

令和 5 年度地球観測技術等調査研究委託事業
「都市河川構造物点検における自律型船舶利用のための
水上屋内外シームレス測位」
委託業務成果報告書

令和 6 年 5 月
学校法人 芝浦工業大学

本報告書は、文部科学省の地球観測技術等調査研究委託事業による委託業務として、学校法人芝浦工業大学が実施した令和 5 年度「都市河川構造物点検における自律型船舶利用のための水上屋内外シームレス測位」の成果を取りまとめたものです。

目次

1	はじめに	1
1.1	委託業務の目的	1
1.2	業務の方法	1
1.3	令和 5 年度における委託業務の結果概要	2
2	実施内容	3
2.1	令和 5 年度における実施概要	3
2.1.1	業務内容と実施体制	3
2.1.2	事後自己点検の実施方針	4
2.1.3	実施状況と実施実績	5
2.2	検討手法	7
2.2.1	検討手法の概要	7
2.2.2	操船に必要な地図参照項目の整理	9
2.2.3	リアルタイム地図参照の実証と検証	13
2.3	実データ取得と処理	17
2.3.1	令和 5 年度の実験概要	17
2.3.2	操船に必要な地図参照項目の整理	21
2.3.3	リアルタイム地図参照の実証と検証	23
2.4	実施内容に関する考察	28
2.4.1	費用対効果の妥当性	28
2.4.2	波及効果	28
3	まとめ	30
3.1	令和 5 年度の成果	30
3.2	令和 3～5 年度の成果	31

1 はじめに

1.1 委託業務の目的

本業務では、Centimeter level augmentation service (CLAS)利用のGNSS 測位, LiDAR-SLAM, および, 画像計測を主として組み合わせた3D 計測システムによって, 自律型船舶を利用した水上から行えるインフラ点検システムを構築することを目的とする。従来型船舶による巡視による目視点検や UAV を利用した点検では困難であった日常点検の無人化が可能になり, 陸空水域統合型の3D 計測によるインフラ点検の高度化・効率化や, 空水域統合型 MaaS を実現するうえで事例が少ない水上 MaaS の基盤構築に寄与する。自動運転向け LiDAR の利用を主とする点群処理で, 3D 計測に必須となる IMU を省略することで低コスト化を実現し, すでに軽量 UAV-LiDAR や簡易 MMS-LiDAR に搭載している, 主管実施機関が開発した LiDAR-SLAM 技術を活用し, インフラ点検に知見のある大学機関, 自治体, 土木コンサルおよびゼネコンと連携しつつ, 都市河川を対象に提案システムの有効性を検証する。

1.2 業務の方法

本業務は, CLAS 利用の GNSS 測位, LiDAR-SLAM, および, 画像計測を主として組み合わせた3D 計測システムによって, 自律型船舶を利用した水上から行えるインフラ点検システムを構築するものである。特に, 主管実施機関が開発した LiDAR-SLAM 技術, および, 共同研究機関が開発したリチウムイオン電池推進船を活用するものである。インフラ点検に知見のある大学機関, 自治体, 土木コンサルおよびゼネコンと連携し, 都市河川を対象に提案システムの有効性を検証するために, (A)水上屋内外シームレス測位技術の開発, (B)自律型船舶を用いた構造物計測技術の開発, および, (C)自律型船舶に適した地図データ構造の開発 をとおした, システムの構築を実施している(図1)。

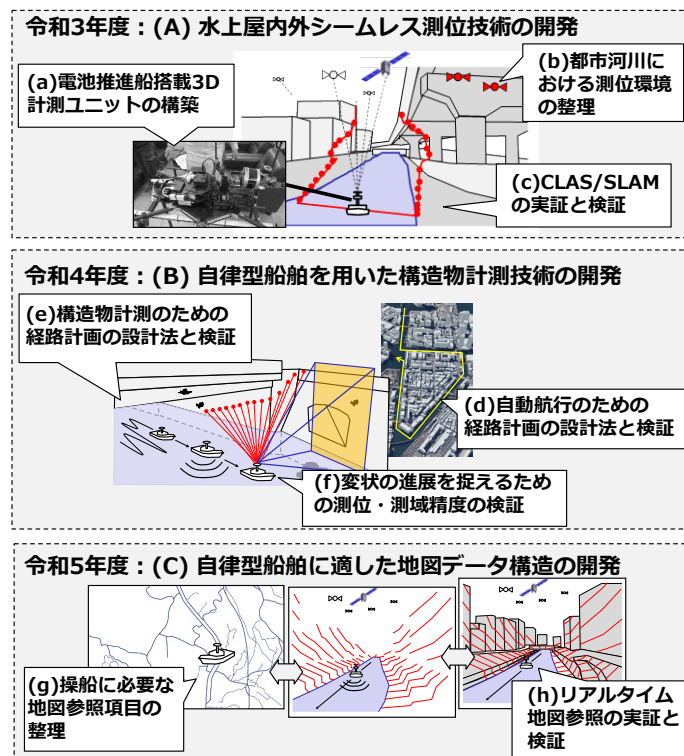


図1. 業務計画(各年度)

令和 5 年度においては、(C)自律型船舶に適した地図データ構造の開発 に関する下記 2 項目を実施した。また、下記 2 項目と、業務で得た実験結果との関連をまとめた図 2 に示す。

自動運転向け 3D 地図データであるダイナミックマップなどを参考とし、操船に必要な地図参照項目を明らかにした。操船に必要な地図参照項目の明確化(自律航行における評価による検証)を目標達成の指標とした。自動運転向け 3D 地図データであるダイナミックマップなどに準拠すること、および、取得データの地物分類ができた段階で、達成目標のレベルに到達したことを根拠とし、目標を達成した。

船舶で取得した点群に意味付けを行なった 3D 地図データを構築するとともに、リアルタイムな地図参照に対応する地図データ構造を開発し、1Hz での自己位置推定が可能であることを検証した。1Hz での自己位置推定を目標達成の指標とした。自動操船で地図参照に求められるリアルタイム性能、高精度屋内外シームレス測位を補強する経路計画設計方法(自動航行・構造物計測)、および、船舶ナビゲーションが困難な非 GNSS 測位環境での地図参照ができたことを根拠とし、目標を達成した。



2) リアルタイム地図参照の実証と検証

2

2 実施内容

2.1 令和5年度における実施概要

2.1.1 業務内容と実施体制

令和5年度においては、図3に示す項目のうち、(C)自律型船舶に適した地図データ構造の開発に関する業務を実施した。実施体制および役割分担を図4に示す。芝浦工業大学(中川)が研究代表者となり、東京海洋大学(清水)と東京海洋大学(久保)が共同参画者である。◎は主たる担当、○は副担当を示す。本提案には、3D計測・データ処理や、インフラ点検高度化、電池推進船、自動航行、CLAS利用GNSS測位、オープンデータ活用に関する要素技術が求められる。各研究分担者の保有技術および実績には、3D計測・データ処理とインフラ点検高度化(芝浦工業大学)、電池推進船と自動航行(東京海洋大学)、CLAS利用GNSS測位とオープンデータ活用(東京海洋大学)がある。

