

令和 7 年度
修士学位論文

論文用テンプレート

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	課題：農業環境における自律移動ロボットの自己位置推定	1
1.3	先行研究とその限界	2
1.4	本研究の目的と新規性	3
1.5	本論文の構成	3
第2章	高速・高信頼センシングシステムの構築	4
2.1	システム全体の概要	4
2.2	センサユニットの開発	4
2.2.1	高速分光センサ駆動モジュールの開発における従来の課題	4
2.2.2	提案手法：デュアルスイッチ FSM アーキテクチャ	5
2.3	その他のセンサインターフェース	9
第3章	提案手法：GNSS品質監視に基づく LIO–Graph SLAM 統合自己位置推定	11
3.1	問題設定と故障モード	11
3.2	全体システム構成（FAST-LIO 前端 + RTAB-Map 後端）	12
3.2.1	TF 構成	12
3.2.2	データフロー	12
3.3	GNSS Supervisor の設計：可用性ゲート + 完全性ゲート + LIO 信頼度	13
3.3.1	可用性ゲート	13
3.3.2	完全性ゲート（Integrity Gate）：短時間増分整合性検定	14
3.3.3	LIO 信頼度（LIO Confidence）による退化保護	15
3.4	WGS84 から局所 ENU への変換	16
3.4.1	GeographicLib による WGS84→ENU（推奨）	16
3.4.2	navsat_transform_node の利用（代替）	16
3.5	RTAB-Map への GNSS 拘束注入と三値出力（Pass / Inflate / Drop）	17

3.6	robot_localization を用いない理由	17
3.7	実装手順（工程指針）	18
3.8	評価設計（消融比較の概要）	18
第 4 章	実験による評価 (Experimental Evaluation)	19
4.1	実験設定	19
4.2	定量的評価：自己位置推定精度の比較	19
4.2.1	考察	19
第 5 章	生態環境マッピング	20
5.1	マッピング手法と実験条件	20
5.2	生成された生態環境マップ	20
5.3	マッピング結果の考察	23
5.3.1	スペクトル特徴による植生検出	23
5.3.2	微気象データの安定性と環境勾配	23
第 6 章	結論 (Conclusion)	25
6.1	本研究の成果	25
6.2	今後の課題と展望	25
参考文献		26
謝辞		27
付録 A	インターフェース回路	28

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、自律移動ロボット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 (Automatic Guided Vehicle, 以下, 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 課題：農業環境における自律移動ロボットの自己位置推定

AGV による圃場モニタリング自動化の可能性を示す一方で、屋外不整地、特に農業用ハウスのような半構造化環境における自己位置推定の困難性を問題提起する. 不整地でのスリップによるオドメトリ誤差、ハウス骨格による GNSS 信号の遮蔽・マルチパス、それに伴う信号品質の動的な変動.

圃場モニタリングを自動化するためには、ロボットが圃場での自律走行や取得したセンサデータを空間座標に正確に付与する必要がある. しかし、農業環境、特に農業用ハウスのような半構造化環境においては、自己位置推定の成立条件が容易に損なわれる. 主な要因は以下のとおりである.

第一に、屋外不整地では、路面の凹凸、ぬかるみ、段差等により車輪スリップや沈下が発生し

やすく、Wheel Odometry に基づく推定誤差が蓄積する。第二に、ハウス骨格（鉄骨フレーム）や被覆材、周辺構造物に起因して GNSS 信号の遮蔽・反射（マルチパス）が生じ、測位品質が時間的に大きく変動する。このため、GNSS の測位結果が連続的に利用できない区間や、外れ値が断続的に混入する区間が発生し得る。第三に、ハウス内の通路（長廊）のように幾何学的特徴が単調な環境や、ハウス間の移動時における特徴点群が少ない環境では、3D-LiDAR に基づくスキャンマッチングの可観測性が低下して推定が退化し、ドリフトが増大する。

