

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
総合理工学研究科繊維学専攻
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	農業環境における自己位置推定	3
2.1.1	LiDAR を用いた自己位置推定	3
2.1.2	GNSS/INS/LiDAR のセンサフュージョン	3
2.2	農業用生育環境センシングセンサと分光計測	4
2.2.1	小型分光センサの農業利用	4
2.2.2	浜松ホトニクス社製評価基板の課題	5
2.3	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	6
3.1	実験システム概要	6
3.1.1	移動ロボットプラットフォーム	6
3.1.2	ソフトウェア構成	6
3.2	農業環境における課題と故障モード	7
3.3	提案手法：GNSS Supervisor の設計	8
3.3.1	可用性ゲート	8
3.3.2	完全性ゲート（Integrity Gate）：短時間増分整合性検定	9
3.3.3	LIO 信頼度（LIO Confidence）による退化保護	10
3.4	WGS84 から局所 ENU への変換	11
3.4.1	GeographicLib による WGS84→ENU（推奨）	11
3.4.2	navsat_transform_node の利用（代替）	11

3.5	RTAB-Map への GNSS 拘束注入と三値出力 (Pass / Inflate / Drop)	12
3.6	実験と評価	12
3.6.1	実験条件	12
3.6.2	比較手法	12
3.6.3	結果と考察	13
第 4 章	高速分光センシングシステムの構築	14
4.1	センサユニットのハードウェア構成	14
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	14
4.3	提案手法：デュアルスイッチ FSM アーキテクチャ	15
4.3.1	C12880MA 駆動における「フライングスタート」問題	15
4.3.2	FSM (有限状態機械, 以下, FSM) の設計	15
4.3.3	FSM (有限状態機械) による制御フロー	17
4.4	性能検証	18
4.4.1	STM32F446RE でのアーキテクチャ検証	18
4.4.2	STM32H723ZG での 5 MHz 高速取得の実現	18
4.4.3	ADC 性能とサンプリングレートの検証	19
4.5	その他のセンサインターフェース	20
第 5 章	生態環境マッピング	21
5.1	マッピング手法と実験条件	21
5.2	データの同期と空間投影	21
5.2.1	スペクトル特徴による植生検出	22
5.2.2	微気象データの安定性と環境勾配	22
5.3	生成された生態環境マップ	23
5.4	考察	25
第 6 章	結論 (Conclusion)	26
6.1	本研究の成果	26
6.2	今後の課題と展望	26
参考文献	27
謝辞	29
付録 A	インタフェース回路	30

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も進められている [3].

近年は、土壌・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、桑畑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、農業環境では単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 農業環境における自己位置推定

2.1.1 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) [5] の登場以降、LeGO-LOAM [6] や LIO-SAM [7] 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 [8] 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 [9]。

2.1.2 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 [10]。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。

2.2 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 [11]。

2.2.1 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 [12]。

本研究室の先行研究 [13] 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。

2.2.2 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。

2.3 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

農業用ハウス環境における RTK-GNSS は,

3.1 実験システム概要

AGV プラットフォーム (GS02 ベース)、搭載センサ群 (Mid360, IMU, ZED-F9P, VESC, 生態センサユニット)、ソフトウェア (ROS 2) からなる全体構成を示す (ブロック図)。

TF ツリーを示し、特に LiDAR の傾斜搭載について言及する。

3.1.1 移動ロボットプラットフォーム

3.1.2 ソフトウェア構成

本研究では、前端に FAST-LIO を用いて高頻度な相対オドメトリを生成し、後端に RTAB-Map を用いてループ閉合とグラフ最適化を行う。GNSS は RTAB-Map の拘束入力として用い、robot_localization は使用しない。

3.1.2.1 TF 構成

本システムでは TF を次のように固定する。

- FAST-LIO : $\text{odom} \rightarrow \text{base_link}$ (高頻度相対オドメトリ)
- RTAB-Map : $\text{map} \rightarrow \text{odom}$ (後端最適化により更新される全局整合変換)
- 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、制御系は odom 系の連続性を維持しつつ、後端は map 系で全局整合を提供できる。

3.1.2.2 データフロー

- FAST-LIO : 点群 + IMU $\rightarrow {}^{\text{odom}}T_{\text{base}}(t)$

- GNSS Supervisor：GNSS (NavSatFix + 受信機状態量) + LIO オドメトリ → GNSS_gated (採否・降重済み GNSS)
- RTAB-Map：センサ入力 + LIO オドメトリ + GNSS_gated → グラフ最適化／ループ閉合 → map→odom, 最適化軌跡
- 生態環境マッピング：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 (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. 危険な誤誘導情報 (HMI: Hazardously Misleading Information) / 外れ値混入

受信機は RTK-FIX 等の状態を報告し、共分散も小さいにもかかわらず、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) 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の抑制にある。

3. LIO の幾何学的退化 (LiDAR デジェネラシー) 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 が高精度だが、利用不可が間欠的に発生し、まれに HMI が出現する統計的特性をもつ状況下で、後端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 Supervisor の設計

Supervisor は、可用性判別、完全性監視、LIO 信頼度から構成される。可用性ゲートは利用不可を遮断し、完全性ゲートは HMI / 外れ値混入を抑制する。ただし LIO も退化し得るため、LIO 信頼度に基づき完全性ゲートの厳しさを調整し、必要に応じて完全性ゲートを停止して可用性判別のみへ切り替える。

3.3.1 可用性ゲート

可用性ゲートは、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く入力有効性検査として実装する。目的は、測位不可や補正途絶に起因する利用不可を確実に遮断し、後端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。

3.3.1.1 状態量

受信機から次の状態量を取得・記録し、判別に用いる。

- 測位状態 (no-fix, 3D-fix, RTK-float, RTK-fix 等)
- 使用衛星数 (あるいは測位に寄与する衛星数)
- 搬送波解の状態
- 差分補正の受信状態 (RTCM age, 途絶時間)
- 位置推定共分散 (NavSatFix に付随する position_covariance)

NavSatFix のみで不足する場合は、受信機拡張ステータス (UBX 等) を併記してログ化する。

3.3.1.2 4 状態モデルとヒステリシス

GNSS 入力の状態を S0-S3 に分類する。

- **S0 : NO_MEAS (利用不可)**
no-fix, 衛星数不足, RTCM age 超過, 共分散が未定義 (NaN) 等。
- **S1 : DEGRADED (降級可用)**
RTK-float / 3D-fix 等で測位は成立するが精度が劣化している状態。
- **S2 : CANDIDATE (回復直後の観察状態)**

S0 から回復した直後であり、安定性を確認するための遷移状態.