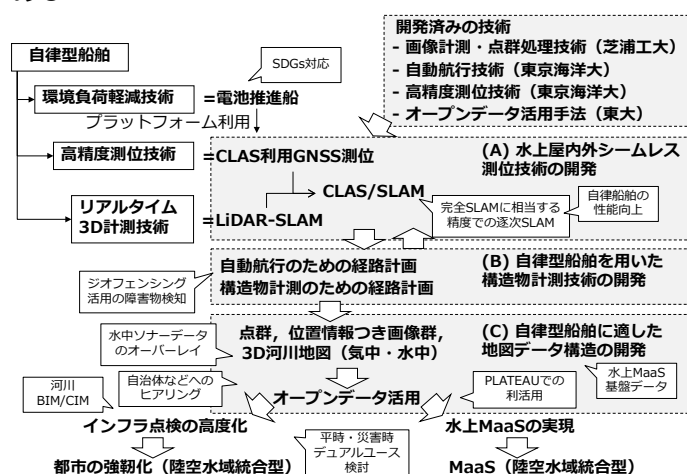


図3. 実施項目

担当者・機関	研究代表者 芝浦工業大学(中川)	共同参画者 東京海洋大学(清水)	共同参画者 東京海洋大学(久保)
保有技術および実績 (実施体制の必要性・妥当性)	- 3D計測・データ処理 - インフラ点検高度化	- 電池推進船 - 自動航行	- CLAS利用GNSS測位 - ナビゲーション
目的との関連性			
(A) 水上屋内外シームレス測位技術の開発			
(a)電池推進船搭載3D計測ユニットの構築	○	◎	○
(b)都市河川における測位環境の整理	○	○	◎
(c)CLAS/SLAMの実証と検証	◎	○	○
(B) 自律型船舶を用いた構造物計測技術の開発			
(d)自動航行のための経路計画の設計法と検証	○	◎	○
(e)構造物計測のための経路計画の設計法と検証	○	○	◎
(f)変状の進展を捉えるための測位・測域精度の検証	◎	○	○
(C) 自律型船舶に適した地図データ構造の開発			
(g)操船に必要な地図参照項目の整理	○	◎	○
(h)リアルタイム地図参照の実証と検証	◎	○	◎
事業へ展開する具体的トピック			
河川BIM/CIM 自律船舶の性能向上 PLATEAUでの利活用 平時・災害時デュアルユース検討 水上MaaS基盤データ			
助言・実験協力・実験場提供			
主協力機関： 東京大学・空間情報科学研究センター (とりまとめ：柴崎)	民間企業 コンサル、ゼネコン、メーカーなど	学協会 測位航法学会、写真測量学会など	
東京大学・デジタル空間社会連携研究機構	機関・自治体等 国交省、東京都、江東区など	芝浦工業大学・マルチフィールド研究会 (土木系企業等 数十社)	

図4. 実施体制・役割分担

2.1.2 事後自己点検の実施方針

アウトプットに関する事後自己点検の実施方針を表 1 に示す。1) 操船に必要な地図参照項目の整理 については、自動運転向け 3D 地図データであるダイナミックマップなどを参考とし、操船に必要な地図参照項目を明らかにすることを目標として設定し、日本橋川・神田川を重点河川とした地図参照項目の整理を達成内容とした。2) リアルタイム地図参照の実証と検証 については、意味付けを行なった 3D 地図データを構築するとともに、リアルタイムな地図参照に対応する地図データ構造を開発し、1Hz での自己位置推定が可能であることを検証することを目標として設定し、リアルタイムな地図参照に対応する 1Hz での自己位置推定できることを達成内容とした。全体的には、CityGML の LOD2 相当での地物分類および船舶ナビゲーションが困難な非 GNSS 測位環境での地図参照ができた段階で、達成目標のレベルに到達したと評価する。

表 1. アウトプットに関する事後自己点検の実施方針

	目標	達成される内容	最も成功した場合	根拠
1) 操船に必要な地図参照項目の整理	自動運転向け3D地図データであるダイナミックマップなどを参考とし、操船に必要な地図参照項目を明らかにする	日本橋川、神田川を重点河川とした地図参照項目の整理	船舶版ダイナミックマップの基盤となるCityGMLに準拠した都市河川の応用スキーマ提案	自動運転向け3D地図データであるダイナミックマップ、地図情報レベル500
2) リアルタイム地図参照の実証と検証	船舶で取得した点群に意味付けを行なった3D地図データを構築するとともに、リアルタイムな地図参照に対応する地図データ構造を開発し、1Hzでの自己位置推定が可能であることを検証する	リアルタイムな地図参照に対応する1Hzでの自己位置推定	高精度な屋内外シームレス測位を補強する経路計画設計方法（自動航行・構造物計測）の提案	自動操船で地図参照に求められるリアルタイム性能、地図情報レベル500、GNSS測位速度
	CityGMLのLOD2相当での地物分類および船舶ナビゲーションが困難な非GNSS測位環境での地図参照ができた段階で、達成目標のレベルに到達したと評価する		データを利用した応用例への展開の実現可能性等で評価する	

また、アウトカムに関する事後自己点検の実施方針を表 2 に示す。屋内外シームレス測位・測域技術を利用する経路計画設計方法（自動航行・構造物計測）の構築、および、生成した点群をオープンデータとして公開できることを現段階の状態とし、船舶版ダイナミックマップの基盤となる CityGML に準拠した都市河川の応用スキーマ提案や、点群への意味づけの自動化、操船可視化の事例を提案できることを目標とした。インパクトに関する事後自己点検の実施方針を表 3 に示す。閲覧に限定した地理空間データとして利用できるデータ公開（東京都デジタルサービス局等）、および、船舶海洋分野のダイナミックマップ研究会や3次元空間情報基盤アーキテクチャ検討会への本成果の提供を現段階の状態とし、点群の実行ファイル化によるデータインタフェース改善（ゲームエンジン利用等）、および、国際標準化・規格化に向けた活動による、本成果がより広く利用される環境構築を目標とした。

表 2. アウトカムズ(効果・効用)

現段階	目標
屋内外シームレス測位・測域技術を利用する経路計画設計法（自動航行・構造物計測）の構築	船舶版ダイナミックマップの基盤となるCityGMLに準拠した都市河川の応用スキーマ提案
生成した点群をオープンデータとして公開	点群への意味づけの自動化、操船可視化の事例提案

表 3. インパクト(波及効果)

現段階	目標
閲覧に限定した地理空間データとして利用できるデータ公開（東京都デジタルサービス局等）	点群の実行ファイル化によるデータインタフェース改善（ゲームエンジン利用）
船舶海洋分野のダイナミックマップ研究会や3次元空間情報基盤アーキテクチャ検討会への本成果の提供	国際標準化・規格化に向けた活動による、本成果がより広く利用される環境構築

2.1.3 実施状況と実施実績

令和5年度の実施状況を図5に整理する。

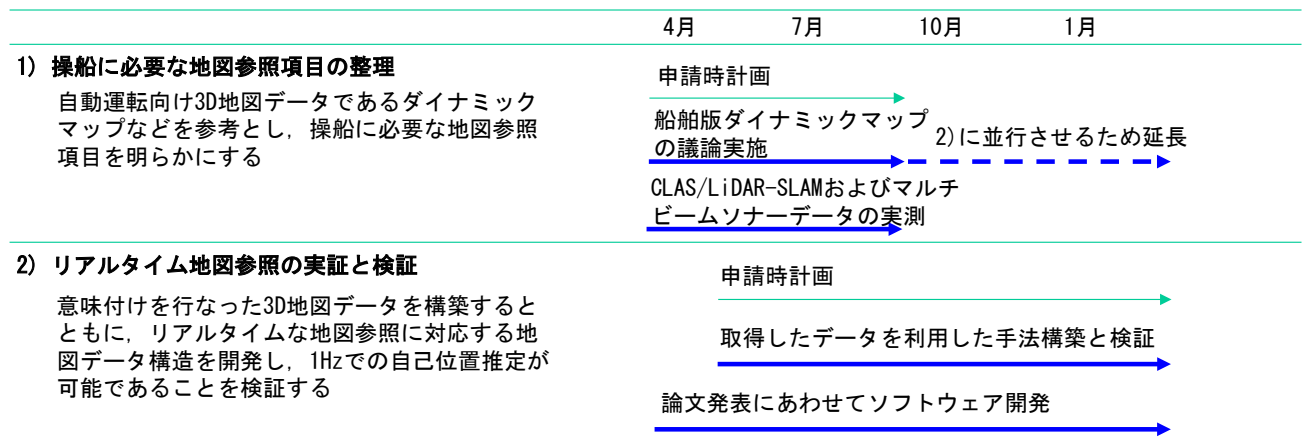


図5. 令和5年度の実施状況

まず、1) 操船に必要な地図参照項目の整理 については、主として、自動運転向け3D地図データであるダイナミックマップなどを参考とし、操船に必要な地図参照項目を明らかにするために、船舶版ダイナミックマップの議論実施や、CLAS/SLAM およびマルチビームソナーデータの実測を実施した。申請時計画では、船舶版ダイナミックマップの議論実施を4～9月に予定していたが、2) リアルタイム地図参照の実証と検証 に並行させるために、年度内まで延長した。

