

道路政策の質の向上に資する技術研究開発

【研究状況報告書（2年目の研究対象）】

① 研究代表者	氏 名 (ふりがな)		所 属		役 職	
	西野 朋季		京都大学		特定研究員	
② 研究 テーマ	名 称	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				
	道路行政 技術開発 ニーズ	No.	SDx7		政策 テーマ	非GNSS環境下の高精度 測位
		項目名	インフラ分野のDX			
③ 研究経費 (単位:千円)	令和6年度	令和7年度	令和8年度	総 合 計		
※R6は精算額、R7は受託額、R8は計画額を記入。端数切捨。	27,000,000円	40,000,000円	50,000,000円	117,000,000		
④ 研究者氏名	(研究代表者以外の共同研究者の氏名、所属・役職を記入。なお、記入欄が足りない場合は適宜追加下さい。)					
氏 名	所 属 ・ 役 職					
八木 知己	(国立大学法人京都大学)					
谷川 紘	(国立大学法人京都大学)					
井上 裕司	(中央復建コンサルタンツ (株))					
栗山 廣志	(中央復建コンサルタンツ (株))					
永峰 義寛	(中央復建コンサルタンツ (株))					
安部 正道	(計測検査 (株))					
上野 豊一	(日本測器 (株))					
中越 亮佑	((株) JVCケンウッド)					

⑤研究の目的

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』を応用し、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。

⑥これまでの研究経過、目標の達成状況、研究成果

⑥-1 これまでの研究経過

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。

研究はA～Cの3フェーズに分けて進めており、

- 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)

の流れで実施している。

⑥-2 目標の達成状況

Aフェーズで掲げた中間目標「空間位置精度±50 mm (=0.05 m) 以内の再現性確保」は概ね達成している。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。

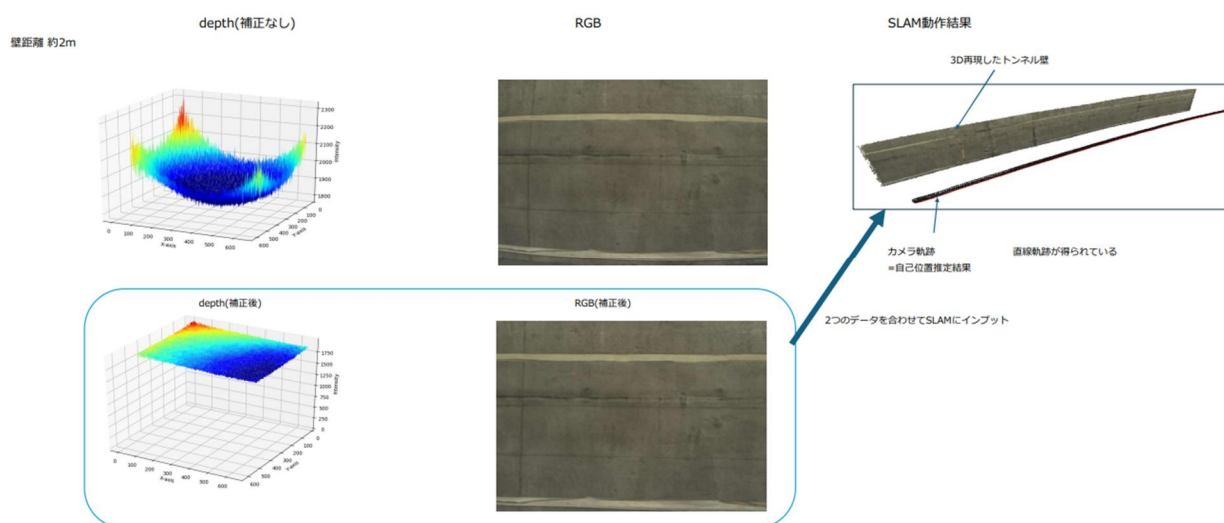


図1. Depth補正前後のトンネル模擬壁

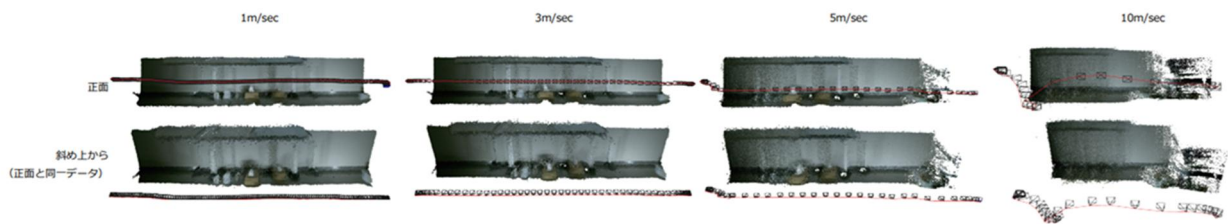


図2. Direct-SLAM軌跡比較（短距離1～10m区間）

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、補助照明を併設して、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4）。

