

非GNSS環境下における高精度自己位置計測システムの技術研究開発（1/4）

研究の背景

- GNSS電波が受信できない**非GNSS環境下では自己位置の計測精度が著しく低下**する。
- 現時点では非GNSS環境下の自己位置は、IMU（加速度計）によって計測されている。
- 非GNSS環境下における自己位置計測精度の向上では、国内外において①GPSリピーター、②Visual SLAM、③Beacon、④高性能IMU、⑤ジャイロ스코プ等の技術の適用がすでに研究されているものの、必ずしも大幅な精度向上には至っていない。

研究の目的

GNSSが受信できないトンネル坑内でも、50km/h走行する車両の自己位置を、トンネル延長に関わらず、誤差±5cm以内にて測位できる計測システムを開発する。

本研究では、画像と距離を同時に計測できるセンサフュージョンシステムによって、非GNSS環境下における自己位置計測の安定的な精度向上を目指す。

令和7年度：研究の課題と解決策

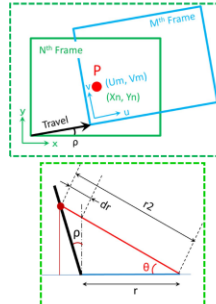
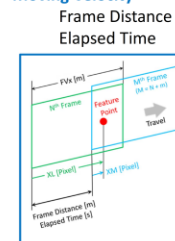
- 2023（R5）年10月に、**画像と距離を同時に計測できるセンサフュージョンシステム**がリリース。
- 本研究は、非GNSS環境における高精度な自己位置推定を目的として、同光軸センサフュージョン方式とDirect-SLAM技術の開発を進めている。この目的達成のため、2024年度以降、技術開発をA～Cの3段階で計画的に推進している。
 - Aフェーズ：自己位置計測システム試作機の製作（基礎構築・誤差特性の整理）
 - Bフェーズ：自己位置計測システム試作機の検証（実トンネル実証（つくば）による動作検証）
 - Cフェーズ：自己位置計測システム実用機的设计（誤差補償アルゴリズムの解析と理論モデル化）

分光プリズム

7. Self-Position Estimation New Concept ?

Moving Direction
Yaw

Moving Velocity
Frame Distance
Elapsed Time



【1年目：2024（R6）年度】（予算:3000万円/年）

- 研究に用いる**センサフュージョンシステムの計測性能・実測精度の検証**。
- 自己位置計測システムに用いる**センサフュージョンシステムの改良**。
- センサフュージョンシステムによる**自己位置計測システム（試作機）の設計**。

【3年目：2026（R8）年度】（予算:5000万円/年）

- センサフュージョンシステムによる**自己位置計測システム（実用機）の製作**。
- トンネル走行試験による**自己位置計測システム（実用機）の計測精度の実証**。

【2年目：2025（R7）年度】（予算:5000万円/年）

- センサフュージョンシステムによる**自己位置計測システム（試作機）の製作**。
- 実験による**自己位置計測システム（試作機）の計測精度の検証**。
- センサフュージョンシステムによる**自己位置計測システム（実用機）の設計**。

**※ 2027（R9）年度～
GNSSに頼らない自己位置計測
システムの運用**

図1 画像と距離を同時に計測できるセンサフュージョンシステム
出典：JVC Kenwood、映像+測距によるセンサフュージョンカメラカタログ

非GNSS環境下における高精度自己位置計測システムの技術研究開発（2/4）

令和7年度：進捗状況

Aフェーズ：自己位置計測システム試作機の製作

RGBカメラとToFセンサを同一光軸上に配置し、可視光画像と距離情報をピクセル単位で一致取得する構成を完成させた。この構成により、距離・輝度・幾何の誤差要因を統合的に補正するアルゴリズムを確立し、模擬環境における試験（京都大学風洞実験室）で安定して±50 mm級の空間再構成精度を確認した。

