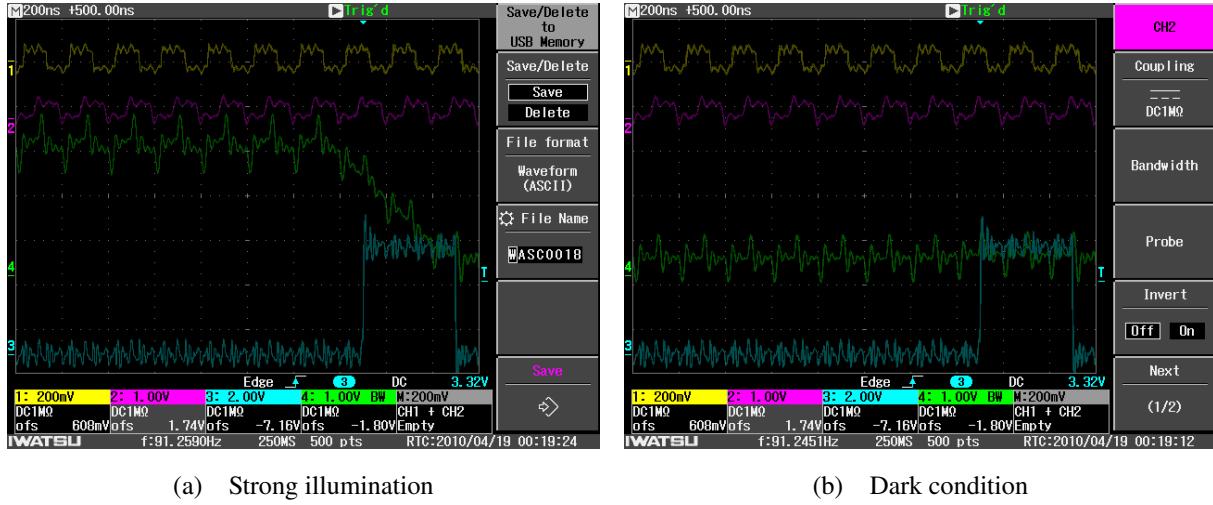
本節では、提案アーキテクチャが高速取得を実現していることを、(i) 信号タイミングの実測、(ii) 連続取得時のデータ完全性、(iii) スペクトルの再現性、の 3 観点から検証する。なお、本実験に用いた STM32 NUCLEO-H723ZG 開発ボードとセンサユニットの接続インターフェース詳細については付録を参照する。

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（データシートに基づく上限）。

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。



(a) Strong illumination

(b) Dark condition

Fig. 4.5 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.

4.5.3 オシロスコープのスクリーンショットによる 5 MHz 動作確認

Fig. 4.5 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（周期・位相・エッジ同期）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。

4.5.4 CSV ファイルから再描画した EOS 信号、ST 信号 および VIDEO 信号の波形

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. 4.6 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. 4.7 に示す。Fig. 4.7(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。