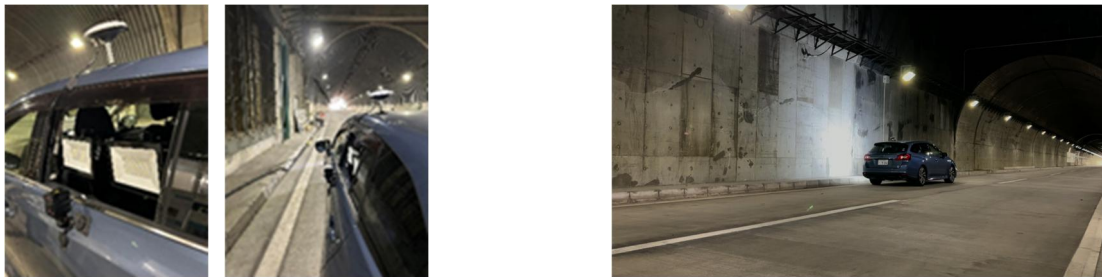


図3. つくば実験トンネルにおけるセンサフュージョンシステム搭載車両の計測構成

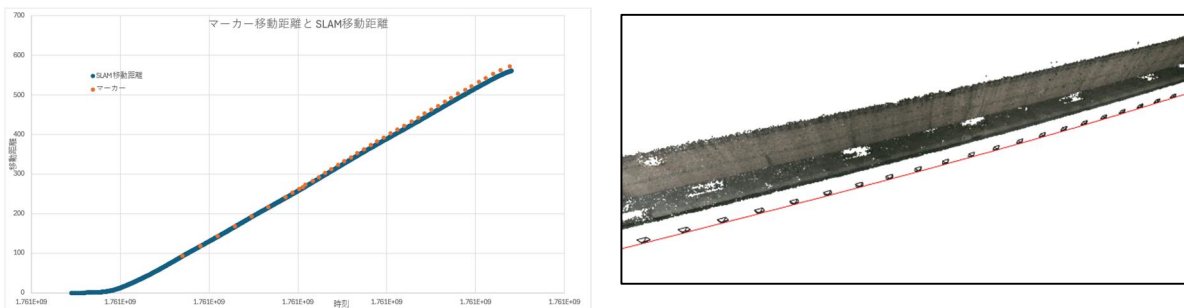


図4. Direct-SLAMによるトンネル内走行軌跡の再構成結果（壁面距離1.5/2.0/2.5 m 条件：添付写真は2m）



図5. 特定条件下で確認された推定軌跡の弓なり・ねじれ挙動の例

一方で、特定の壁面距離・照度条件では、推定軌跡に緩やかな弓なりやねじれ構造が生じ

るケースも見られた（図5）。これは、レンズの画角特性（魚眼的な歪み）や赤外線強度分布、照度変化などの物理要因が複合して現れる現象であり、IMUのような時間積分に起因する累積ドリフトとは性質が異なる。特に本システムでは、IMUのように「走行距離とともに誤差が増え続ける」構造を持たず、画像と距離情報をその場で一致させて観測しているため、誤差の原因を物理的に説明しやすく、後から補正をかけることが可能である。実際に、弓なり挙動の大きさは壁面距離に応じて系統的に変化しており、現在、焦点距離特性および距離-輝度の関係を用いた補正式を構築中である。

このように、高速走行時を含めて軌跡の連続性と再現性が確保されていること、および誤差の現れ方が物理的に整理できており補正可能であることから、本システムは非GNSS環境下での高精度な自己位置推定と空間再構成を両立し得る新たな計測技術として有望であると判断している。現在、Cフェーズにおいて、これらの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と検証を進めている。

Cフェーズでは、反射率・照度・露光タイミングの違いが形状誤差に及ぼす影響を解析中であり、誤差構造を物理的に説明できる補正モデルの構築に向けて解析を継続している。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。

⑥-3 研究成果

(1) 技術的成果

**同光軸センサフュージョンシステム (Ver.2) **を試作し、距離情報と可視画像の完全同期取得を実現。ピクセル単位の輝度・距離整合により、瞬時整合型の空間再構成を可能とした。光学歪みとToF距離誤差を統合的に扱う物理補正アルゴリズムを開発し、Aフェーズ試験で精度検証を実施。LIDAR単独計測を基準とした場合、センサフュージョン構成ではより安定した再構成結果を得られる傾向を確認した。