- **S3 : TRUSTED (可用)**

RTK-fix が安定し、状態量が良好である状態 (完全性ゲート通過を前提に最終採用).

判定の過敏さを避けるため、ヒステリシスを導入する. 例えば,

- 利用不可条件が連続 N_{bad} 回成立 \Rightarrow S0 へ遷移し, GNSS を封鎖
- 利用可能条件が連続 M_{good} 回成立 \Rightarrow S2 へ遷移し, 観察後に S3 候補

とする.

3.3.2 完全性ゲート (Integrity Gate) : 短時間増分整合性検定

完全性ゲートは, 受信機状態が良好に見えるにもかかわらず外れ値を含む HMI を抑制するための機構である. 本研究では, 絶対座標の一致を仮定せず, **短時間窓の位置増分**を比較することで外れ値混入を検出する. 増分形式を採用することで, 初期方位や座標原点の差異に対して頑健となる.

3.3.2.1 GNSS の局所座標化

完全性検定は局所直交座標系 (ENU) で実施する. t 時刻の GNSS 測位を ${}^{\text{enu}}\mathbf{p}_{\text{gnss}}(t)$ とし, 基準点 (原点) は可用状態 S3 が成立した初回の測位 (あるいは観察状態 S2 を経て安定と判断した測位) を用いて設定する. 局所座標化の実装は 3.4 節に述べる.

3.3.2.2 増分残差と NIS

時間窓 ΔT に対して, LIO および GNSS の位置増分を次式で定義する.

$$\Delta \mathbf{p}_{\text{lio}}(t) = \mathbf{p}_{\text{lio}}(t) - \mathbf{p}_{\text{lio}}(t - \Delta T), \quad (3.1)$$

$$\Delta \mathbf{p}_{\text{gnss}}(t) = \mathbf{p}_{\text{gnss}}(t) - \mathbf{p}_{\text{gnss}}(t - \Delta T). \quad (3.2)$$

ここで $\mathbf{p}_{\text{gnss}}(t)$ は ENU 座標の GNSS 位置, $\mathbf{p}_{\text{lio}}(t)$ は LIO オドメトリを同一座標系で表現した位置 (odom 系) である. 増分残差を

$$\mathbf{r}(t) = \Delta \mathbf{p}_{\text{gnss}}(t) - \Delta \mathbf{p}_{\text{lio}}(t) \quad (3.3)$$

とし、共分散を

$$S(t) = \Sigma_{\text{gnss}}(t) + \Sigma_{\text{ljo}}(t) \quad (3.4)$$

で近似する．正規化イノベーション二乗（NIS）を

$$d(t) = \mathbf{r}(t)^\top S(t)^{-1} \mathbf{r}(t) \quad (3.5)$$

として計算し、 $d(t) > \gamma$ のとき外れ値疑いと判定する． γ は自由度 3 の χ^2 分布に基づいて設定し、 ΔT は 0.5–1.5 s の範囲で実測により調整する（本研究では初期値として $\Delta T = 1.0$ s を用いる）．

3.3.2.3 down-weight 優先の抑制とヒステリシス

本システムでは、GNSS が大部分の時間帯で有効であるため、誤報（False Alarm）による過剰封鎖は絶対拘束の喪失を招く．そこで、判定結果の反映は **down-weight**（寄与抑制）を優先し、明確な外れ値と判断した場合のみ drop する．

具体的には、外れ値疑いの程度に応じてスケール $\alpha(t) \geq 1$ を設定し、

$$\Sigma'_{\text{gnss}}(t) = \alpha(t) \Sigma_{\text{gnss}}(t) \quad (3.6)$$

として後端へ入力する． $\alpha(t)$ は段階設定（例：1, 10, 100）とし、再現性を確保する．またヒステリシスとして、

- 不合格が連続 N_{bad} 回 \Rightarrow 封鎖（drop もしくは強い down-weight）
- 合格が連続 M_{good} 回 \Rightarrow 解封（通常入力へ復帰）

を適用する．

3.3.3 LIO 信頼度（LIO Confidence）による退化保護

長廊等で LIO が退化している局面では、LIO を参照として完全性検定を行うと誤判定が増加し得る．そこで LIO 信頼度 $C_{\text{ljo}} \in [0, 1]$ を導入し、完全性ゲートの厳しさを調整する．

3.3.3.1 信頼度指標（オンライン proxy）

実装容易性と再現性を重視し、 C_{ljo} は次のいずれか（または組合せ）で定義する．

- **内部統計に基づく指標（取得可能な場合）**：有効特徴点数、残差統計、反復回数、推定共分散の増大など．

- 点群幾何に基づく退化 proxy (内部量が取得困難な場合) : 最近傍 K フレーム点群に対して PCA を行い, 固有値 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3$ の比 (例: $\rho = \lambda_3/\lambda_1$) を退化指標とする. ρ が小さい場合, 強い一次元性を示し長廊退化を疑う.

3.3.3.2 信頼度に基づく調整規則

C_{lio} が低い場合は, 次のいずれかで完全性ゲートを緩和する.

1. Σ_{lio} の拡大: C_{lio} 低下に応じて Σ_{lio} を拡大し, NIS が過敏に反応することを防ぐ.
2. 閾値 γ の緩和: C_{lio} 低下に応じて γ を増大させる.
3. 完全性ゲートの一時停止: $C_{lio} < \tau_C$ のとき, 完全性ゲートを停止し, 可用性ゲートのみによる入力管理へ切り替える.