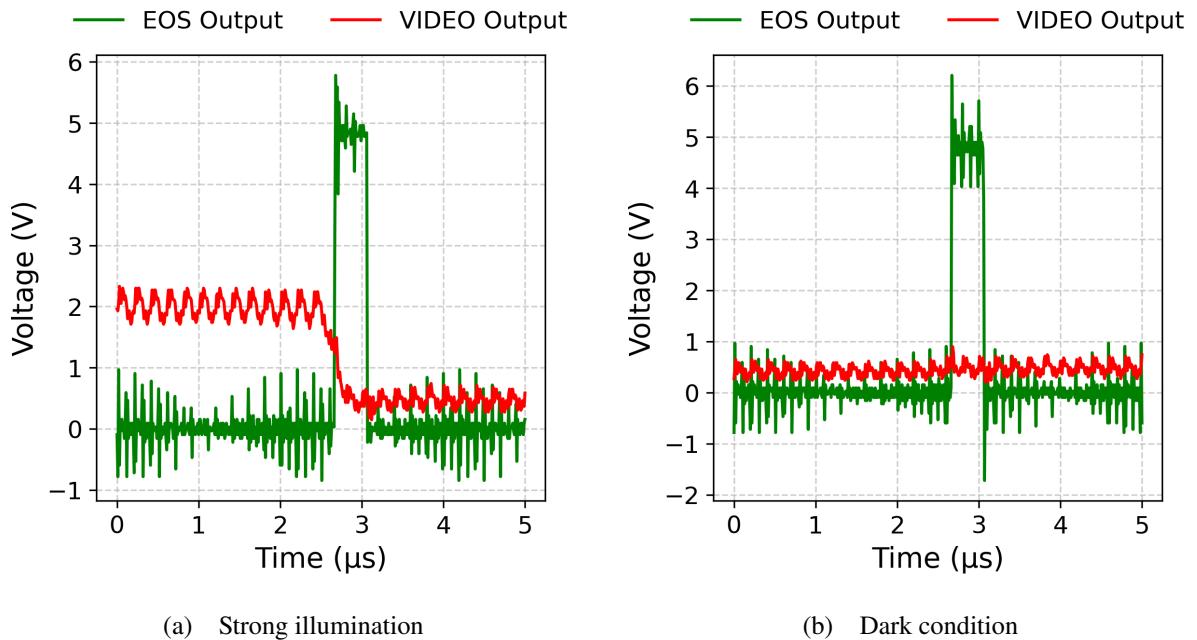


Fig. 4.6 Replotted waveforms from CSV (EOS and VIDEO) at 5 MHz. (a) Under strong illumination. (b) Under dark condition. In both cases, the VIDEO output (red) becomes inactive precisely at the rising edge of the EOS event (green), verifying the readout termination logic.

4.5.5 サンプリングレート成立性の検討 (ADC 仕様に基づく)

センサに供給するクロックが 5 MHz 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 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

Table 4.3 Acquisition frequency of the proposed architecture

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

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

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

となる. STM32H723ZG のデータシート [22] 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.

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 系列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 環境へポートィングした. 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, 走行中のマルチモーダル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 ストリーミング取得系を構築した. 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, 有効画素ウィンドウ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、5MHz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。また、将来的に割り込み負荷が増大して遅延が非定常化する場合には、論理ゲートによるハードウェアゲーティングへ拡張することでフレーム開始位置を決定論的に固定できることを示した。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。