以上より、農業用ハウス環境では、GNSS と LiDAR の双方が同時あるいは交互に劣化し得るため、単純なセンサ統合では推定の破綻や跳変が生じ、取得データの空間整合性（マッピング信頼性）を損なう。したがって、測位品質の変動を前提として、センサの信頼度に応じて融合系の寄与を動的に制御する枠組みが必要である。

1.3 先行研究とその限界

近年、3D-LiDAR と IMU を用いた LiDAR-Inertial Odometry (LIO) が盛んに研究されており、FAST-LIO2 に代表される手法は、高頻度な状態推定と高い計算効率を両立しつつ、屋外環境での自己位置推定に広く用いられている。一方で、LIO は相対推定であるため、長時間走行ではドリフトが不可避であり、環境の幾何的退化（長廊・反復構造・観測方向の偏り等）により推定誤差が急増することがある。

この課題に対し、GNSS を絶対位置制約として LIO と融合する研究が多数報告されている。しかし、多くの手法は GNSS が安定して利用可能であること、あるいは測位誤差が概ねガウス分布に従うことを暗黙的に仮定し、測位品質が急変する状況（遮蔽・マルチパス・Fix/Float 切替等）への対処が十分に体系化されていない。農業用ハウス環境では、GNSS の測位品質が時变かつ断続的に劣化するため、固定的な測定雑音設定や単純な外れ値除去のみでは、推定の跳変や不整合を抑制できない可能性が高い。

また、本研究室の先行研究では、環境センサおよび分光センサを統合した計測ユニットを ROS 上で運用し、圃場の定点におけるデータ収集が実施された。しかし、圃場全域を対象とした空間マッピングや、自律移動を前提としたロバストな自己位置推定の観点では、GNSS 品質変動下での推定安定化、およびセンサデータの空間付与精度の検証が課題として残されていた。

1.4 本研究の目的と新規性

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, Wheel Odometry, および品質情報を伴う GNSS を統合し、高連続性かつ高完全性（High Integrity）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、および分光ピーク波長などの生態環境情報を圃場空間へ投影し、高分解能な生態環境マップを生成することを目的とする。

本研究の新規性は以下の 3 点に整理できる。

1. 農業用ハウス環境における GNSS 測位品質の時変変動（例：Fix/Float 切替、衛星数低下、外れ値混入）を、実測データに基づき分析し、融合設計に必要な特性として整理する点。
2. GNSS 品質情報（協分散等）および時系列の整合性検定に基づき、融合系への寄与を動的に制御する GNSS 品質監視・融合制御（Supervisor）を提案し、ヒステリシスを伴う状態遷移を含めて実装する点。
3. 提案手法を実環境データで評価し、軌跡の跳変抑制、ドリフト低減、および生態環境マップの空間整合性向上を定量的に示す点。

1.5 本論文の構成

本論文は全 7 章から構成される。第 2 章ではロボットプラットフォームおよび各種センサ構成、ならびにデータ取得・時刻同期の方針を述べる。第 3 章では農業用ハウス環境における GNSS および LiDAR の退化要因を整理し、本研究で扱う問題設定と評価指標（可用性・完全性等）を定義する。第 4 章では退化感知に基づく GNSS 品質監視・融合制御と、EKF を用いた統合推定フレームワークを提案する。第 5 章では実験条件、比較手法、評価指標に基づく定量評価結果を示し、考察を行う。第 6 章では得られた軌跡を用いた生態環境空間マッピングの結果を示し、位置推定誤差がマップ信頼性へ与える影響を論じる。第 7 章では本研究の結論と今後の課題を述べる。

第2章 高速・高信頼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

2.1 システム全体の概要

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。

2.2 センサユニットの開発

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ークアウト基板 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. 2.1 に示す。各センサおよび MCU のインター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)).