これにより, LIO 退化局面で「誤った参照に基づいて GNSS を恒常的に否定する」状況を回避する.

3.4 WGS84 から局所 ENU への変換

Supervisor 内部の整合性検定では, GNSS を局所直交座標へ変換する必要がある. 出力は RTAB-Map へ NavSatFix として与えるため, 変換は Supervisor 内部のみに閉じる.

3.4.1 GeographicLib による WGS84→ENU (推奨)

可用状態 S3 が初めて成立した時刻の測位 $(\varphi_0, \lambda_0, h_0)$ を原点として設定し, 各時刻の測位 (φ, λ, h) を ENU へ変換して ${}^{\text{enu}}\mathbf{p}_{\text{gnss}}(t)$ を得る. この方式は構成が単純であり, 姿勢入力を必要としないため, 実装・検証が容易である.

3.4.2 navsat_transform_node の利用 (代替)

ROS 標準ノードを用いて NavSatFix をローカル座標へ変換する方法もある. ただし方位入力 (IMU あるいは LIO 由来 yaw) と座標系整合の要件が増えるため, 本研究では原則として GeographicLib 方式を採用する.

3.5 RTAB-Map への GNSS 拘束注入と三値出力 (Pass / Inflate / Drop)

GNSS は後端グラフ最適化における疎な全局拘束として扱う。Supervisor の出力は、RTAB-Map へ入力する GNSS 拘束の取り扱いを三値で決定する。

- **Pass** : NavSatFix をそのまま出力し、RTAB-Map が通常重みで拘束として利用する。
- **Inflate** : position_covariance を $\alpha(t)$ 倍に拡大して出力し、拘束の重みを弱める (ソフト抑制)。
- **Drop** : 当該時刻の GNSS を出力しない (または RTAB-Map が無視できるフラグを付与する) ことで拘束注入を行わない (ハード抑制)。

これにより、利用不可・外れ値混入の GNSS が後端地図を汚染することを防止しつつ、大部分の高品質 RTK 拘束を最大限活用できる。

3.6 実験と評価

実験フィールド (信州大学農場ハウス)、使用した AGV、データ収集シナリオ (GNSS 良好時、不良時、ハウス内外移動時) を詳細に記述する。

評価に用いた Ground Truth の定義 (例: GNSS 良好時の高精度軌跡、あるいは外部計測機器) を明確にする。

3.6.1 実験条件

3.6.2 比較手法

比較手法: (1) LIO (+Wheel Odom) のみ、(2) LIO+Wheel+GNSS のナイーブな融合 (品質無視)、(3) 提案手法 (品質監視付き融合) の 3 つを用意する。

各シナリオのデータセットに対して 3 手法を適用し、得られた軌跡を Ground Truth と比較

する。

結果の提示: (1) 軌跡比較図 (Fig.)、(2) 定量評価指標 (RMSE, 最大誤差など) の比較表 (Table) を示す。

3.6.3 結果と考察

実験結果に基づき、提案手法 (3) が比較手法 (1)(2) に対して優位性を持つことを明確に論証する。特に、GNSS 品質が悪化した際に、ナイーブ融合 (2) が破綻するのに対し、提案手法 (3) が安定して精度を維持できることを強調する。

GNSS 品質監視モジュールの閾値設定などのパラメータの妥当性についても議論する

第4章 高速分光センシングシステムの構築

この章で、ハードウェア/組み込み技術の高さを明確に示す

4.1 センサユニットのハードウェア構成

本研究で構築するセンサユニットは、植生状態の観察を目的とし、浜松ホトニクス製ミニ分光器 C12880MA を搭載する。生育環境の評価のため、Bosch Sensortec 製 BME280（秋月電子通商製ブレイクアウト基板 AE-BME280）および ELT SENSOR 社製 S300L-3V CO_2 センサを統合した。STMicroelectronics 製マイクロコントローラ（MCU）を使用し、センサデータを収集する。本センサユニットの全体構成を Fig. 4.1 に示す。各センサおよび MCU のインタフェース回路を付録に示す（Fig. A.1, Fig. A.2, Fig. A.3(a), Fig. A.3(b)）。

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、TRG 信号を出力し、第 89 番目の TRG（トリガ）信号立上りで Video 信号を出力する。そのタイミングを Fig. 4.2 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 データを読み取る割り込み駆動方式を用いてきた。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 [13]。しかしこの方式では、取得ごとに CPU が ISR を必ず実行する必要があるため、割り込み応答遅延が主要な性能制約となり、センサが持つ数 MHz 帯の性能を引き出すことは困難である。

この制約を再確認するため、内部 ADC が高速な STM32F446RE でも ISR の方式を検証した。結果は Table 4.1 のとおりであり、割り込みのみでは 25.4 kHz 付近で欠落が発生した。さらに

Table 4.1 Limits of acquisition frequency with conventional methods

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

DMA（Direct Memory Access；CPU を介さずに周辺装置とメモリ間でデータを自動転送する仕組み。以下、DMA）を併用することで CPU 負荷は低減し、取得可能周波数は 130 kHz まで向上したが、遅延は残存し、数 MHz 帯には到達しなかった。以上より、割り込み起動時の遅延は問題であることが確認された。

4.3 提案手法：デュアルスイッチ FSM アーキテクチャ

割り込み遅延を排除するため、タイマ・ADC・DMA をハードウェアトリガで直結するアーキテクチャ（Timer→TRGO→ADC→DMA）は必須である。しかし、この構成には C12880MA 特有の「競合状態（Race Condition）」の問題が存在する。

4.3.1 C12880MA 駆動における「フライングスタート」問題

C12880MA の TRG 信号は、CLK（クロック）信号のミラであり、CLK が供給されている限り TRG も常時出力され続ける。一方、我々の制御フローは「(1) ST=HIGH で積分 → (2) ST=LOW で ADC 読出開始」である。もし、(1) の積分期間中に ADC がすでに DMA（HAL_ADC_Start_DMA()）によって待機状態（Armed）に設定されていた場合、常時入力されている TRG 信号が ADC を即座に誤トリガしてしまう。その結果、ST=HIGH 期間中の無効な暗レベルデータのみが DMA バッファに書き込まれてしまい、正しいスペクトルデータを取得できない。