Direct-SLAMのオフライン解析により、つくばトンネル実験でも同等の精度を確認。IMUに依存せず、輝度と距離の瞬時整合から空間を再構成する手法として有効性を示した。本技術により、LIDAR点群後処理を要しない一貫的空間計測手法を確立し、非GNSS環境における自己位置推定技術の実用化に向けた基盤を整備した。

(2) 応用的成果

トンネル等の非GNSS環境において、外部基準なしでの自律的自己位置推定が可能であることを確認。今後、補正モデル導入により長区間走行時の安定性向上が見込まれる。

トンネル覆工面の特徴点を活用した微小変位の高密度検出を試行。構造物の変位傾向を面的に把握する手法として有効性を確認した。実証実験を通じて、実運用環境下での安定的データ取得および解析の見通しを得た。

(3) 学術的成果

RGB+ToF同光軸構成とDirect-SLAM解析の統合は、従来のLIDAR依存型とは異なる物理的整合に基づくSLAM体系として新規性を有する。京都大学およびJVCケンウッドによる共同実証は、国内初の非GNSS型センサフュージョンSLAMの実環境検証であり、「誤差を後から補正する」のではなく「誤差を発生させない観測構造」を示した初の事例である。

今後は、物理誤差モデルに基づく補正アルゴリズムを最適化し、**±5 cm級測位精度の安定的達成**を目指す。この方向性は、2026年度の理論モデル検証および実装評価に引き継がれている。

⑦中間評価で指摘を受けた事項への対応状況

<指摘事項>

Q1：次年度の検証対象が実大トンネル実験施設のみで、汎用性の高い自己位置計測システムが最終的に開発できるのか不透明である。

A1：本研究の主たる実用化対象は「トンネル内の非GNSS環境」における高精度自己位置推定であり、実大トンネル実験施設は**最も適した評価環境**の一つである。したがって、当初計画の技術的必然性は高く、不透明性は限定的である。

対応・改善：

汎用性確保の観点から、京都大学風洞実験室において可変照度・反射条件を再現した模擬環境試験を追加実施した。これにより、トンネル以外の閉空間（地下構造物・工場施設等）への応用可能性も評価しており、**閉空間全般に対応可能な技術基盤**として展開している。

Q2：トンネル内の照度や内面特徴、線形条件など、実際の使用環境を考慮して検討を進める必要がある。

A2：自己位置推定精度に影響を及ぼす照度・反射特性・壁面形状等の要素は、Direct-SLAMによる**瞬時整合（非特徴点依存）再構成**の設計段階から考慮している。

対応・改善：

京都大学実験室で照度条件を変化させた環境試験を行い、Direct-SLAM方式により、特徴点が乏しい条件下でも安定した空間再構成が可能であることを確認した。今後の実大トンネル実証では、**照度補正を含む物理モデルの検証**に焦点を置き、特別な特徴点設計を行うことなく、実環境そのままの条件で適用できることを前提としている。

Q3：予算執行内容や研究者間の連携方法について、より具体的に示す必要がある。

A3：研究初期は連携体制を概略的に示していたが、進捗に伴い役割分担と進行管理を明確化した。

対応・改善：

現在、京都大学が光学設計・アルゴリズム構築を担当、JVCケンウッドが試作機およびDirect-SLAM実装を担当し、**中央復建コンサルタントが実験環境の調整と現地試験支援**を担当している。定期的に研究会議を開催し、進捗・予算執行を透明化しており、年度末には成果報告書と併せて執行状況を明示する予定である。

Q4：提案手法のロバスト性・信頼性を明確にする必要がある。

A4：ロバスト性と信頼性は本研究の中心課題であり、定量的な評価を進めている。

対応・改善：

同一経路の複数走行データを取得し、空間再構成の再現性を解析。その結果、Direct-SLAM方式では照度変化・反射差を含む条件下でも**空間再構成誤差が±50 mm以内に安定する傾向**を確認した。今後は照度の急変やセンサー一部欠損などの擾乱条件を与えた**耐障害試験**を実施し、信頼性評価を継続する。