2.2.1 高速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. 2.2 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

Table 2.1 Limits of acquisition frequency with conventional methods

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

でのデータ取得が報告されている [4]. 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 2.1 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 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。

2.2.2 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。

2.2.2.1 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。

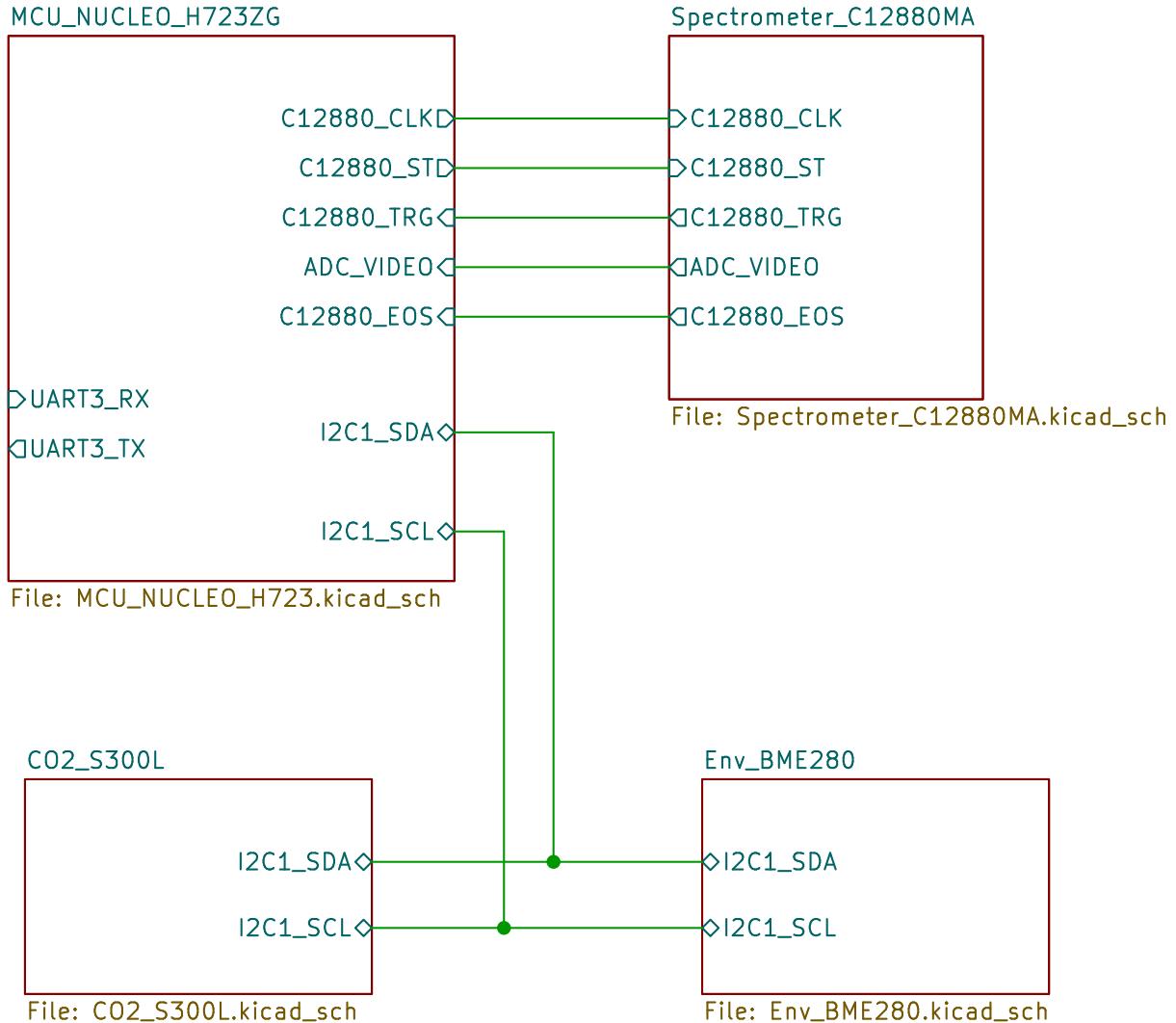


Fig. 2.1 Overall multisensor system architecture

2.2.2.2 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。

2.2.2.2.1 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 信号自身を制御する。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。