4.3.2 FSM（有限状態機械、以下、FSM）の設計

この問題を根本的に解決するため、ソフトウェアのタイミング制御に依存せず、2つの独立したハードウェア「スイッチ」によってデータフローを厳密に制御する FSM を設計した。

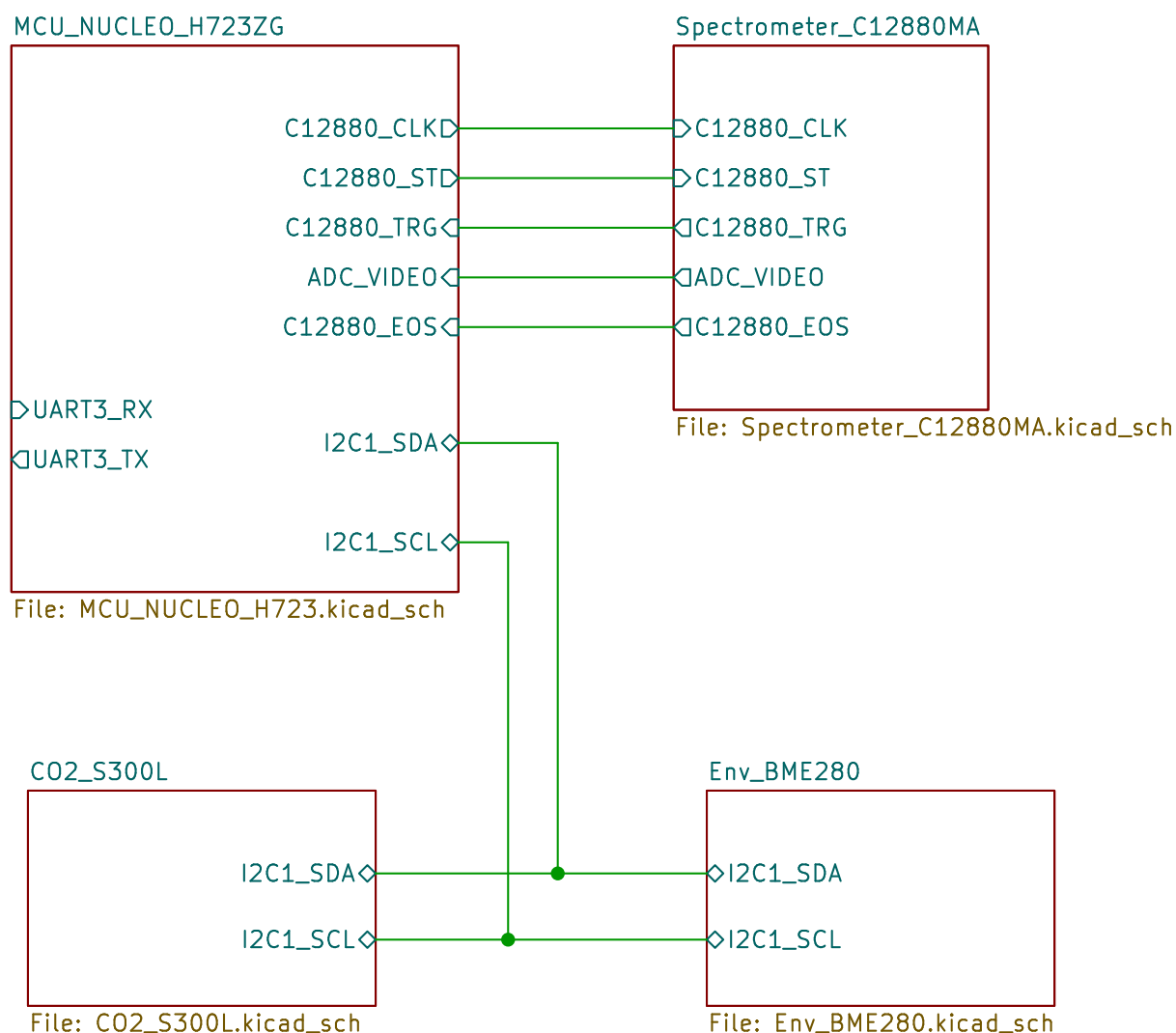


Fig. 4.1 Overall multisensor system architecture

4.3.2.0.1 スイッチ 1：CLK 信号の制御 第 1 のスイッチは、TRG 信号の源である CLK 信号自体を制御する。汎用タイマ（TIM4 等）の PWM モードを用いて C12880MA の CLK 信号を生成する。これにより、HAL_TIM_PWM_Start() と HAL_TIM_PWM_Stop() を呼び出すことで、CLK（ひいては TRG）信号の発生源をソフトウェアレベルで完全にオン・オフ制御することが可能となる。

4.3.2.0.2 スイッチ 2（ゲートの制御）：ST 信号によるブレーキ機能 第 2 のスイッチは、ADC へのトリガ信号を物理的に遮断する「ゲート」である。制御タイマ（TIM1 等）を ADC のトリガスレーブとして設定し、センサの ST 信号を TIM1 の **BKIN**（ブレーキ）ピンに接続する。ブレーキ極性を「アクティブ・ハイ（High でブレーキ作動）」に設定する。これにより、ハードウェアゲートが実現される：