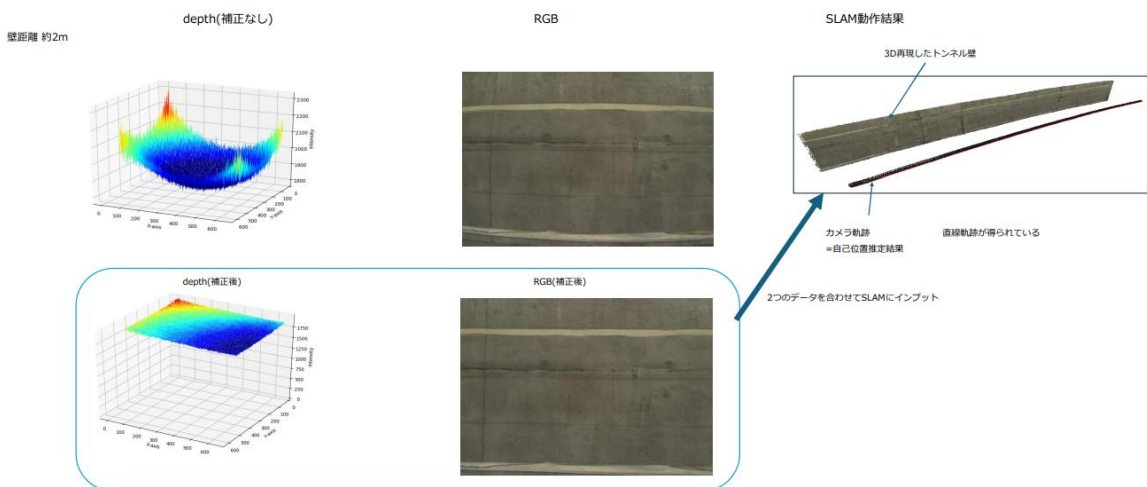


図1 Depth補正前後のトンネル模擬壁

Bフェーズ：自己位置計測システム試作機の検証

Bフェーズでは、つくば実験トンネルにおいて、同光軸RGB-ToFセンサフュージョンシステムを車両に搭載し、実環境での走行実証を行った（図3）。走行時には、補助照明を併設し、トンネル内で取得した自己位置推定結果と、あらかじめ壁面側にマーキングした基準位置との整合性を評価した。壁面との距離条件を1.5 m/2.0 m/2.5 mに変化させ、さらに最大80 km/hまで走行速度を変化させた複数条件下で、Direct-SLAMによるオフライン動作検証を実施した。その結果、照度変動や壁面反射率の差が存在する実環境下においても、各条件で軌跡が連続的に再構成され、従来の特徴点方式SLAM（例：ORB-SLAM3）では追従が途切れる条件下でも、Direct-SLAMは追従性を維持できることを確認した。

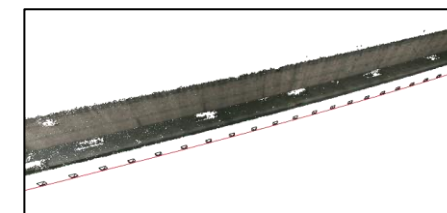
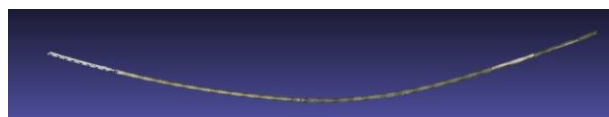
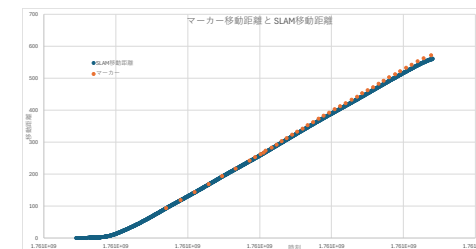
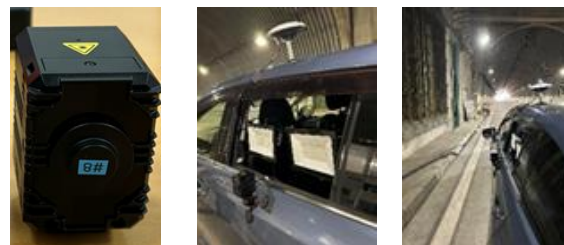


図3 つくば実験トンネルにおけるセンサフュージョンシステム搭載車両の計測構成

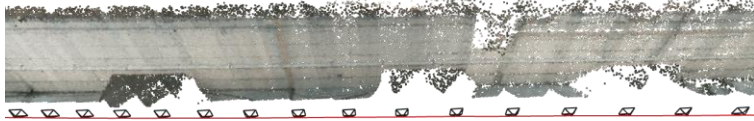
図2 Direct-SLAM軌跡比較（短距離1～10m区間）

非GNSS環境下における高精度自己位置計測システムの技術研究開発（3/4）

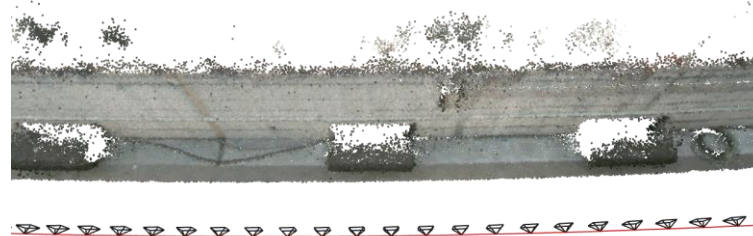
Cフェーズ：自己位置計測システム実用機的设计

中間評価で指摘された事項については、計画の見直し・試験拡張・体制明確化により着実に対応を進めている。Direct-SLAMを用いた同光軸センサフュージョン方式は、照度変動・反射差・特徴点不足といった従来の制約を克服し、IMU方式に比して物理的整合性・安定性・省力性に優れることを確認した。今後はCフェーズにて、物理的誤差モデルを基盤とした補正アルゴリズムの理論構築を完成させ、汎用性と信頼性を兼ね備えた非GNSS環境向け測位技術として実用化段階へ移行する。現段階の処理はオフライン方式であり、リアルタイム動作は将来的な技術展開の方向性として位置付けている。