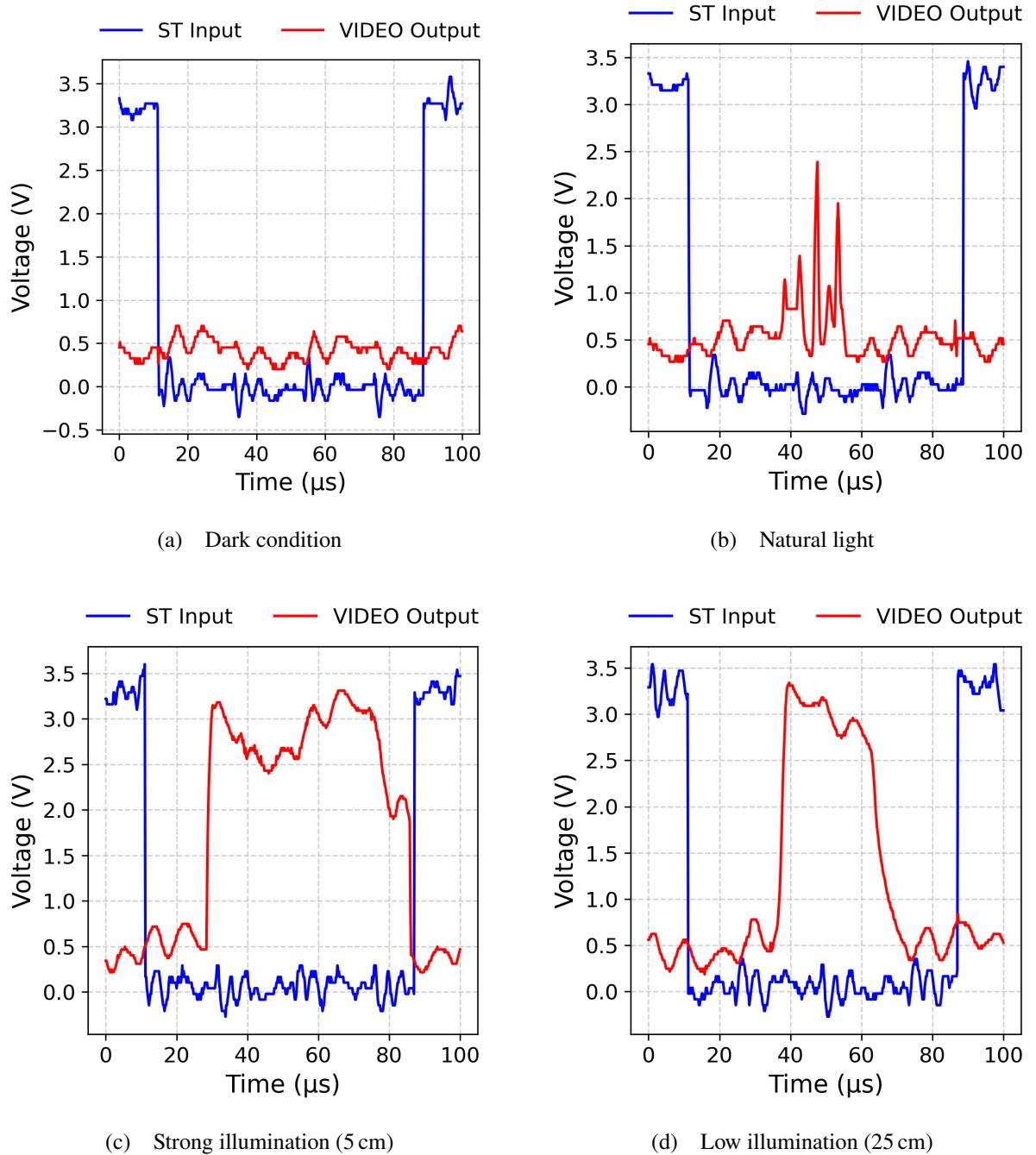


Fig. 4.7 ST and VIDEO signal waveforms under different lighting and distance conditions. (a) Dark condition showing baseline noise. (b) Natural light showing spectral peaks. (c) High intensity at 5 cm distance (equivalent to strong illumination). (d) Low intensity at 25 cm distance. The results confirm 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のロバスト性を検証中である。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。本実験の主目的は、GNSS/LiDARによる高精度な位置情報と、非同期に取得される環境センサデータを正確に融合し、将来的な自律走行システムにおいて期待される環境マップ生成機能の有効性を示すことである。

5.2 データの同期と空間投影

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（表示のためのスケーリング）:** 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。
- 空間投影と可視化:** 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（288 次元）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、(1) 前処理、(2) 低次元特徴への射影、(3) 位置情報への同期と空間投影の 3 段階で環境マップへ変換する。

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の基線補正と平滑化を行い、さらに L1 正規化により照度の一様な増減の影響を抑えた正規化スペクトル s_i を得る。次に、植生・非植生の反射特性差を捉えるため、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} （導関数の最大点），(iv) 参照植生スペクトル s_{ref} に対するスペクトル角 θ (SAM) である。各特徴量はタイムスタンプに基づき最も近い自己位置 $p(t_i)$ へ対応付け、走行軌跡上に投影して空間分布として可視化する。

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 は、288 点分光データから抽出した特徴量の空間マップを示す。ND および赤縁位置は、植生に特徴的な「Red 帯域での吸収と NIR 帯域での高反射」、ならびに赤縁の立ち上がり (red-edge) を反映するため、土壤や空隙を含む領域との違いを比較的安定に表現できる。また SAM は、典型的な植生スペクトルとの類似度を連続量として与えるため、将来的に閾値処理やクラスタリングによる自動領域分割へ拡張しやすい。スペクトル質心はスペクトル形状全体の偏りを表す補助的指標であり、照明条件や材質差による全体的なシフトを把握するのに有効である。

なお、従来の単純なピーク波長 (Fig. 5.6) は探索的可視化として有用である一方、局所ノイズや照度条件の影響を受けやすい。本研究では、ピーク波長マップを直感的な参考として提示しつつ、主たる議論は上記の正規化に基づく特徴量マップにより行う。

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、ハウス内外での巨視的な環境差は極めて小さい条件下であった。それにもかかわらず、空間投影により以下の微細な環境特性が確認で

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、物理法則（空気線図）に整合する逆相関が観測された。これは提案システムが、ノイズに埋もれやすい微小な変動を空間分布として捉えられていることを示す。
- **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、ハウス奥側（図の上部ループ付近）において濃度が高まる傾向が見られる。これは換気の影響が届きにくい領域での空気の滞留、あるいは植生による局所的な呼吸の影響を捉えている可能性がある。

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、走行しながら高精細な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。