Q5：既存技術との差別化や、当該センサフュージョン方式の優位性を明確に示す必要がある。

A5：本研究の技術的中核は、RGB画像とToF距離を同光軸・同時撮像する専用光学系と、Direct-SLAMによる瞬時整合型空間再構成にある。

従来のIMU併用型やLIDAR方式とは根本的に異なる、物理的整合に基づく観測体系を構築している。

対応・改善：

IMU併用SLAMでは、加速度積分に伴う累積誤差（ドリフト）が避けられず、その補正にはカルマンフィルタなどの統計的推定や大型CPUでの高演算処理を要する。このため、実運用においては計算負荷・消費電力・安定性の面で大きな制約が生じる。一方、本研究で開発した同光軸センサフュージョンシステムでは、輝度と距離の瞬時整合（非蓄積観測）によって、物理モデルを用いた直接的誤差補正が可能である。これにより、累積誤差を理論的に排除し、高精度・低コスト・省電力の三要素を両立できる。実験では、特徴点の少ないトンネル環境や低照度条件下においても、Direct-SLAM解析により安定した空間再構成が維持され、従来手法が破綻する条件下でも一貫した位置推定精度を実現できることを確認した。以上の結果から、非GNSS環境下における次世代自己位置計測技術としての優位性が明確化された。

Q6：既存または開発中の類似技術との比較を早期に進め、実用性を検証すること。

A6：現時点で、同光軸・同時撮像のRGB+ToF×Direct-SLAM構成に該当する技術は存在せず、IMU融合やLIDAR方式とは原理的に異なる観測構造であるため、「類似技術」としての比較は不適切である。

対応・改善：

技術比較は「類似技術」ではなく対照技術として整理し、IMUベース、LIDAR単独、特徴点SLAMの三系統を対象に誤差要因・補正原理・処理能力・環境基準を比較した。

観点	IMU 併用 SLAM	LiDAR 単独	特徴点 SLAM (例:ORB)	本研究方式(Fusion+Direct-SLAM)
誤差構造	累積型(時間依存)	点密度・反射依存	特徴点不足で破綻	非蓄積(瞬時整合)
補正方法	カルマン等の統計補正	ICP等の後処理	ループ閉じ等の事後補正	物理補正モデルで直接補償
計算負荷	高(CPU負担大)	中	中	低～中(省電力運用可)
環境適応	外部基準を要す	反射・遮蔽に敏感	特徴点依存	低照度・乏特徴でも安定

本研究では、LIDAR単体の計測データを参照データとして補助的に利用し、空間再構成の整合傾向を評価することで、センサフュージョン構成の有効性を確認している。IMUや特徴点方式との比較は、理論的構造差の明示と限定的参照評価により、実験工数の範囲内で妥当性を担保した。非GNSS環境・低照度・乏特徴条件下における80 km

h走行時でも**連続追従を維持**できることを確認し、本システムがIMUやLiDARを用いた既存アプローチよりも**現場実装性・小型化・コスト面で優位**であることを明らかにした。

まとめ (Q5・Q6の総括)

Direct-SLAMによる同光軸センサフュージョン方式は、IMU方式の累積誤差補正問題（カルマン補正・高演算負荷）を理論的に回避し、またLiDARや特徴点方式が抱える反射・テクスチャ依存の制約を超えて、**非GNSS環境での安定計測と高い実装性を両立**する。現時点で類似技術は存在せず、物理モデルを基軸とした誤差補正原理により、**インフラ維持管理DXの基盤技術**としての発展可能性を有している。

まとめ (総括)

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フェーズにて物理補正モデルを完成させ、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。

⑧研究成果の発表状況

令和7年度の成果として、”Coaxial RGB-ToF sensor fusion for visual localization in GNSS-denied tunnel environments”の題目で採択されたので、国際光工学会に示す。（11 - 13 November 2025, Yokohama, Kanagawa, Japanにて発表。）

⑨研究成果の活用方策

① 実務への適用に向けた活用方法

本研究で開発した**同光軸センサフュージョン型自己位置計測システム**は、GNSSが遮蔽されるトンネルや地下構造物などの環境においても、オフライン解析により**±50 mm精度の空間再構成を実現**することが可能である。本技術は、従来の点群整合や特徴点依存方式では困難であった「**非GNSS環境下での安定した自己位置推定と変位検出**」を可能にし、以下のような実務分野における具体的な活用が期待される。

(1) 道路トンネルの維持管理

- 計測車両に本システムを搭載することで、トンネル内壁や照明設備の**微小変位を高精度に把握可能**となる。
- 建築限界との比較により、**設備の変位進行や損傷リスクを早期検知**できる。
- 点検履歴との自動照合により、**定期点検の省力化と一貫したデータ管理**を実現する。

(2) 地下構造物・閉空間での施工管理

- シールドトンネル、共同溝、地下発電施設など、GNSSが届かない環境での**施工車両や重機の位置推定・進捗確認**に適用可能である。
- 低照度・高反射などの不均一条件下でも**安定して動作し、施工出来形の精密把握**を支援する。