2) リアルタイム地図参照の実証と検証 については、主として、1) 操船に必要な地図参照項目の整理 で取得したデータに加え、船舶ナビゲーションを想定した CLAS/SLAM の測位補強やリアルタイム地図参照の基礎データを取得した。申請時計画では、取得したデータを利用した手法構築と検証を5～1月に予定しており、予定どおりに実施した。また、5・10月期の論文発表にあわせてソフトウェア開発を4月から前倒して実施した。

また、令和4年に芝浦工業大学にインフラDXセンターを設置しており、土木構造物の維持管理における本研究成果の展開を進めるとともに、実験データで得た点群を東京都デジタルサービス局でデータ公開した実績を踏まえ、データ公開についてはG空間情報センターの利用を検討している。さらに、データ公開後の利活用を促進するためにゲームエンジン利活用に関する実験等を実施し、点群処理に関する研究会(SPARJ)でのワークショップ等で議論するとともに、インフラ測位国際標準化委員会(一社 日本航空宇宙工業会(SJAC)、経済産業省受託事業:準天頂衛星システム利用促進のためのインフラ施設管理用測位と性能評価に関する国際標準化、委員長:中川、委員には実施項目担当である清水・久保が含まれる)における実験協力を実施した。そのほか、科学番組(日本テレビ「所さんの目がテン!」:放送日2023年6月18日、および、2024年4月21日)を通じて研究成果をテレビ放送する機会を利用し、本業務の内容を国民へ広く周知する研究広報活動を実施した(図6)。



図6. 科学番組の撮影対応(左図:撮影風景、右図:提供素材)

以上のとおり、全実施項目において、進捗が遅れた項目なく計画どおりに実施したうえで、補強することが好ましい研究内容に関する追加実験や広報活動を実施した。令和5年度の実施状況に対応する実施実績を表4に整理する。また、令和5年度の実施状況および実施実績について、前年度末の目標値に対する進捗度(完遂度)を表5に整理する。

表4. 令和5年度の実施実績

1) 操船に必要な地図参照項目の整理

自動運転向け3D地図データであるダイナミックマップなどを参考とし、操船に必要な地図参照項目を明らかにする

- 船舶版ダイナミックマップの基盤となるCityGMLに準拠した都市河川の応用スキーマ提案
- 日本橋川・神田川を重点河川とし、都市河川を航行する船舶としてL10m×W3m×喫水0.5mを設定し、CLAS/SLAMやマルチビームソナーによって、想定される航行水域での自動航行で必要となる情報を実測・検証
- CLAS/SLAMの位置再現性を地図情報レベル500にもとづく精度（水平位置の標準偏差0.25m以内、標高点の標準偏差0.25m以内）で実現（点間隔4cmかつ測位精度10cmを標準仕様としている）
- 海に繋がる河川は、潮の干満影響を受け水位が変化するため、船舶航行に利用可能な水路幅が護岸形状・橋脚位置・橋梁形状で変化するため、船舶の3D経路計画で利用できる情報として整理
- オープンデータ利活用を想定したゲームエンジン利活用の事例提案（操船シミュレーション）を実施

2) リアルタイム地図参照の実証と検証

意味付けを行なった3D地図データを構築するとともに、リアルタイムな地図参照に対応する地図データ構造を開発し、1Hzでの自己位置推定が可能であることを検証する

- 1) で取得したCLAS/SLAMやマルチビームソナーデータを利用して、点群への意味づけの自動化（セグメンテーション）や、リアルタイムな地図参照技術（マップマッチング、および、ナビゲーションなど）の開発と検証を実施
- 高精度な屋内外シームレス測位を補強する経路計画設計法（自動航行・構造物計測）の提案
- 海事分野における国際基準・規格に関して国内取りまとめを行っている船舶海洋分野のダイナミックマップ研究会（一財）日本船舶技術研究協会、委員長：実施項目担当の清水、2022年7月発足）で、船舶の安全運航に係る船外環境データを整理し、データの取得方法・利用可能な既存データの所在、データ利用の権利関係等をまとめた情報サービス提供者・利用者向けガイドラインの策定に関する取り組みを実施
- 海事分野における国際基準・規格に関して国内取りまとめを行っている船舶海洋分野のダイナミックマップ研究会（一財）日本船舶技術研究協会、委員長：実施項目担当の清水、2022年7月発足）で、船舶の安全運航に係る船外環境データを整理し、データの取得方法・利用可能な既存データの所在、データ利用の権利関係等をまとめた情報サービス提供者・利用者向けガイドラインの策定に関する取り組みを実施
- インフラ測位国際標準化委員会（一社 日本航空宇宙工業会（SJAC）、経済産業省受託事業：準天頂衛星システム利用促進のためのインフラ施設管理用測位と性能評価に関する国際標準化、委員長：中川、委員には実施項目担当である清水・久保が含まれる）における実験協力を実施

表5. 令和4年度末の目標値との対比

令和4年度末の目標値	令和5年度末の進捗
1) 操船に必要な地図参照項目の整理 指標・目標値：操船に必要な地図参照項目の明確化（自律航行における評価による検証） 根拠：自動運転向け3D地図データであるダイナミックマップなどに準拠する	- 重点河川での地図参照項目に関する計測・検証(100%) - ダイナミックマップに準拠した地図参照項目の検討(100%)
2) リアルタイム地図参照の実証と検証 指標・目標値：1Hzでの自己位置推定 根拠：自動操船で地図参照に求められるリアルタイム性能とGNSS測位速度より決定	- ゲームエンジン利活用による操船シミュレーション(100%) - 通常航行速度での計測・検証(100%) - セグメンテーションおよびマップマッチングの実装と検証(100%)

2.2 検討手法

2.2.1 検討手法の概要

研究実施のアセスメント活動として、点群や位置情報つき画像群、3D 河川地図の取得・整備およびオープンデータ活用の意義について、自治体へのヒアリングを行った。構造物点検支援や災害対応での自律型船舶活用に関する議論のため、都市河川や東京湾を有する江東区を主選定し、本業務での成果に関する意義に関する議論を行った。まず、社会状況の動きとしては、災害リスクへの対応、脱炭素社会に向けた取り組み、グリーンインフラの推進、新しい生活様式への対応、まちづくりの DX(Digital transformation)、および、スマートシティにもとづく全体最適な社会づくりがあることを確認した。これらにもとづいて、都市の地域共創型デジタルツインによる地域強靱化が求められており、これを実現するためにインフラ点検の高度化および都市の強靱化に対応するための空間基盤データとして船舶版ダイナミックマップが必要であることを確認した。

本業務の成果は、都市河川構造物点検における自律型船舶の利用を水上屋内外シームレス測位により実現するものであり、構造物の老朽化や災害対応、現場技術者不足などの現在の課題に対して、BIM/CIM(Building information modeling and construction information modeling/management)にもとづく構造物の広域スクリーニング(変状検出)、広域点検から補修プロセスの改善、および、定期点検時の 3D ベースマップ整備を実現できるものとともに、SDG7(グリーンエネルギーをみんなに)、SDG9(産業と技術革新の基盤づくり)、SDG11(住み続けられるまちづくり)、SDG13(気候変動への具体的な対策)からバックキャスティングされたものである。また本業務での成果は、平時・災害時のデュアルユースに対応する水上 MaaS(Mobility as a Service)の基盤データとして活用するものであり、特に都市河川や東京湾を有する江東区では、水上交通ネットワーク設計、および、道路・鉄道と水上交通の連携による MaaS の高度化を視野にいった、地域課題の解決を期待できるものである。ゼロエミッションな次世代の交通手段や通信/エネルギー/UAV の緊急拠点として自律型船舶/電池推進船を水上交通手段として活用できるものであり、SDG7、SDG9、SDG11、SDG13 からバックキャスティングされたものである。本業務では、操船に必要な地図参照項目の明確化をするうえで、自治体へのヒアリング結果も含め、当初の計画どおりに、自動運転向け 3D 地図データであるダイナミックマップなどを参考とした。また、リアルタイムな地図参照に対応する地図データ構造を検討するうえでは、ダイナミックマップを構成する情報のみならず、ダイナミックマップの運用に求められる機能にも着眼することで、操船に必要な地図参照項目の明確化や操船に必要な地図参照のリアルタイム性能を実現できる。ダイナミックマップの運用に求められる機能は、データ計測、地図生成、データ管理、地図配信、地図配信、公共情報収集、セキュリティ、および、品質管理が挙げられる。これらのうち、データ計測、地図生成、データ管理、地図配信、および、地図更新を船舶版のダイナミックマップでターゲットとして設定し、検討すべき要素技術を a) 船舶版ダイナミックマップの応用スキーム、b) 操船シミュレーション、c) ストリーミング点群のセグメンテーション、および、d) 点群ベースマップを利用するマップマッチング とした(図 7)。