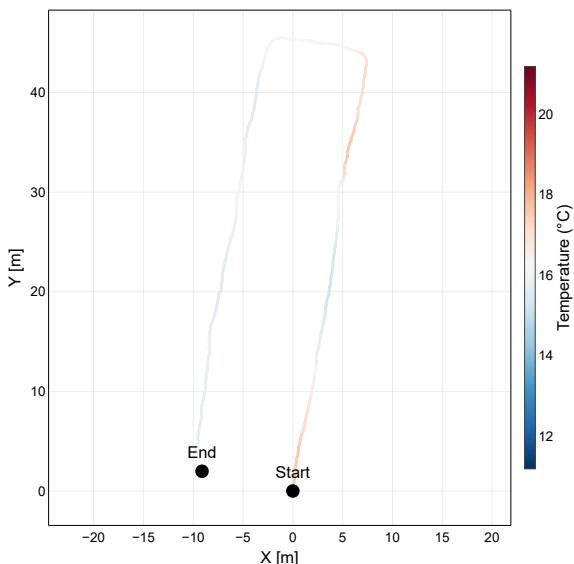


Fig. 5.1 Temperature map ($^{\circ}\text{C}$).

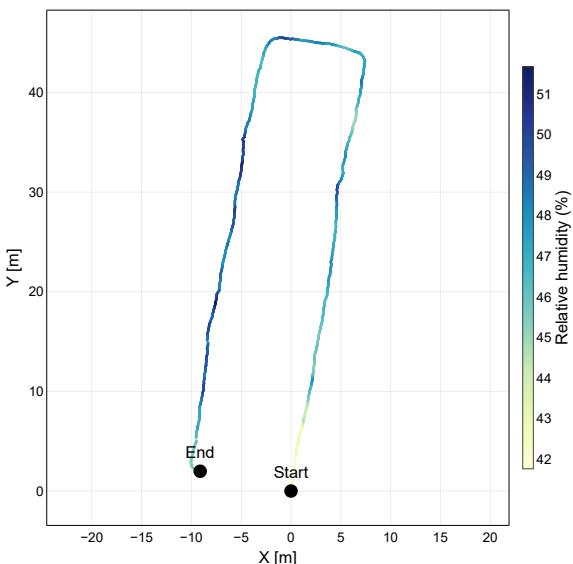


Fig. 5.2 Relative humidity map (%).

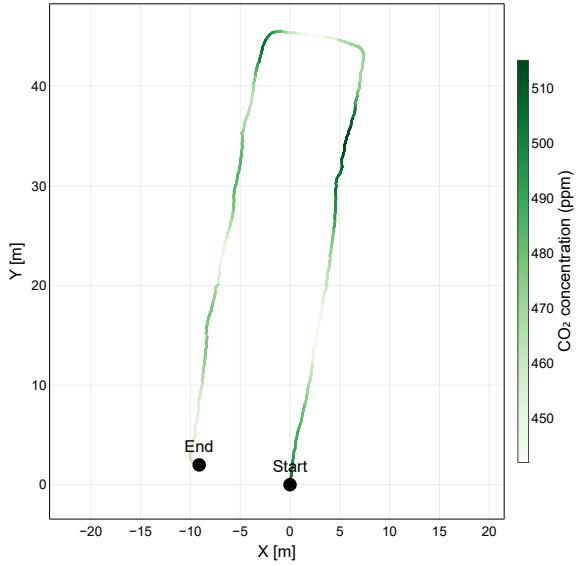


Fig. 5.3 CO₂ concentration map (ppm).

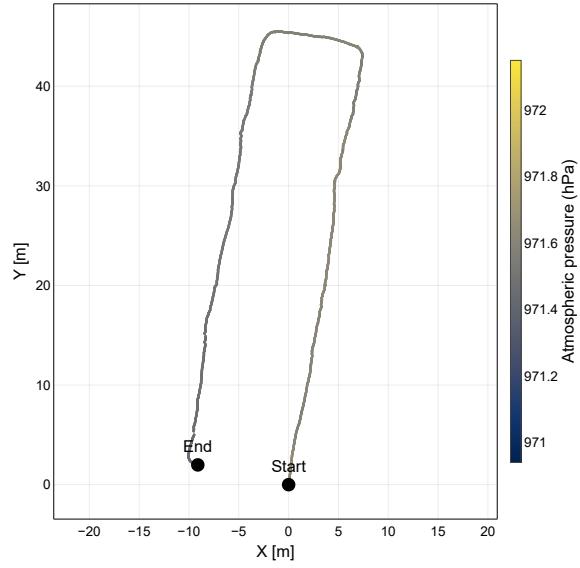


Fig. 5.4 Atmospheric pressure map (hPa).