2.2.2.2.2 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

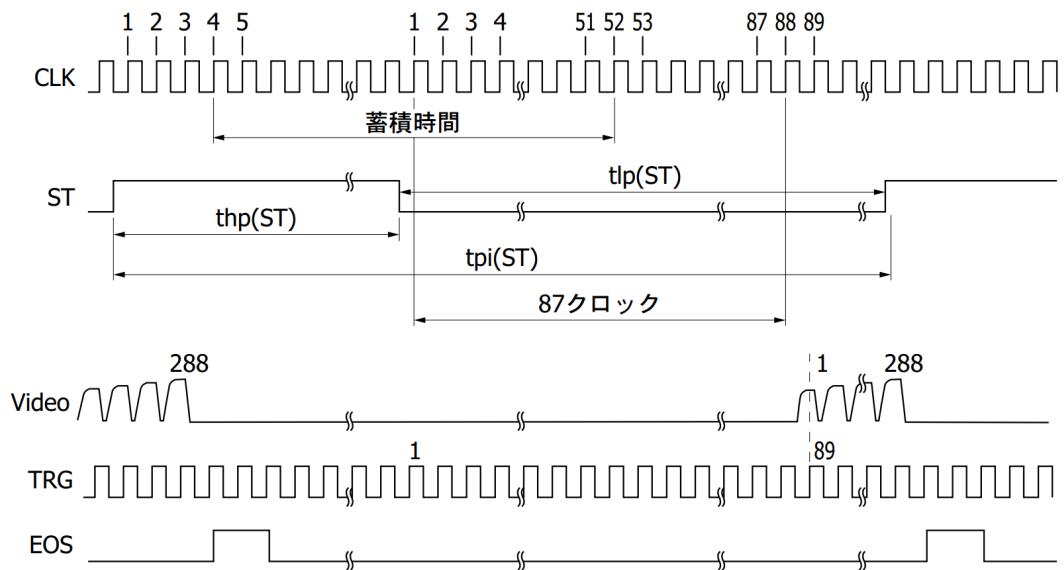


Fig. 2.2 Timing diagram of the C12880MA: excerpted from the Hamamatsu Photonics datasheet[5]

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：

- **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 (読み出時)**：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。

2.2.2.3 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。

2.2.2.4 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。

2.2.2.5 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。

2.2.2.6 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。

$$f_{\text{ADCK}} > \frac{15}{200 \text{ ns}} = 75 \text{ MHz} \quad (2.1)$$

STM32H723ZG のデータシート [6] 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 5MHz 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。

$$T_{\text{sampling}} = \frac{2.5}{96 \text{ MHz}} \approx 26.0 \text{ ns} \quad (2.2)$$

$$T_{\text{total}} = \frac{2.5 + 12.5}{96 \text{ MHz}} = \frac{15}{96 \times 10^6} \approx 156.3 \text{ ns} \quad (2.3)$$

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。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。

2.3 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。

Table 2.2 Acquisition frequency (proposed architecture)

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

第3章 提案手法：GNSS品質監視に基づく LIO-Graph SLAM 統合自己位置推定

3.1 問題設定と故障モード

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。

3.2 全体システム構成 (FAST-LIO 前端 + RTAB-Map 後端)

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。

3.2.1 TF 構成

本システムでは TF を次のように固定する。

- FAST-LIO : `odom` → `base_link` (高頻度相対オドメトリ)
- RTAB-Map : `map` → `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 : `base_link` → `lidar`, `base_link` → `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。