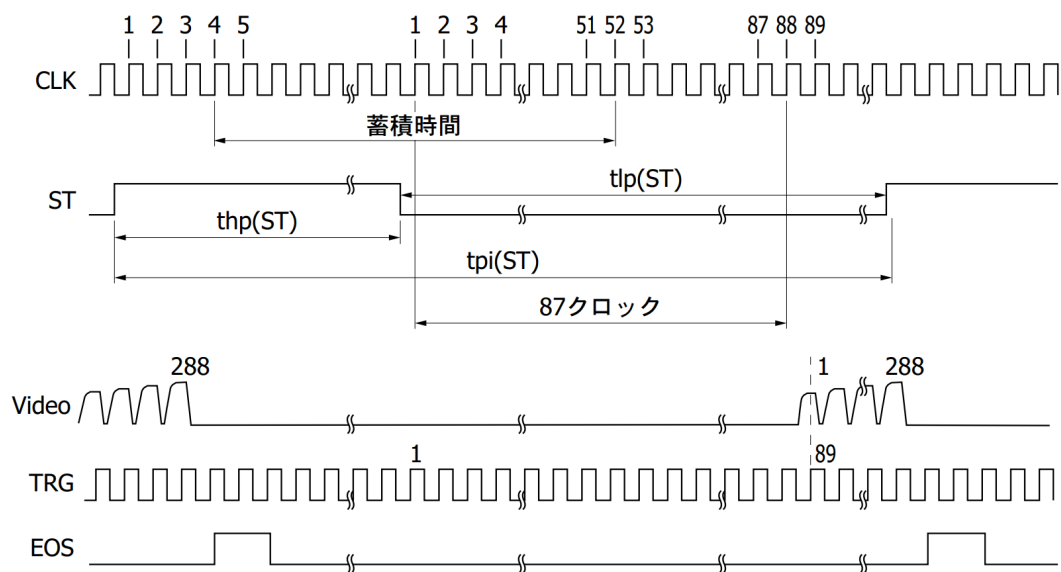


Fig. 4.2 Timing diagram of the C12880MA: excerpted from the Hamamatsu Photonics datasheet[15]

- **ST = HIGH (積分時)**：ブレーキがハードウェアレベルで有効化される。この状態では、たとえ TRG 信号がタイマ (TIM1) に入力されても、ADC を起動するための TRGO (トリガ出力) は遮断される。
- **ST = LOW (読出時)**：ブレーキがハードウェアレベルで解除される。TRGO 出力が許可され、TRG 信号が ADC に到達可能となる。

4.3.3 FSM (有限状態機械) による制御フロー

この「デュアルスイッチ」設計に基づき、極めて堅牢な FSM 制御フローを実装した。主要な状態遷移は以下の通りである。

1. **状態 0: IDLE (待機)**：ST=LOW, CLK(PWM)=OFF. ADC は停止中。ブレーキは解除されているが、TRG 信号源が OFF のため安全。
2. **状態 1: Arming (準備)**：HAL_ADC_Start_DMA() を呼び出し、ADC を待機状態にする。TRG 信号源は OFF のため、誤トリガは発生しない。
3. **状態 2: Integration (積分)**：ST=HIGH に設定。ハードウェアブレーキが即座に作動し、ADC へのゲートが閉じる。その後、HAL_TIM_PWM_Start() で CLK(PWM) を ON にする。TRG 信号が出始めるが、ブレーキによって ADC には到達しない。この状態で任意の時間 (積分時間) だけ待機する。
4. **状態 3: Readout (読出)**：ST=LOW に設定。ハードウェアブレーキが即座に解除され、ADC

へのゲートが開く。ADC は待機状態、TRG 信号はすでに入力中、ゲートは開放。次の TRG 信号の有効エッジで、ADC がハードウェア同期され、DMA 転送が自動的に開始される。

5. **状態 4: Complete (完了) → IDLE へ**: DMA 転送が完了すると、HAL_ADC_ConvCpltCallback 割り込みが発生する。ISR 内で HAL_TIM_PWM_Stop() を呼び出し、CLK(PWM) を **OFF** にする。ADC は HAL ライブラリによって自動的に停止される。システムは安全に状態 0 (IDLE) に戻る。

この「ブレーキゲート」と「CLK 制御」を組み合わせたデュアルスイッチ FSM は、C12880MA の「フライングスタート」問題をハードウェアレベルで解決し、正確な同期を実現した。このアーキテクチャが次節で述べる高速データ取得の基盤である。

4.4 性能検証

展示波形とデータ、明確に 5MHz 采样率

4.4.1 STM32F446RE でのアーキテクチャ検証

従来手法では 130 kHz が限界であった STM32F446RE に新アーキテクチャを実装したところ、0.5 MHz および 1 MHz での安定したデータ取得に成功した。この結果から、従来手法の主要な性能制約が割り込み起動遅延と ISR 処理時間に起因していたこと、および本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 の性能から、達成可能な最大周波数は理論上およそ 1.5 MHz である。

4.4.2 STM32H723ZG での 5 MHz 高速取得の実現

次に、最大 5 MSPS の ADC を搭載する STM32H723ZG に同アーキテクチャを実装した。H7 シリーズ特有のキャッシュ・コヒーレンシ問題に対処するため、DMA の転送先バッファを非キャッシュの DTCM (Data Tightly Coupled Memory) 領域に配置し、さらに ADC のハードウェアキャリブレーションとトリガ遅延設定を最適化した。その結果、目標としていた 5 MHz でのスペクトルデータ連続取得に成功した。

4.4.3 ADC 性能とサンプリングレートの検証

本システムが目標とする 5 MHz のデータレートを達成可能であることを，MCU の ADC 性能とセンサのタイミング制約から検証する．

センサに供給するクロックが 5 MHz であるため，データ更新周期 $T_{\text{period}} = 1/5 \text{ MHz} = 200 \text{ ns}$ である．しかし，センサのデータシートによれば，アナログ出力（VIDEO）信号が安定しているのは TRG 信号の立ち上がりエッジを中心とした半周期のみである．したがって，ADC が正確な電圧値をサンプリングできるサンプリング可能時間幅 T_{stable} は，わずか $200 \text{ ns}/2 = 100 \text{ ns}$ となる．この厳しい制約を満たすため，ADC の動作を「サンプリング」と「変換」の二段階に分けて評価する必要がある．

1. サンプリング時間： $T_{\text{sampling}} \leq 100 \text{ ns}$ ．
2. 総変換時間： $T_{\text{total}} < 200 \text{ ns}$ ．