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（ND、赤縁位置）および類似度指標（SAM）を用いて空間マップへ投影することで、単一ピークに依存しない、より頑健で解釈可能な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、栅格地図への集約・統計処理による安定化を行い、定量評価を拡充する予定である。

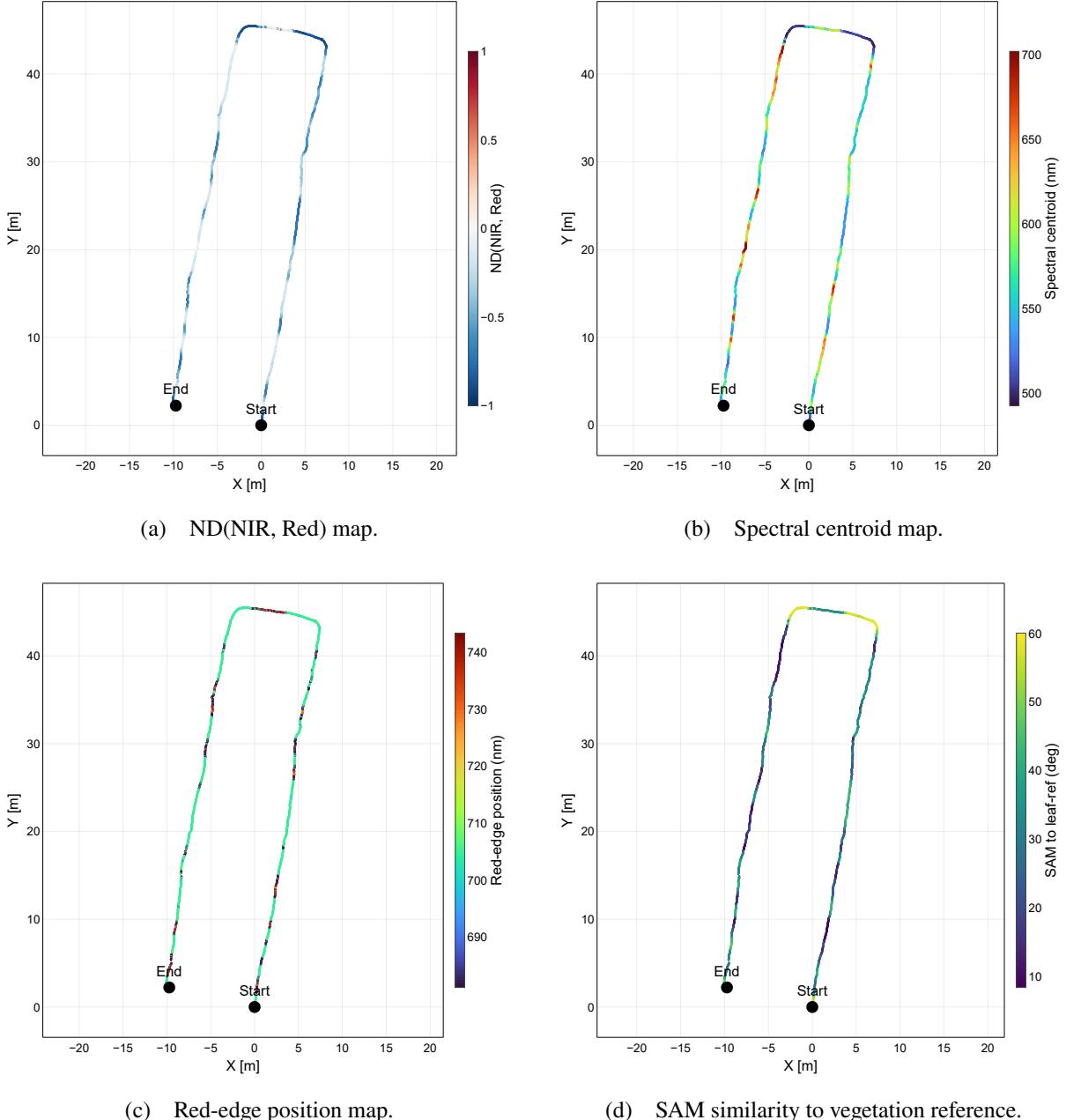


Fig. 5.5 Spatial maps of spectral features extracted from 288-band measurements. Normalized spectral features enable robust comparison under illumination changes and provide interpretable indicators for vegetation/non-vegetation discrimination along the trajectory.