3.2.2 データフロー

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

3.3 GNSS Supervisor の設計：可用性ゲート + 完全性ゲート + LIO 信頼度

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

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

で近似する。正規化イノベーション二乗（NIS）を

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

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 $C_{\text{lio}} \in [0, 1]$ 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_{lio} 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: $C_{\text{lio}} < \tau_C$ 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 robot_localization を用いない理由

robot_localization は連続出力の統合オドメトリ生成と TF 管理に有用である。しかし本構成では、

- FAST-LIO が高頻度な `odom`→`base_link` を提供し、制御に十分な連続性を満たす。
- RTAB-Map が `map`→`odom` を提供し、全局整合とループ閉合を担う。
- 本研究の本質は「後端へ注入する GNSS 拘束の選別」であり、EKF による中間融合は不要である。

したがって robot_localization を追加すると、TF の二重発行や参照座標系の競合により不安定化するリスクが増える。本研究では、TF 責務を FAST-LIO と RTAB-Map へ明確に分離し、Supervisor を後端手前に配置する最小構成を採用する。

3.7 実装手順（工程指針）

実装は以下の順で段階的に進める。

1. GNSS ログの拡充：fix 状態, 衛星数, RTCM age, 共分散（および可能なら拡張ステータス）を確実に記録する。
2. Availability Gate の実装：S0 遮断とヒスティリシスにより, 利用不可区間での拘束注入を防止する。
3. Integrity Gate の実装：ENU 変換を導入し, 短時間増分整合性検定 + down-weight 優先 + ヒスティリシスを実装する。
4. LIO 信頼度の導入：退化 proxy を実装し, 完全性ゲートの緩和／停止を切替可能とする。
5. RTAB-Map 接続：Pass / Inflate / Drop の三値出力を NavSatFix の配信方法に反映し, 拘束注入の挙動を検証する。

3.8 評価設計（消融比較の概要）

Supervisor の有効性を定量的に示すため, 同一ログ (bag) に対し次の構成で比較する。

- **E0** : FAST-LIO のみ (GNSS 拘束なし)
- **E1** : RTAB-Map + 生 GNSS (ゲートなし)
- **E2** : RTAB-Map + Availability Gate (利用不可のみ抑制)
- **E3** : RTAB-Map + Availability + Integrity + LIO 信頼度 (提案手法)

指標は, (i) 軌跡の不連続イベント数 (位置ジャンプ発生回数), (ii) 最大不連続量, (iii) GNSS 拘束採用率 (Pass 率) と封鎖継続時間分布, (iv) ループ閉合が得られる場合は閉合誤差, (v) 後端最適化残差 (拘束整合度) 等を用いる。

第4章 実験による評価 (Experimental Evaluation)

4.1 実験設定

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。

4.2 定量的評価：自己位置推定精度の比較

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。

4.2.1 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 5 章 生態環境マッピング

本章では、第 2 章で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。

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 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。

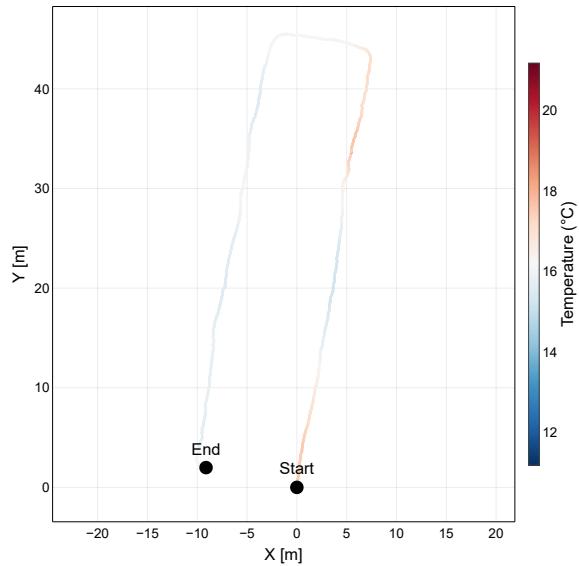


Fig. 5.1 Temperature map ($^{\circ}\text{C}$).