これらの条件，特に総変換時間 200ns の制約を満たすには，高速な ADC クロックが不可欠である．本研究では，サンプリング時間を 2.5 サイクル，変換時間を 12.5 サイクル（12 ビット分解能）に設定したため，合計 15 サイクルが必要となる．ここから逆算すると，要求される ADC クロック周波数 f_{ADCK} は次式のようになる．

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

STM32H723ZG のデータシート [16] によれば，12 ビット ADC の最大クロック周波数 f_{ADC} は 75 MHz と規定されている．この規定周波数で安定動作を検証した結果，C12880MA に入力する CLK 信号を 4 MHz 以下にする必要があった．センサの仕様上限である 5 MHz での高速取得を試みるため，ADC のカーネルクロックを 96 MHz に設定した．これはデータシートの仕様を超える値であるが，実験環境下での安定動作を実測により確認した．

この 96 MHz のクロック設定に基づき，実際の動作時間を再計算すると以下のようになる．

$$T_{\text{sampling}} = \frac{2.5}{96 \text{ MHz}} \approx 26.0 \text{ ns} \quad (4.2)$$

$$T_{\text{total}} = \frac{2.5 + 12.5}{96 \text{ MHz}} = \frac{15}{96 \times 10^6} \approx 156.3 \text{ ns} \quad (4.3)$$

計算の結果，サンプリング時間は 26.0ns であり，要求される 100ns の安定時間窓を十分に満たしている．また，総変換時間は 156.3ns であり，これも次のデータ周期である 200ns 未満である．

Table 4.2 Acquisition frequency (proposed architecture)

Method	MCU	Achieved freq.
Proposed arch.	STM32F446RE	1.5 MHz (theory)
Proposed arch.	STM32H723ZG	5.0 MHz (achieved)

以上の理論評価と測定結果により，本システムが 5 MHz で安定してデータ取得できることを確認した．

4.5 その他のセンサインターフェース

BME280, S300L, GNSS, IMU, Wheel Odometry のデータ取得方法について簡潔に述べる。

第5章 生態環境マッピング

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態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、データ取得した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ものである。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実証することである。

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。

1. **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（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位置情報（GNSS/LiDAR オドメトリ）を割り当てる。
2. **データの正規化:** 各環境データの微細な変動を視覚化するため、取得データの最小値および最大値を用いてカラーマップのダイナミックレンジを動的に調整する。
3. **可視化:** 2次元平面（XY 平面）上の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畳表示する。

5.2.1 スペクトル特徴による植生検出

Fig. 5.5 に示す分光データのピーク波長マップにおいて、軌跡上の色が頻繁に変化していることが確認できる。詳細に見ると、約 550 nm（緑色帯域）にピークを持つデータ点と、それ以外の波長帯域（青色や近赤外領域など）にピークを持つデータ点が混在している。これは、AGV が桑の木の下を通過した際には葉緑素による緑色反射が支配的になり、株間の土壌や空隙を通過した際には異なる反射特性が観測されたことを示唆している。この結果は、本システムが移動しながら、対象物の材質や植生の有無といった光学的な特徴を高分解能に識別可能であることを実証している。

5.2.2 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、データの正規化表示により、以下の微細な環境特性が明らかになった。

- **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**が明瞭に観測された。これは、提案センサシステムがノイズに埋もれることなく、わずかな物理的変動を空間分布として捉えられていることを示している。
- **CO₂ 濃度の空間勾配:** Fig. 5.3 に示すように、CO₂ 濃度はおよそ 400~510 ppm の範囲で推移した。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や、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。

以上の結果より、提案システムは、GNSS 信号と環境センサデータを高精度に統合し、圃場内の空間的な環境マップを生成する能力を有していることが確認された。本実験は手動走行によるものであったが、得られたマップの品質は、自律走行システムに統合された際にも同様に高精細な環境モニタリングが可能であることを示唆する期待通りの結果（expected result）である。

5.3 生成された生態環境マップ

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、ハウスの側面は換気のため開放された状態であった。

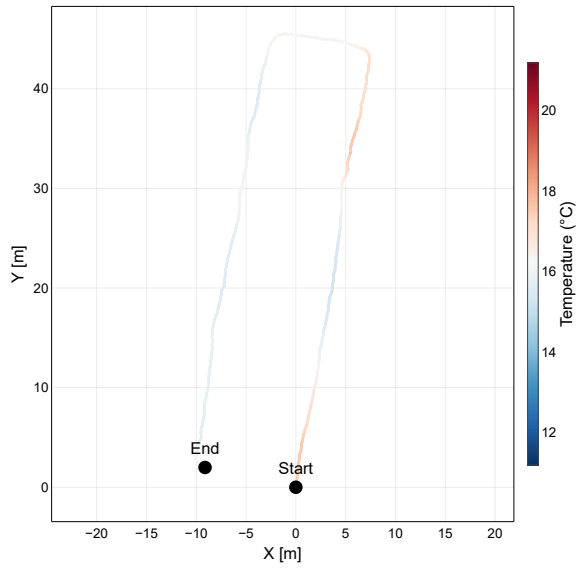


Fig. 5.1 Temperature map (°C).

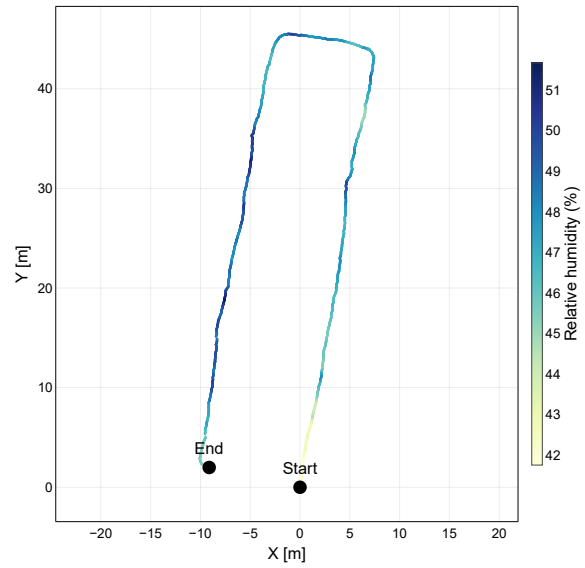


Fig. 5.2 Relative humidity map (%).