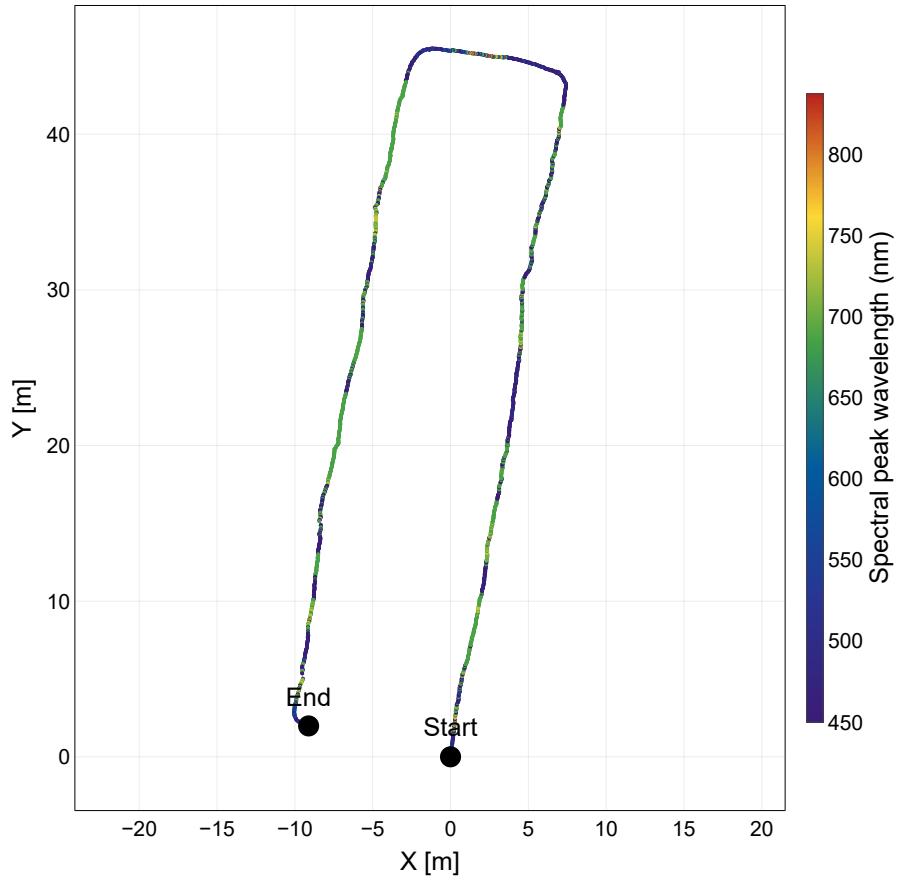


Fig. 5.6 Spectral peak wavelength map (nm) as an exploratory visualization. Frequent color changes along the trajectory indicate spectral variability caused by material differences and illumination conditions.