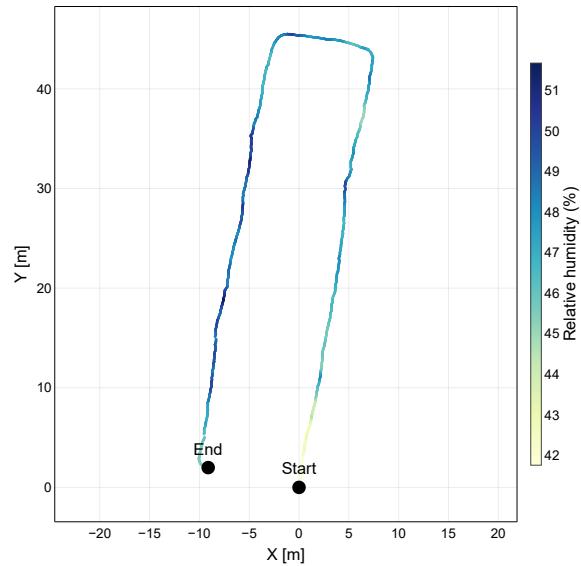


Fig. 5.2 Relative humidity map (%).

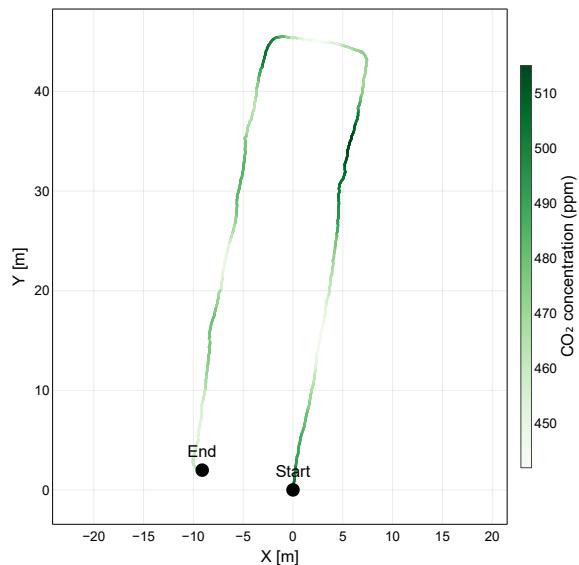


Fig. 5.3 CO₂ concentration map (ppm).

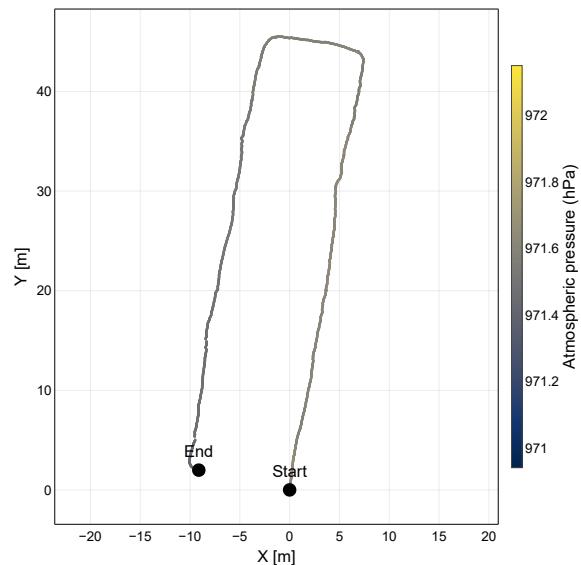


Fig. 5.4 Atmospheric pressure map (hPa).