壁距離：1.5m



壁距離：2.0m



壁距離：2.5m



図4 Direct-SLAMによるトンネル内走行軌跡の再構成結果（壁面距離1.5/2.0/2.5 m）

令和8年度及びそれ以降の研究計画・実施方法

令和8年度は、これまでの基礎検証（京都大学風洞実験室・レール実験環境）および実大トンネルでの走行実証の成果を踏まえ、自己位置計測システムの実用機製作と現場実証を行う最終段階とする。具体的には、

- A： 同光軸センサフュージョン＋Direct-SLAMを搭載した「実用機（プロトタイプ）」の製作・改良
- B： 実トンネルを用いたフィールド実証と、現行MIMM業務との接続性の検証

の2点を重点目標とし、非GNSS環境における自己位置推定技術の社会実装に直結する成果の取りまとめを行う。

令和8年度は、これまでの基礎検証とつくばトンネルでの実証成果を踏まえ、センサフュージョン＋Direct-SLAMを搭載した実用機の製作と、実トンネルでの現場実証・MIMM業務との接続性評価を行う集大成の年度である。本技術の特徴である「走行距離とともに誤差が増え続ける構造を持たない観測方式」と「物理モデルに基づいて補正可能な誤差構造」を活かし、IMU依存型とは異なる新しい非GNSS位置計測技術の実用化を目指す。

非GNSS環境下における高精度自己位置計測システムの技術研究開発（4/4）

研究の実施体制

研究代表者

京都大学

光学系・物理モデルの研究者

中央復建コンサルタンツ（株）

道路及び道路トンネルの建設コンサルタント

計測検査（株）

既存の走行型トンネル点検車（MIIM）の開発・保有業者

日本測器（株）

多種多様な計測センサを取り扱う業者

（株）JVCケンウッド

画像と距離を同時に計測できるセンサフュージョンシステムと自己位置推定ソフトウェアの開発業者

共同研究者

役割

➤ センサフュージョン技術の学術的基盤と、物理モデル整合の検証を担う中核機関

➤ 点検実務および行政側の視点から、社会実装に必要な条件整理を担当

➤ 現行のMIMM（計測・検査）業務フローに本技術を組み込んだ運用案を検討、計測・解析の効率化

➤ 自己位置計測システムに搭載するセンサの調達

➤ センサフュージョン技術のハードウェア開発と実車搭載に関する実装面を担当

令和7年度：研究の特徴

1. 同光軸センサフュージョンという独自構成（視差ゼロの「多重誤差補償」が可能な構造）
 - RGBカメラとToFセンサを完全に同一光軸上で取得
 - 可視光画像と距離情報がピクセル単位で一致
 - 従来のLiDAR・IMU・市販RGB-Dカメラとは本質的に異なる新方式
2. IMUのような“累積誤差構造”を持たない点が最大の強み
 - IMU特有の「時間積分 → 誤差が増え続ける」という構造を持たない
 - 観測時点の画像 + 距離の整合により、後処理で誤差を抑え込める
 - トンネルのような閉空間でも高精度を維持し得る
3. Direct-SLAMにより特徴点に依存しないロバストな追従が可能
 - ORB-SLAMなど特徴点方式が追従不能となる環境（白壁・反復パターン・低照度）でも安定して軌跡を生成
 - 80 km/h走行でも軌跡連続性を維持
 - 非GNSS環境での走行実証として国内で初の例

研究の実績：令和7年度

論文 SPIE（国際光工学会）：The international society for optics and photonics
IEEE（米国電気電子学会）：Institute of Electrical and Electronic Engineers

2025年度は、“Coaxial RGB-ToF sensor fusion for visual localization in GNSS-denied tunnel environments”の題目で国際光工学会（SPIE Remote Sensing, Yokohama, 2025）に採択されており、同光軸センサフュージョンを用いた非GNSS環境下での自己位置推定技術として国際的にも評価を受けている。今後は、これらの成果を基盤として、実トンネルでの応用検証を通じ、維持管理業務への適用および空間再構成モデルの最適化を進める予定である。