第6章 結言

6.1 本研究の成果

本研究で達成したこと（高速センサ駆動、GNSS品質分析、ロバスト融合手法の提案と実証、生態マップ生成）を簡潔にまとめる。

研究目的が達成されたことを明確に述べる。

6.2 今後の課題と展望

提案手法のさらなる改善点（例：より高度なFDIR、機械学習の導入など）。

完全自律走行の実現。

雑草エリアでの走行（可通行性解析）。

長期運用による時系列マップの作成と農業応用。

参考文献

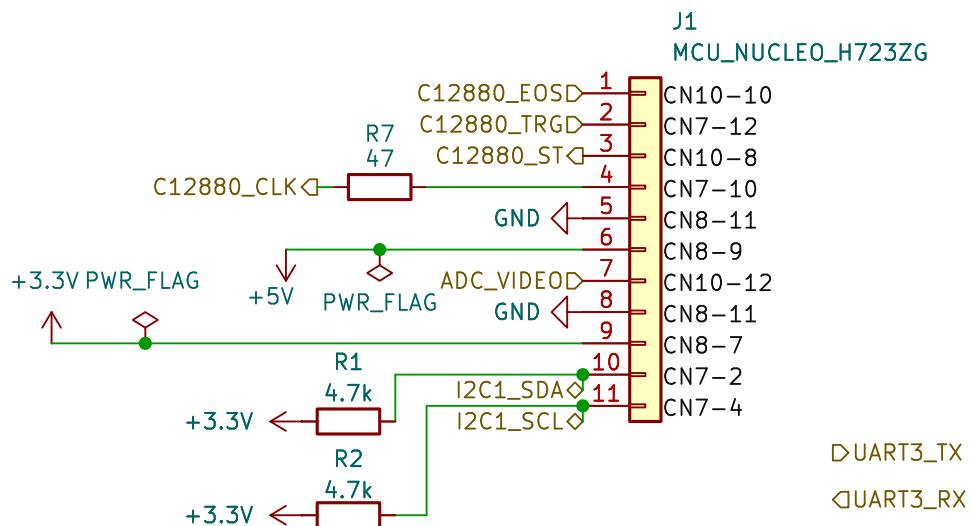
- [1] 農林水産省. スマート農業の展開について. https://www.soumu.go.jp/main_content/000775128.pdf. (Accessed on 16/6/2025).
- [2] 農林水産省. 農業労働力に関する統計. <https://www.maff.go.jp/j/tokei/sihyo/data/08.html>. (Accessed on 16/6/2025).
- [3] 農林水産省. 農業データの利活用の推進について. <https://www.maff.go.jp/j/kanbo/smart/attach/pdf/index-146.pdf>. (Accessed on 16/6/2025).
- [4] R. Islam, H. Habibullah, and T. Hossain. AGRI-SLAM: a real-time stereo visual SLAM for agricultural environment. *Autonomous Robots* 47 (2023), pp. 649–668. doi: 10.1007/s10514-023-10110-y. URL: <https://doi.org/10.1007/s10514-023-10110-y>.
- [5] 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.
- [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] 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] 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 2026.
- [15] Hamamatsu-Photonics. Mini-spectrometers. https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/99_SALES_LIBRARY/ssd/c12880ma_c16767ma_kacc1226e.pdf. (Accessed on 10/9/2025).
- [16] 信州上小森林組合. RTK 基準局公開情報. <http://jforest.jp/rtkkijunkyoku.html>. Accessed: 2026-01-19. 2025.
- [17] 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>.
- [18] 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>.
- [19] 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.
- [20] 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>.
- [21] C. F. F. Karney. *GeographicLib*. Version 2.7. 2025. URL: <https://geographiclib.sourceforge.io/C++/2.7>.
- [22] STMicroelectronics. stm32h723zg datasheet. <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32h723zg.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。また河村研究室の皆様には，本研究の遂行にあたり多大なご助言，ご協力頂きました，ここに感謝の意を表します。

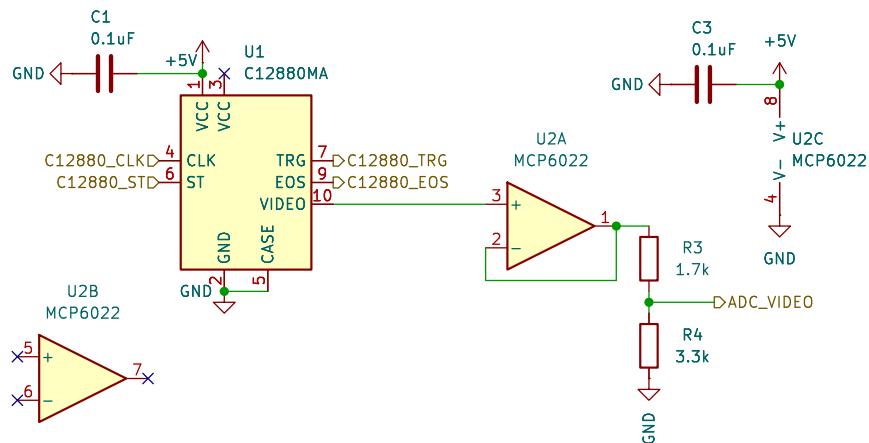
付録 A インタフェース回路



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.