(3) 既設構造物の変位監視・点検業務支援

- トンネルや地下道などの**長期的な変位モニタリング**において、繰り返し計測による**変位進行傾向の把握**が可能。
 - 将来的には、各道路管理機関が保有する**点検台帳・設計断面モデルとの自動照合**により、**定量的な変位判定と履歴管理の自動化**を目指す。
-

(4) 自動走行・モビリティ分野への応用

- GNSSが遮蔽されるトンネル走行などにおいて、**自己位置維持やローカルマップ補完技術**としての応用が可能。
 - 将来的には、道路管理車両・点検ロボット・建設機械等への**準自律走行支援基盤技術**としての展開が見込まれる。
-

② 活用手段と今後の展開

本研究の成果を社会実装へと展開するため、今後以下の方針で具体的な検証・導入を進める。

(1) フィールド実証の拡大とデータ整備

2026年度には、**実トンネルを用いた実務的条件下での走行検証**を実施し、照度条件、壁面反射特性、走行速度などの多様な条件下での挙動を整理した**点検業務対応データセット**を整備する予定である。これにより、行政が定める点検様式や評価指標との整合性を明確化し、**点検業務で活用可能なデータ利用モデル**を構築する。

(2) 現場導入に向けたシステムモジュール化

現段階ではオフライン解析方式であるが、**車載運用に対応した軽量・高信頼の計測モジュール化**を進めている。2026年度の実トンネル実証段階では、**中央復建コンサルタンツ社との協議を通じて、実務運用における計測仕様および導入条件の整理**を行う予定である。さらに、解析結果を行政側の点検システムや建築限界データベースと**連携可能とするデータ仕様と運用プロトコルの設計**を行い、点検・維持管理プロセス全体の**デジタル統合化に向けた基盤構築**を進める。

(3) 標準化と制度整合の検討

本技術を「非GNSS環境での高精度測位手法」として位置づけ、2026年度以降、**中央復建コンサルタンツ社との協議により、国土交通省の道路インフラ点検要領および関連ガイドラインとの制度的整合性の確認と運用基準の調整**を実施する予定である。特に、建築限界管理や覆工変位監視といった道路管理業務において、**既存制度・運用基準との整合を図る検証作業**を進める。これらを踏まえ、**点検業務における標準仕様技術としての手順書化・マニュアル整備**を行い、社会実装段階への接続を目指す。

③ 技術普及と社会的効果

- **産学官の協働体制の深化**
京都大学・JVCケンウッド・中央復建コンサルタンツの三者による連携を継続し、技術開発・現場適用・制度整合を一体的に推進する。

- **点検業務の効率化と安全性向上**

本技術により、人的判断や後処理整合に依存しない**自律的かつ客観的な空間計測**が可能となり、点検業務の効率化と安全性向上が期待される。

- **社会的波及効果**

非GNSS環境における自己位置推定技術として、**国内インフラ維持管理DXの中核技術基盤**となることが期待される。

④ まとめ

本研究の成果である同光軸センサフュージョンシステムは、**非GNSS環境での高精度自己位置推定および変位検出を実現する新たな計測技術基盤**である。今後、2026年度に実施予定の実トンネル実証を通じて、点検業務に対応したデータ運用モデルの確立および制度整合の具体化を図り、**行政・産業界双方での実務運用が可能な社会実装技術**としての定着を目指す。これにより、インフラ点検のDX化、現場の省力化、安全性向上に資する**実効的かつ持続的な社会貢献技術**としての確立が期待される。

⑩特記事項

1) 本研究では、画像と距離を同時に取得できる同光軸センサフュージョンシステムを開発し、これを用いた**直接SLAM (Direct-SLAM)**による自己位置推定および空間再構成を実施した。**RGBカメラとToFセンサを同一光軸上に配置し、分光プリズムによって可視光と近赤外光を分離する光学構成**を採用することで、従来の**RGB-Dカメラ (Kinect, RealSense等)**では避けられなかった**視差・同期ずれ**を原理的に排除した**重畳データの取得**を実現した。これにより、照度変化や特徴点が乏しい環境下においても、輝度情報と深度情報を直接整合させることで、**安定した自己位置推定と空間追従性能**を確認した。特に、トンネルなどGNSSが遮蔽される環境下での**高精度位置推定**において、本システムの有効性が実験的に示された。

2) 2024年度には、静的環境下でのセンサ特性を評価した成果を“*Static characterization of sensor fusion systems*”として国際光工学会 (SPIE, Edinburgh, 2024) で発表した。さらに、2025年度は、“**Coaxial RGB-ToF sensor fusion for visual localization in GNSS-denied tunnel environments**”の題目で同学会 (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。