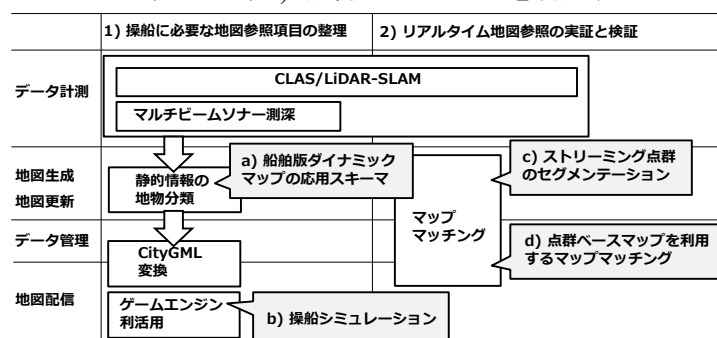


図 7. 検討手法

「データ計測」では、CLAS/SLAM やマルチビームソナーなどで取得する点群を扱った。ダイナミックマップでは、車両から計測した点群を扱うが、船舶版のダイナミックマップにおけるデータ取得では、単一のセンサで気中と水中の点群を取得することは容易ではない。そのため、気中の点群をレーザースキャナやカメラなどを利用して取得し、水中の点群はマルチビームソナーで取得した。

「地図生成」は、取得された点群から 3D 地図を生成する処理である。地図生成は、3D 地図の新規生成であり、差分処理にもとづく地図更新とは処理の内容が異なるが、地図の幾何データと属性データを生成・再生成する観点では、点群中の地物を識別するための点群マッチング処理や物体認識処理、マップマッチング処理が共通処理であるとともに、高いレベルのデータ処理を伴うものであるため、本業務では、地図生成と地図更新を 1 つのターゲットとしてまとめて、静的情報の地物分類、および、マップマッチングに関する処理を検討した。

「データ管理」は、諸情報をデータベースとして管理するものであるが、本業務では、データ管理は標準データ交換問題であることに着目し、点群の CityGML 変換を検討した。CityGML は、国内外のオープン 3D 都市モデルなどで採用している空間データ形式標準であり、GML (Geography Markup Language) の応用スキーマとして実装されている XML ベースのデータ形式である。CityGML は、3D 都市モデルの記述や管理、交換のために利用されるデータ形式であるが、ASCII 形式での記述であるために大規模データを高速に交換する目的には適さない。しかしながら、地物を幾何情報(点・線・面などで構成されるジオメトリ)に属性情報を付加した情報として扱うことは、極めて汎用性が高いため、このデータ構造への点群の変換(ジオメトリ変換)に関して検討した。

ジオメトリ変換において、点群をポリゴンへ変換し、CityGML のジオメトリとして格納することで、従来型のオープン 3D 都市モデルと同様に利用できる。ポリゴンは、軽量のデータ形式であり、地物の幾何形状の総描(地図を見やすくしたり、データ処理を軽量化したりするために、詳細な形状を粗い形状で表現すること)には適している。CityGML の LOD0(例:地形と建物をまとめた面で表現)、LOD1(例:建物を箱型の立体で表現)、LOD2(例:建物の屋根形状も表現)に対応する LOD へ点群を変換するのであれば、点群からポリゴンへの変換が好ましい。一方で、船舶の自動操船では、LOD3(例:窓などの開口部も表現)や LOD4(例:建物内部も表現)といった cm 級の解像度の地図データを利用することを想定している。レーザースキャニングで取得できるレベル(cm 級の解像度)での微細な形状情報を利用できるため、LOD3 は衝突回避を目的とした橋梁や閘門の形状表現、LOD4 は高精度マップマッチングを目的とした橋梁部材や護岸細部の形状表現ができるものと検討している。ここで、扱うジオメトリは CAD 図面ではなく、実測データから作成した 3D モデルであることにもとづくと、LOD3 や LOD4 の詳細度で点群からポリゴンへ変換した場合は、データサイズやリアルタイム処理の面では、ノード、チェーン、および、トポロジー情報が付加されるポリゴンを利用するよりも、点群を直接利用したほうが好ましい。そのため、CityGML は ASCII 形式で大規模データの高速処理には不適であるものの、静的地物分類した結果を CityGML 変換する内容については、CityGML のジオメトリに格納する情報を点群とすることを前提とした。

「地図配信」は、国内の PLATEAU や海外のオープン 3D 都市モデルなどで利用されている CityGML での地図データ配布をまずは想定できる。前年度において、実験で得た点群の一部をオープン 3D 都市モデルの一部としてオープンデータ化する取り組みを令和 5 年度の前期で行い、大規模ファイルのアップロードおよびダウンロードを通じて、大規模ファイルの交換は可能であることを確認できた。しかしながら、ファイルのダウンロード時間の長さに加えて、点群の非専門家が高ハードルが依然として高く、現状では、オープンデータ化をしたとしても、点群の非専門家にとっては、活用の発展性がないことに課題があることに着目できた。そこで本業務では、点群の非専門家でも点群を扱いやすくすることを目的とし、ゲームエンジンの利用を検討した。

2.2.2 操船に必要な地図参照項目の整理

実施項目 1) 操船に必要な地図参照項目の整理 では、主として、自動運转向け 3D 地図データであるダイナミックマップなどを参考とし、船舶版ダイナミックマップの基盤となる CityGML に準拠した都市河川の応用スキーマ提案を通して、操船に必要な地図参照項目を整理した。日本橋川・神田川を重点河川とし、都市河川を航行する船舶を設定し、CLAS/SLAM やマルチビームソナーによって、想定される航行水域での自動航行で必要となる情報を実測・検証した。操船に必要な地図参照項目の明確化（自律航行における評価による検証）、および、船舶版ダイナミックマップの基盤となる CityGML に準拠した都市河川の応用スキーマ提案を目標達成の指標とした。本実施項目は、CLAS/SLAM およびマルチビームソナーなどを利用した実データの取得において検証し、自動運转向け 3D 地図データであるダイナミックマップなどに準拠することを根拠として、取得データの地物分類ができた段階で、達成目標のレベルに到達したと評価した。

船舶は、水上バイクから水上バス、大型タンカーまで、サイズの違いが車両や航空機よりも大きい。経路計画（自律航行向け）は、この船舶サイズによって大きく変わる。まず、都市河川を航行する船舶として、L10m×W3m×喫水 0.5m を設定し、電池推進船「らいちょう I」（図 8）を評価船舶として利用した。



図 8. 想定船舶(L10m×W3m×喫水 0.5m)

また、護岸形状や橋脚・橋台の位置、橋梁の形状にあわせて、水位変化によって船舶航行が可能な水路幅が変化する。十分に水位が低い場合は、護岸近辺の浅瀬の位置を容易に目測できるが、水位が高い場合は、護岸近辺の浅瀬の位置の確認が難しい。水中の測距は、ソナーセンサを利用した測距に大きく依存するが、面的に計測できる高精度ソナーセンサは高価格である課題がある。そのため、自動船舶航行においては、事前に高精度なソナーセンサで水底を計測して 3D 地図を整備し、高精度測位装置を船舶に搭載し、リアルタイムな 3D 地図参照を適用するアプローチが現実的である。しかしながら現時点では、水底を計測した 3D 地図は公的に未整備である。そもそもリアルタイムな 3D 地図参照ができる環境が整っていない状態である。そこで本業務において CLAS/SLAM を利用する船舶搭載 3D 計測システムを開発し、令和 4 年度の業務においては、GNSS 測位環境／非 GNSS 測位環境での高精度測位および空中・水中の点群取得を行っている。令和 5 年度の業務においては、属性情報付きの 3D 地図作成、および、リアルタイムな 3D 地図参照を実現するために、取得された点群から地物を認識する処理を開発するとともに、自動運转向け 3D 地図データであるダイナミックマップなどを参考として、操船に必要な地図参照項目を整理した。