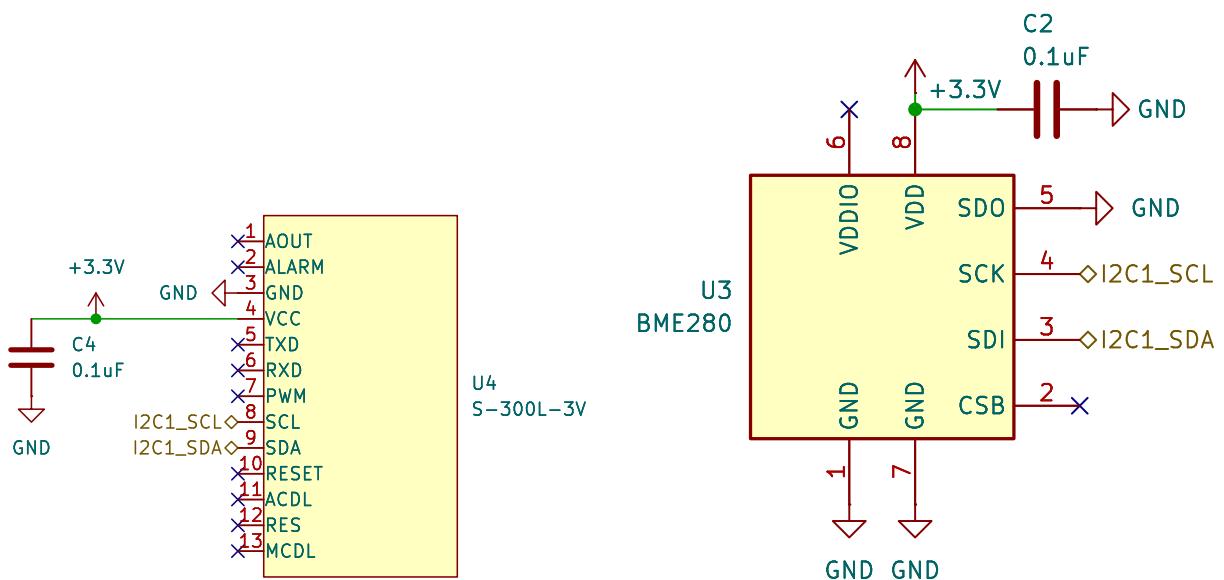
- Power source (USB mode):
- +5V_USB: USB VBUS from on-board ST-LINK (Micro-USB), provided on CN8 5V pin (output).
 - +3V3: Generated by the NUCLEO on-board regulator, provided on CN8 3V3 pin (output).

Fig. A.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. A.2 Spectrometer (C12880MA) interface circuit



(a) CO₂ sensor (S300L) interface circuit

(b) Environmental sensor (BME280) interface circuit

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

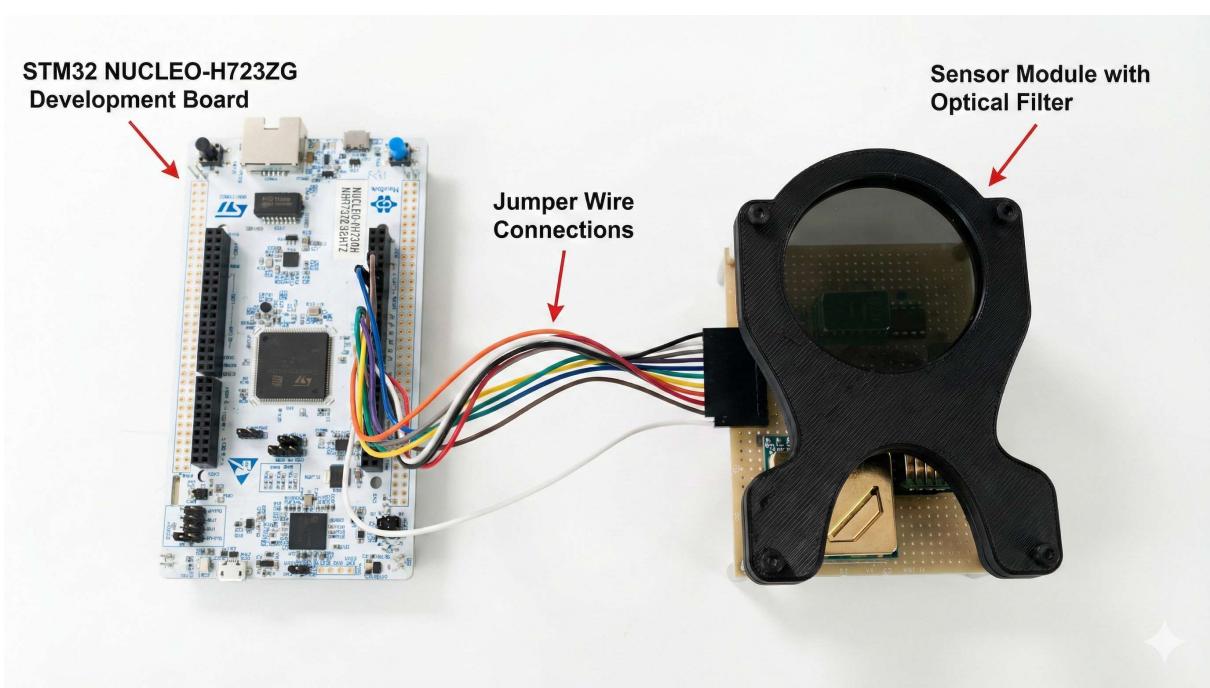


Fig. A.4 Experimental setup for high-speed spectral acquisition. An STM32 NUCLEO-H723ZG development board is connected to the sensor module with an optical bandpass filter via jumper wires for power and signal interfaces.