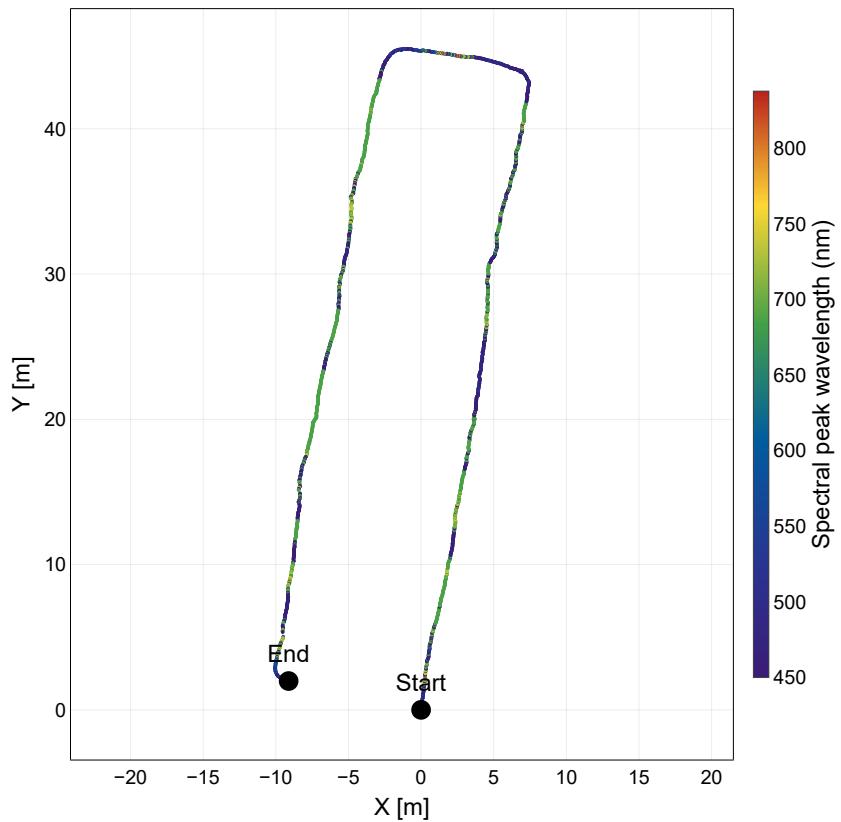


Fig. 5.5 Spectral peak wavelength map (nm). Frequent colour changes along the trajectory reflect differences in reflectance characteristics between vegetation (greenish regions) and soil or gaps (bluish regions).

5.3 マッピング結果の考察

5.3.1 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、株間の土壤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。

5.3.2 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。それでもかかわらず、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。

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。

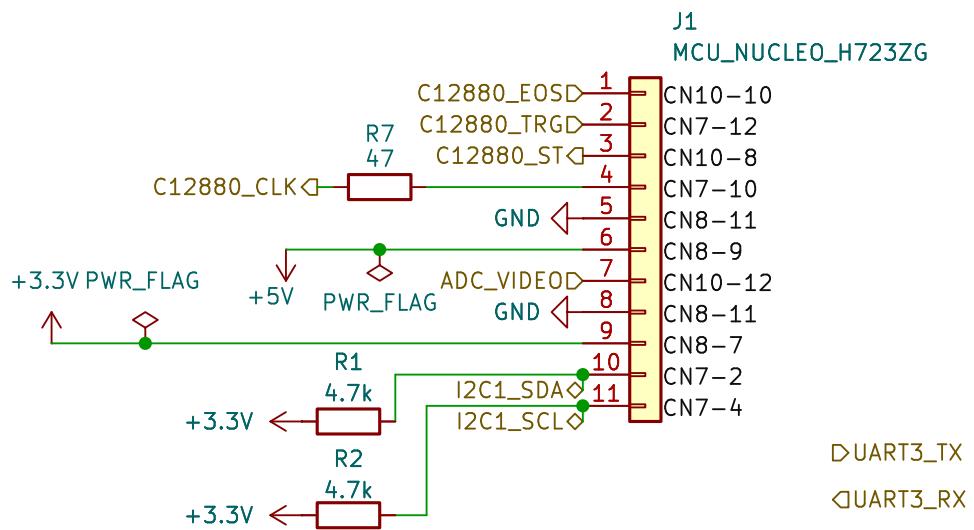
参考文献

- [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] 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] 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).
- [6] 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