ダイナミックマップとは、「道路及びその周辺に係る自車両の位置が車線レベルで特定できる高精度三次元地理空間情報（基盤的地図情報）及び、その上に自動走行などをサポートするために必要な各種の付加的地図情報（例えば、速度制限など静的情報に加え、事故・工事情報など動的情報を含めた交通規制情報など）を載せたもの」（官民 ITS 構想・ロードマップ 2016）である。ダイナミックマップは、高精度な 3D 地図上に、刻々と状況が変わる交通情報を付加した空間データベースの役割をもつものである。ダイナミックマップの高精度 3D 地図と、

GNSS などで取得できる位置データの照合により、自車位置と周辺環境を正確に把握できるようになる。ADAS（先進運転支援システム）を搭載する自動運転レベル 2（部分運転自動化）では、車載カメラなどを利用して、車両単体で周辺環境認識を行っている。一方で、自動運転レベル 3（半自動運転である、条件付き運転自動化）や自動運転レベル 4（完全自動運転）以上を実現するためには、車両単体での周辺環境認識では不十分であり、各種インフラとの協調が必要となる。ダイナミックマップはその情報インフラとして利用される。

ダイナミックマップを構成する情報は、道路上の情報の更新頻度に応じて、静的情報、準静的情報、準動的情報、および、動的情報に分類される（図 9）。静的情報は、路面情報や車線情報、構造物 3D データなどで構成される高精度 3D 地図情報であり、点群や画像、車両の走行軌跡などで構成される 3D 地図共通基盤データを図化した成果であり、更新頻度を 1 か月単位とするものである。準静的情報は、道路工事などによる交通規制情報、広域気象情報、渋滞予測などに関する情報であり、更新頻度を 1 時間単位とするものである。準動的情報は、事故・故障車や落下物などによる一時的な走行規制・交通障害、狭域気象情報などに関する情報であり、更新頻度を 1 分単位とするものである。動的情報は、車々間通信で発信・交換される情報や、交差点周辺の歩行者・自転車情報、交差点に直進する車両などに関する情報であり、更新頻度を 1 秒単位とするものである。

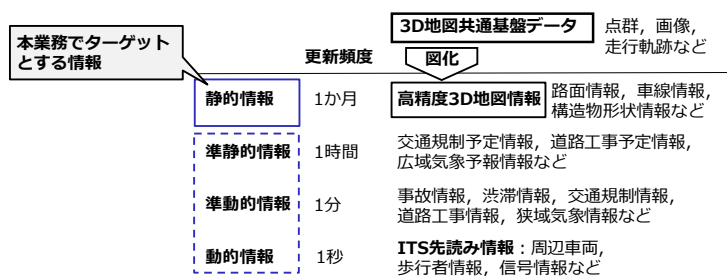


図 9. ダイナミックマップの構成と、本業務でターゲットとする情報

ダイナミックマップの運用に求められる機能は、データ計測、地図生成、データ管理、地図配信、地図更新、公共情報収集、セキュリティ、および、品質管理が挙げられる。船舶版のダイナミックマップにおいては、準静的情報と準動的情報はインフラ側から発信される情報、動的情報は船舶間通信で扱う情報、静的情報は船舶からの周辺計測で取得できる情報として分類できる。都市河川構造物点検において自律型船舶を利用するためには、水上屋内外シームレス測位機能とともに、自律型船舶のための地図整備が必要であるという観点で、本業務では静的情報をターゲットとする。また、自律型船舶向けの地図が未整備である現状において、まずは、点群や画像などの空間データを取得し、高精度 3D 地図を生成し、地図データの利活用において、データ管理・地図配信・地図更新をする機能を検討する必要がある。そのため本業務では、データ計測、地図生成、データ管理、地図配信、および、地図更新をターゲットにする（図 10）。

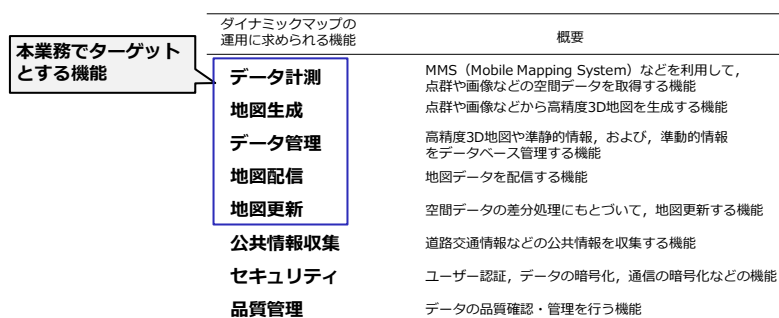


図 10. ダイナミックマップの運用に求められる機能と、本業務でターゲットとする機能

a) 船舶版ダイナミックマップの応用スキーマ

令和4年度に実施した「自動航行のための経路計画の設計法と検証」において、船舶航行空間のセマンティクスモデリングの必要性を示唆しており、その必要性の根拠となる河川空間を再現する情報区分例(表6)を示した。

表 6. 河川空間を再現する情報区分例

区分	地物名	説明
実在地物	橋梁	船上部と相対する面（高さ、形状）
	橋脚	水路の障害となる橋脚の位置
	船着線	船着場において船体と接する線
	浮棧橋線	浮棧橋において船体と接する線
	岸壁線	岸壁において船体と接する線
	標識	規格による
	信号	同上
	その他	同上
仮想地物	水路リンク	水路の物理的なつながりを表すリンク
	航路リンク	推奨される船舶の通路を表すリンク
	区画リンク	水路の限界（区画線）を表すリンク
	その他	規格による

河川空間を再現する情報区分例に対して、自律船舶航行で利用できる空間データ情報区分を追加した表7に示す。仮想地物は、無形線で表現する地物(実際には目で見えない地物)であるため、GIS上で編集するデータと想定する。一方で、実在地物は、LiDARで取得した点群(LiDAR点群)やマルチビームソナーで取得した点群(音響測深点群)を図化することで得られる情報であり、自動処理による地物の細分化が可能である。船舶航行で利用する情報としては高解像度すぎる情報も取得可能であるが、自律船舶航行での自己位置推定で必要となる情報である。また、気中・水中別に利用データが異なることが特徴である。

表 7. 自律船舶航行で利用できる空間データ情報区分

船舶航行で利用する情報区分			自律船舶航行で利用できる空間データ情報区分			
区分	地物名	説明	地物	領域	利用データ	補足事項
実在地物			追加→建物壁面	気中	LiDAR点群	自己位置推定で利用
			追加→樹木	気中	LiDAR点群	自己位置推定で利用
	橋梁	船上部と相対する面（高さ、形状）	橋梁（主桁・床版）	気中	LiDAR点群	自己位置推定で利用
	橋脚	水路の障害となる 橋脚の位置	橋脚・橋台	気中	LiDAR点群	自己位置推定で利用
				水中	音響測深点群	
			追加→閘門・水門	気中	LiDAR点群	自己位置推定で利用
				水中	音響測深点群	
	船着線	船着場において船体と接する線	船着場	気中	LiDAR点群	自己位置推定で利用
			（土台部）	水中	音響測深点群	
	浮棧橋線	浮棧橋において船体と接する線	浮棧橋	気中	LiDAR点群	自己位置推定で利用
	岸壁線	岸壁において船体と接する線	岸壁・分水路	気中	LiDAR点群	自己位置推定で利用
				水中	音響測深点群	
			追加→土砂面	水中	音響測深点群	面的地形を取得
			追加→係留杭	気中	LiDAR点群	自己位置推定で利用
				水中	音響測深点群	
			追加→浮き	気中	LiDAR点群	自己位置推定で利用
	標識	規格による	標識	気中	LiDAR点群	自己位置推定で利用
	信号	同上	信号	気中	LiDAR点群	自己位置推定で利用
	その他	同上	その他	気中	LiDAR点群	自己位置推定で利用
仮想地物	水路リンク	水路の物理的なつながりを表すリンク	水路リンク	水面	図化結果にポリライン追記	
	航路リンク	推奨される船舶の通路を表すリンク	航路リンク	水面	図化結果にポリライン追記	
	区画リンク	水路の限界（区画線）を表すリンク	区画リンク	水面	図化結果にポリライン追記	
	その他	規格による	その他	水面	図化結果に追記	

b) 操船シミュレーション

潮の干満影響を受け水位が変化するため、船舶航行が可能である領域は、時間によって変化する。水位変化が船舶航行に与える影響の例としては、「干潮時には通行できた橋梁が、満潮時には桁下高不足で通行不可となる場合が生じる」といったことが挙げられる。各橋梁には桁下高の値がペイントされているが、その計測精度は正確性に欠け、m 単位でズレがあることを実測で確認している。そのため、ペイントされている桁下高の値を GIS 上で管理したとしても、船舶のナビゲーションなどで活用しづらい。そのため航路計画や船舶航行においては、桁下高を正しく計測したデータの整備が必要であるとともに、船舶航行が時間変化による水位変化に対応できるように、船舶航行時の周辺環境(気中)の 3D 計測および航行シミュレーションも必要となる。