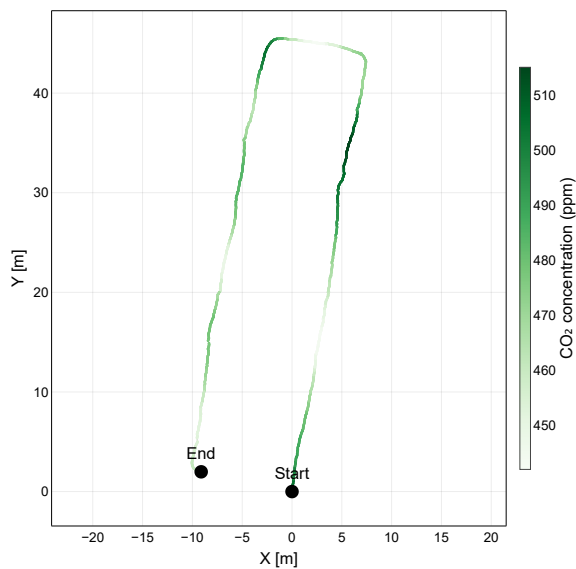


Fig. 5.3 CO₂ concentration map (ppm).

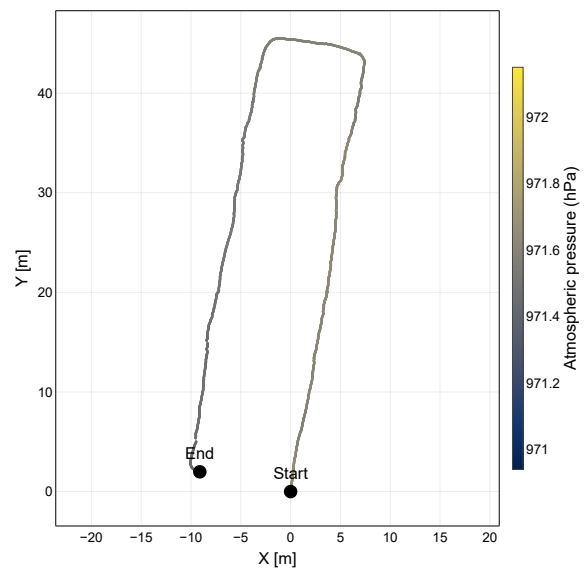


Fig. 5.4 Atmospheric pressure map (hPa).

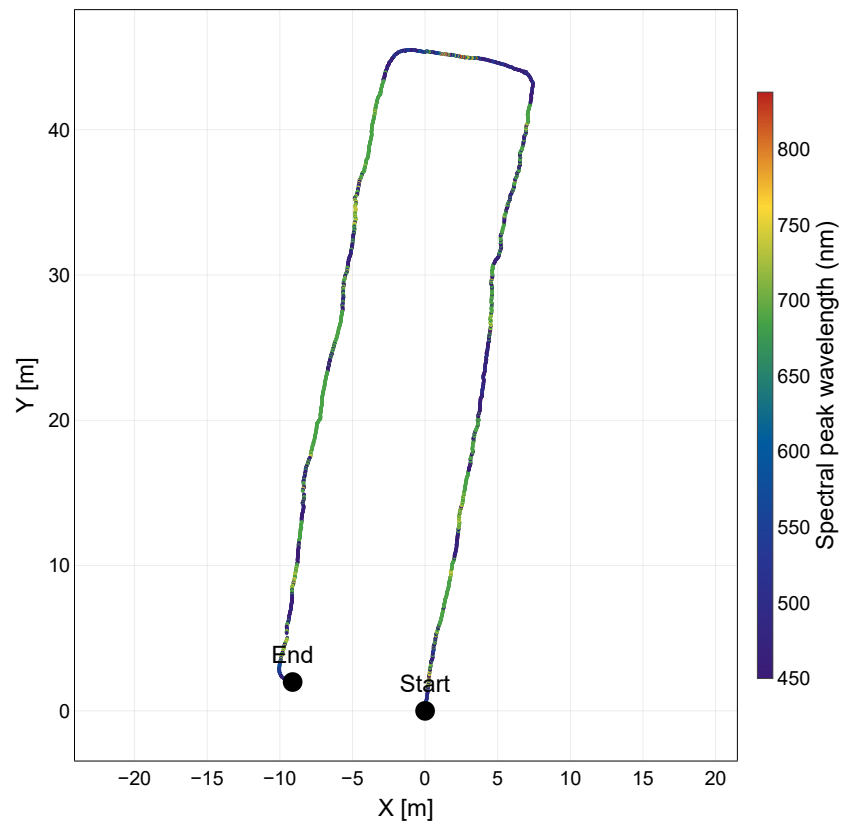


Fig. 5.5 Spectral peak wavelength map (nm). Frequent colour changes along the trajectory reflect differences in reflectance characteristics between vegetation (greenish regions) and soil or gaps (bluish regions).

5.4 考察

第 6 章 結論 (Conclusion)