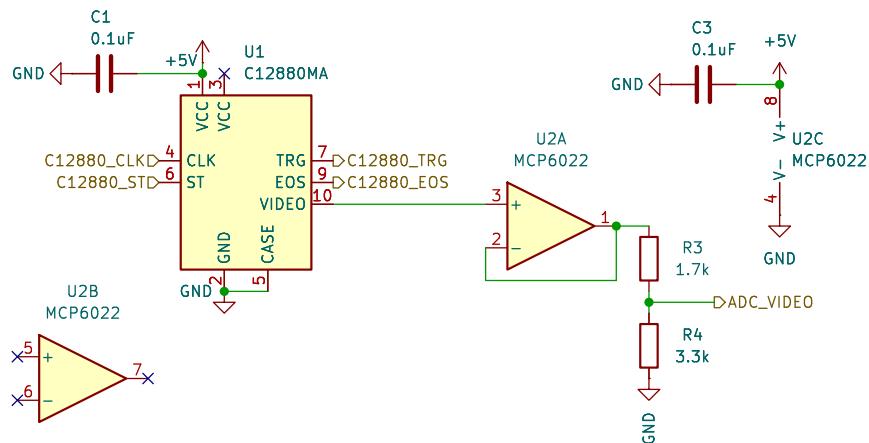
付録 A インタフェース回路



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.

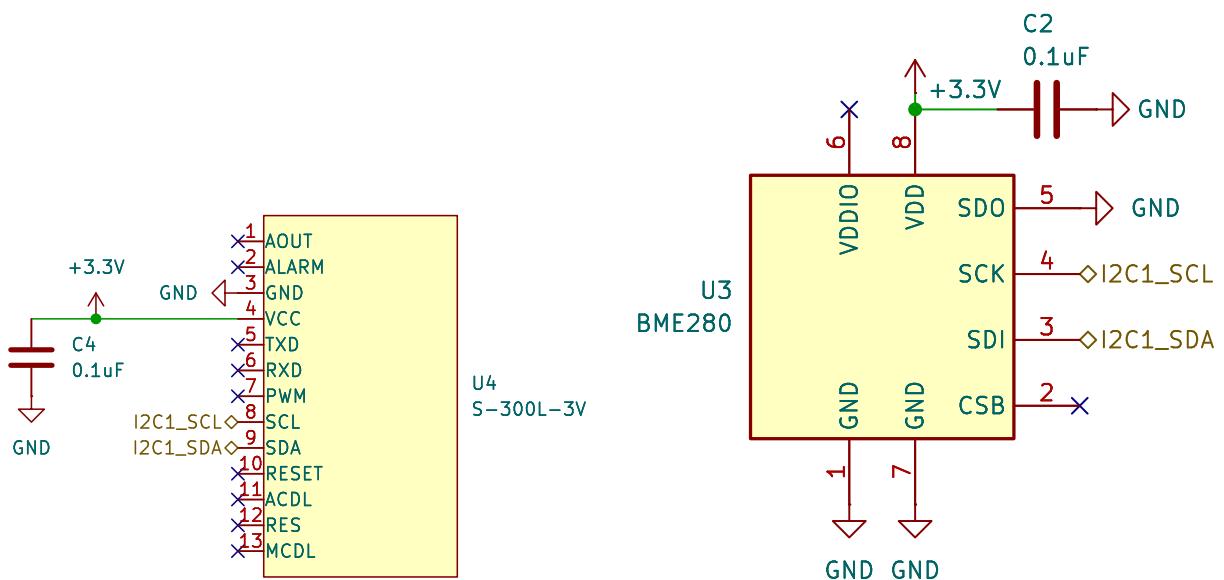
- Power source (USB mode):
- +5V_USB: USB VBUS from on-board ST-LINK (Micro-USB), provided on CN8 5V pin (output).
 - +3V3: Generated by the NUCLEO on-board regulator, provided on CN8 3V3 pin (output).

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.