本業務においては、CLAS/SLAM など得た点群を入力データとし、大規模点群のデータ配布におけるハードウェア・ソフトウェア的な課題を解決するアプローチとしての検証や、航行シミュレーションとしての利活用の検討のためにゲームエンジン(Unreal Engine, Epic Games)(図 11)を適用した。ゲームエンジンとは、ゲーム作成支援ツールであり、ゲーム作成に関する主要な共通処理(グラフィックス+物理エンジン+オーディオ+入力処理+AI+ネットワークなどの機能)を代行し、ゲーム開発を効率化するソフトウェアもしくはツールである。多くの代表的なゲームエンジンがあるが、市場で主要なゲームエンジンには、Unity(Unity Technologies)と Unreal Engine(Epic Games)がある。点群活用の観点では、ゲームエンジンを利用して、点群を実行ファイルとして出力することで、点群ビューをインストールしなくても、点群を閲覧できる点が優位である。本業務では、点群の軽量閲覧にとどまらず、ゲームエンジンを用いて操船シミュレーションで点群を利用できるかを検討した(図 12)。

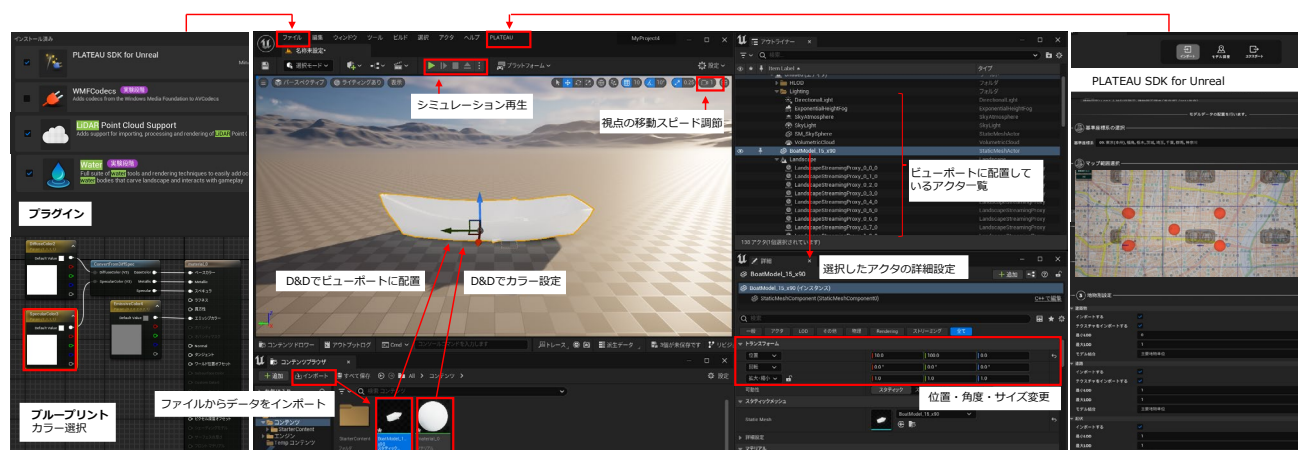


図 11. ゲームエンジン上での編集例



図 12. 操船シミュレーション

2.2.3 リアルタイム地図参照の実証と検証

実施項目 2) リアルタイム地図参照の実証と検証 として、主として、1) 操船に必要な地図参照項目の整理 で取得したデータに加え、意味付けを行なった 3D 地図データを構築するとともに、リアルタイムな地図参照に対応する地図データ構造を開発し、1Hz での自己位置推定が可能であることを検証することを目標達成の指標とした。自動操船で地図参照に求められるリアルタイム性能と GNSS 測位速度より決定することを根拠とし、船舶ナビゲーションが困難な非 GNSS 測位環境での地図参照ができた段階で、達成目標のレベルに到達したと評価した。

実施項目 2) リアルタイム地図参照の実証と検証 に関して、検討すべき要素技術である、c) ストリーミング点群のセグメンテーション と d) 点群ベースマップを利用するマップマッチング は、下記のとおりである。

c) ストリーミング点群のセグメンテーション

ストリーミング点群は、時系列で得られる点群データである。都市や施工などのデジタルツインが本格的になるにしたがって、自動運転や建機施工、水上移動などで計測した点群は、都市を広域・高解像度・高頻度計測した点群として扱える可能性があるとともに、自動運転自動車や無人建機、自律船舶などのロボットのための地図作成・更新という測量分野における新しい市場を議論できる可能性がある。しかしながら、現状よりも格段に大規模な点群処理が求められるため、目視判読を多く含む自動化では対応しきれないことが想定される。この課題に対して、ストリーミング点群からの直接的な図化や 3D モデリング、3D マッピングの自動化が有効策となる。点群を利用する図化や 3D マッピングの自動化においては、点群のメッシュ化やボクセル化のみでは不十分であり、点群上の地物判読作業にあたる物体認識処理が求められ、3D モデルフィッティングや機械学習が適用される。機械学習にもとづく物体認識処理は、統計的処理によって点群をグループ化するクラスタリングと、事前に設定したルールや知識にもとづいて点群をグループ化するセグメンテーションに分類できる。認識した物体の属性推定も自動化する場合は、セグメンテーションを適用する。点群のセグメンテーションは、点群を利用する 3D マッピングや Scan-to-BIM、自動運転の分野における共通処理であり、深層学習を適用する事例が近年増えている。本業務では、LiDAR点群の処理では、ストリーミング点群のセグメンテーション処理を CLAS/SLAM の内部処理に織り込んだ。一方で、マルチビームソナーデータ(音響測深点群)は、ブラックボックスを経由して出力されるランダム点群であり、直接的にストリーミング点群として扱えないため、ランダム点群からマルチビームスキニングを簡易再現する処理を構築し、ストリーミング点群のセグメンテーション処理を適用した。

c-1) ストリーミング点群(CLAS/SLAM 点群)のセグメンテーション

ストリーミング点群(CLAS/SLAM 点群)から橋梁、護岸、建物の順番に抽出・分類する例を図 13 に示す。

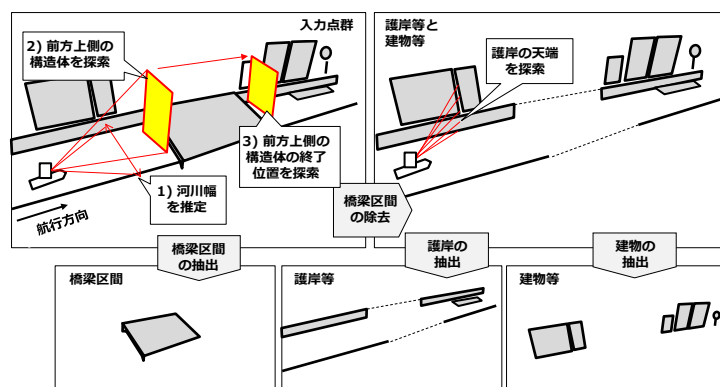


図 13. ストリーミング点群(CLAS/SLAM 点群)のセグメンテーション(橋梁, 護岸, 建物)