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

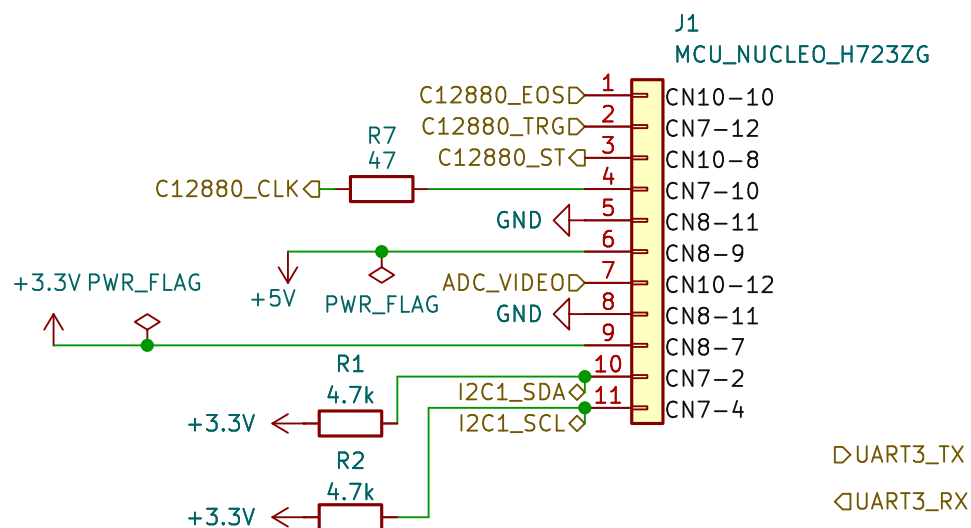
- [1] 農林水産省. スマート農業の展開について. https://www.soumu.go.jp/main_content/000775128.pdf. (Accessed on 16/6/2025).
- [2] 農林水産省. 農業労働力に関する統計. <https://www.maff.go.jp/j/tokei/sihyo/data/08.html>. (Accessed on 16/6/2025).
- [3] 農林水産省. 農業データの利活用の推進について. <https://www.maff.go.jp/j/kanbo/smart/attach/pdf/index-146.pdf>. (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] J. Zhang and S. Singh. LOAM: Lidar Odometry and Mapping in Real-time. *Robotics: Science and Systems* 2.9 (2014).
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] W. Xu and Y. Cai. FAST-LIO2: Fast Direct LiDAR-inertial Odometry. *IEEE Transactions on Robotics* 38.4 (2022), pp. 2053–2073.
- [9] 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.
- [10] M. Li et al. Multi-sensor Fusion for Agricultural Robot Localization: A Review. *Computers and Electronics in Agriculture* 170 (2020).
- [11] P. Ray. A Review of Smart Greenhouse Farming by Using Sensor Network Technology. *IEEE Internet of Things Journal* 4.5 (2017).

- [12] C. Tim et al. A Small Flying IoT Node for Real-Time Spectral Monitoring in Smart Agriculture. IEEE Internet of Things Journal (2023).
- [13] 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.
- [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] 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

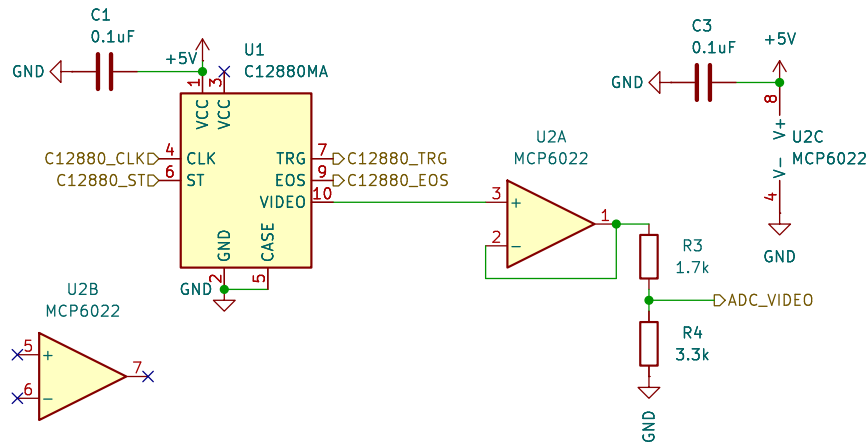


USART3 (PD8/PD9) is routed to the on-board ST-LINK Virtual COM Port (VCP).
 Power and UART share the same Micro-USB cable.
 Default solder bridges: PD8=SB19 ON; PD9=SB12 ON.

Power source (USB mode):

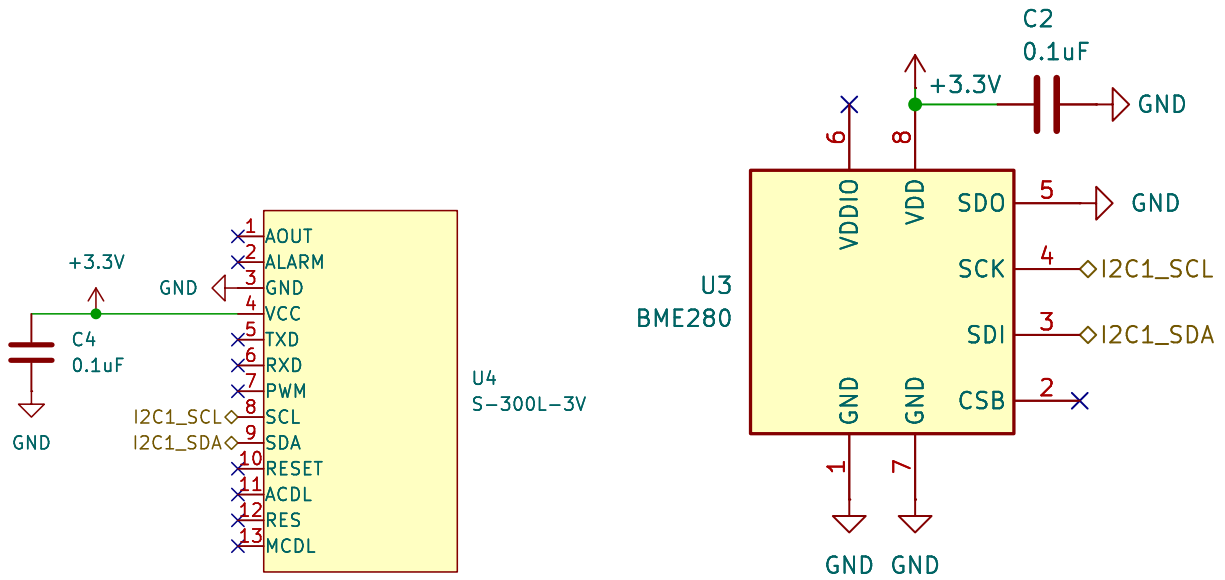
- +5V_USB: USB VBUS from on-board ST-LINK (Micro-USB), provided on CN8 5V pin (output).
- +3V3: Generated by the NUCLEO on-board regulator, provided on CN8 3V3 pin (output).

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.