まず、ストリーミング点群から河川幅の推定、河道内にある船舶の前方上側にある構造体の探索、前方上側の構造体の終了位置の探索の処理をととして、橋梁のある区間を特定し、橋梁を多く含む点群を抽出する。点群からの 3D モデリングにおいて、橋梁以外の地物をノイズとして除去して、他地物のラベルの再割り当てをすることを前提に、抽出した点群には橋梁周辺にある護岸や街路樹などを含むことを許容する。次に、ストリーミング点群から橋梁を多く含む点群を除外し、護岸と建物を含む点群を抽出する。

護岸と建物を含む点群を抽出後、護岸を含む点群と、建物を含む点群へ分割する(図 14)。まず、点群をレンジ画像化し、スキニングラインから水面の高さを推定し、水面からの不連続点を護岸の天端と推定する。水面の高さは、スキニングライン上において、LiDAR 位置より低い位置、かつ、LiDAR の鏡面反射による点群の面对称性を利用して抽出した変化点から求める。天端の地盤高を閾値とし、閾値より低い位置にある点群は護岸を含む点群、閾値より高い位置にある点群は建物を含む点群として分割する。閾値は左岸と右岸で独立に求める。

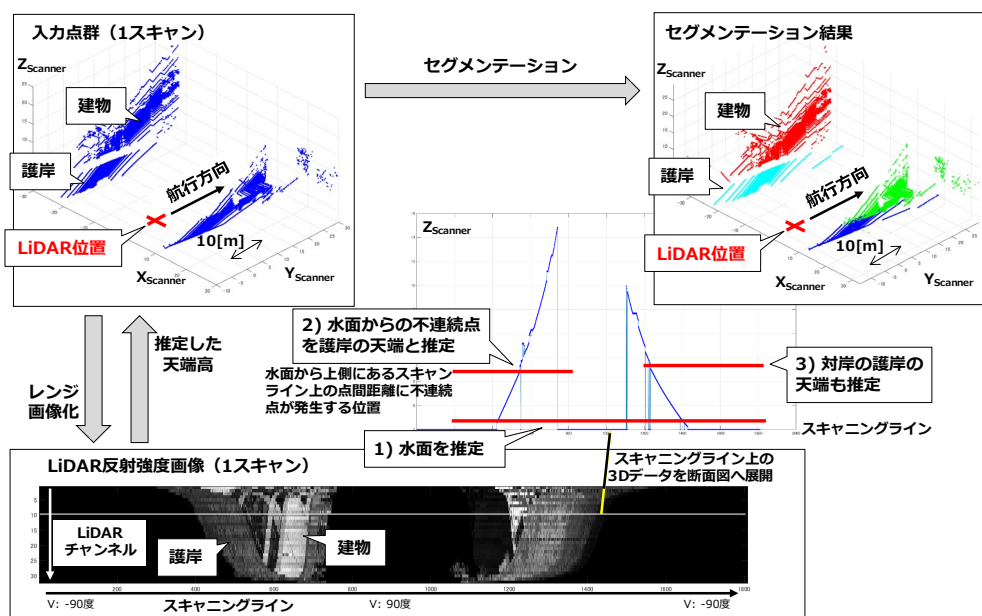


図 14. ストリーミング点群の分類(護岸と建物)

建物を含む点群から各建物の点群を抽出する処理を図 15 に示す。まず、セグメンテーションにおいて地盤面付近の地物で建物間が連結されないように、任意の高さ(建物の 1~2 階)よりも高い空間にある点群を選択する。次に、選択した点群を 2D セル空間へ点群を投影し、ラベリング処理を適用した結果を参照して、点群にラベル付けをする。LOD3 のモデリングをする(点群から壁面や窓などの抽出をする)場合は、レンジ画像上での距離画像や法線ベクトル画像から抽出したエッジ画像を利用できる。

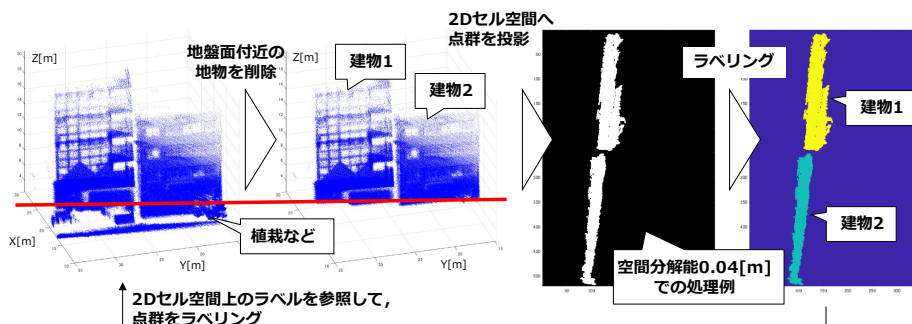


図 15. 2D セル空間を利用した建物ラベリング

c-2) マルチビームソナーデータのセグメンテーション

マルチビームソナーデータ(音響測深点群)は、ブラックボックスを経由して出力されるランダム点群であり、直接的にストリーミング点群として扱えないため、ランダム点群からマルチビームスキニングを逆推定する処理を構築し、ストリーミング点群のセグメンテーション処理を適用した。ランダム点群からマルチビームスキニングを簡易再現する処理では、マルチビームソナー測深で同時取得するGNSS測位データを利用することで、ランダム点群を構造化する。これにより、水中の護岸天端位置の推定でのスキニング角の利用や、地物推定における閾値決定数の削減を容易にすることで、RANSAC(Random sample consensus)や領域拡張法などを利用するセグメンテーション処理を大幅に簡単化できる(図16)。本業務で事前入力する閾値は、護岸の傾斜角範囲(75°)と、橋脚・橋台・係留杭等を検出するための水深(水面下2m)のみとした。

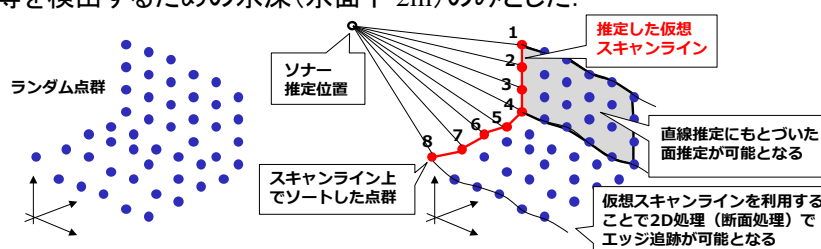


図16. ランダム点群(音響測深点群)の構造化

都市河川のように水深の浅い区間を計測した点群は、点群の疎密差が大きいや水底部のオクルージョンのために欠測領域が多いことが特徴であり、教師なし学習と教師あり学習の適用が容易ではないシーンを多く含む。また、点群の疎密差や欠測領域が多い点群や構造化された点群を入力データとして扱う場合は、知識ベースの分類が作業・計算コストの面で良好なことが多い。そこで本研究では、知識ベースの分類を適用する(図17)。

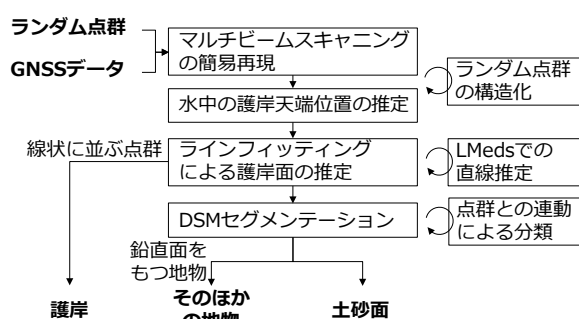


図17. 水中点群の分類処理

d) 点群ベースマップを利用するマップマッチング

令和4年度における各実施項目で共通する根拠データとなる成果として、CLAS/SLAMの測位精度がRTK-GNSS測位との比較で、位置再現性が地図情報レベル500にもとづく精度であることを示したが、他の精度検証手法として、令和5年度に開発する予定であったオープン3D都市モデルを利用するマップマッチングを前倒し、PLATEAUを利用して検証している。PLATEAUは、3D都市モデル(CityGML2.0・セマンティクスモデル)をオープンデータ化しているものである。本業務で利用したデータは、3D都市モデル(Project PLATEAU)の「東京都23区(CityGML2020年度, 作成者:国土交通省都市局都市政策課, 最終更新:2022年4月1日, 23:44(UTC+09:00))」であり、オリジナルデータは、都市計画基本図(地図情報レベル2500, SD < 1.75 m)である。都内

については、東京駅周辺の 3D モデリング結果が充実しているものの、日本橋川の江戸橋付近では建物モデルにテクスチャなしモデルが混在し、日本橋川の竹橋付近や神田川の聖橋・お茶の水付近では、建物モデルはほぼテクスチャなしである。また、橋梁および護岸周辺の形状情報は現時点で存在しない(図 18)。しかしながら、本業務で対象としている範囲においては、建物の屋根外形データ(LOD0・RoofEdge)は充実していることに着目し、この 3D 都市モデルの記述にある LOD0 (RoofEdge) の posList 座標値を抽出し、ポリゴンを再構成し、参照用の地図データとした。RoofEdge とは、屋根外形(建築物の屋根の外形線により囲まれた面)のジオメトリ情報である。オープン 3D 都市モデルを利用するマップマッチングは、この参照用の地図データと、CLAS/SLAM で生成した点群と重ね合わせる処理である。

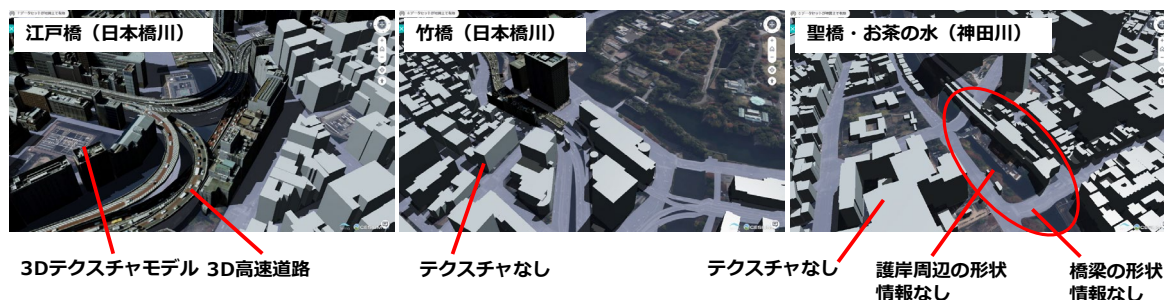


図 18. 現時点での PLATEAU の概要

オープン 3D 都市モデルを利用するマップマッチングは、絶対精度を確保できることが強みであるが、現時点で整備されているオープン 3D 都市モデルのうち、広域で整備されている建物データが地図情報レベル 2500 の LOD0 (RoofEdge) である一方で、CLAS/SLAM で生成した点群は、地図情報レベル 500 であるため、照合する地物が一部で異なる課題がある。また、オープン 3D 都市モデルの更新頻度を高くすることは理想であり、ダイナミックマップの静的情報の更新頻度は 1 か月単位としているものの、計測・図化・点検にかかる費用の制約から、高頻度なオープン 3D 都市モデルの更新は容易ではない。一方で、定期的に同一経路を巡回する自律移動ロボット系の車両や船舶に点群を取得する機能があれば、点群の高頻度な取得は可能であり、高頻度観測された点群をそのままベースマップとしたマップマッチングを適用することが、高精度測位に有効なアプローチとなりえることに着眼できる。点群ベースマップを利用するマップマッチングには、CLAS/SLAM で採用しているスキャンマッチングにもとづく SLAM を適用可能であるとともに、GNSS 測位環境であれば、CLAS で得られる PPP-RTK 測位結果を良好な初期値として扱えるため、初期値を与えるスキャンマッチングを採用した。本業務では、点群ベースマップを利用するマップマッチング処理(図 19)を開発し、自己位置推定の処理性能を検証した。

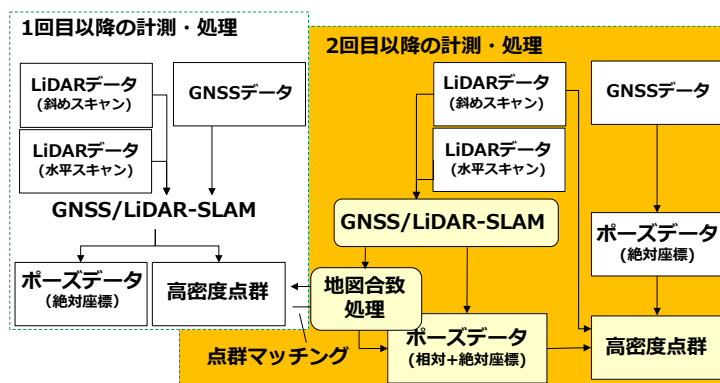


図 19. 点群ベースマップを利用するマップマッチング

2.3 実データ取得と処理

2.3.1 令和5年度の実験概要

多様かつ集中的に計測し、データセット間での比較を可能にするために、GNSS 環境・非 GNSS 環境で構成される日本橋川・神田川を重点河川として選定した。そのほか、月島・晴海・台場周辺を実験対象とした(図 20)。

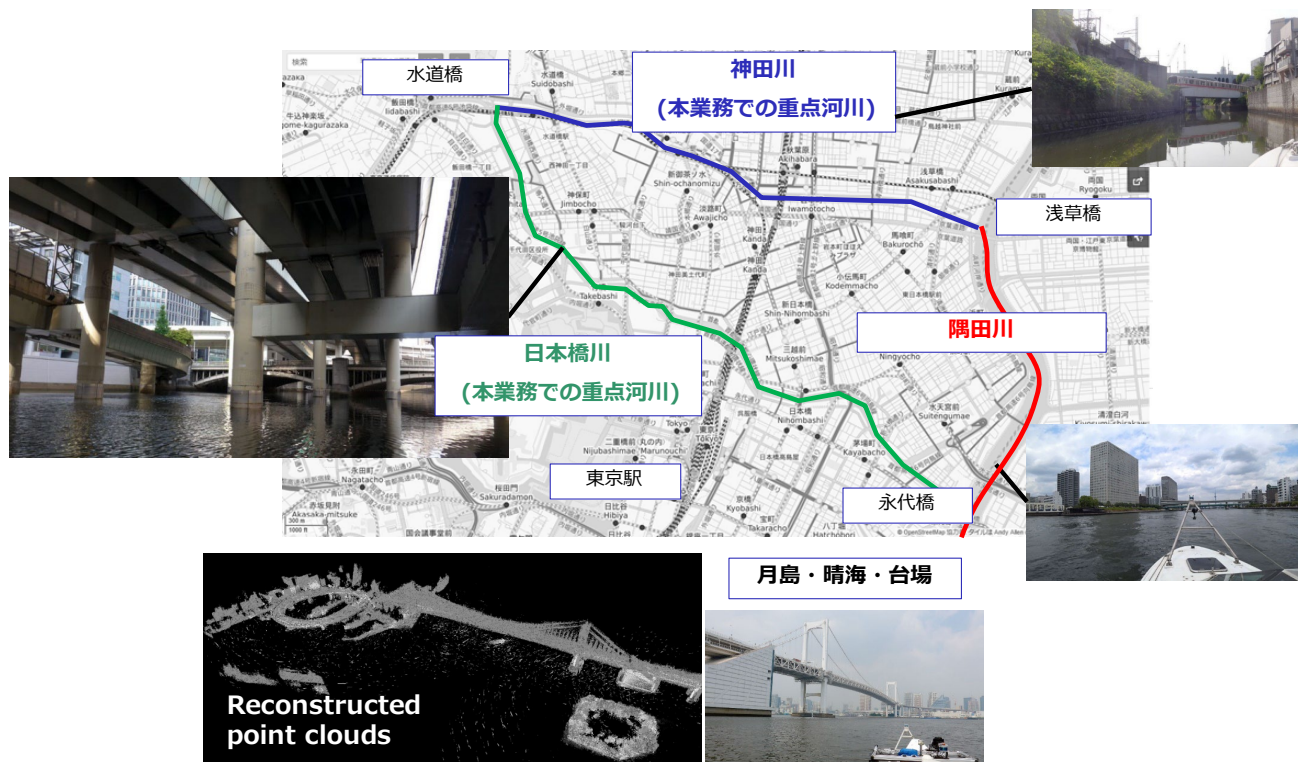


図 20. 実験対象

実施計画にもとづき実施した河川計測実験の実施日(表 8)において、本業務で構築している船舶搭載 3D 計測システム(図 21)で計測実験を実施した。60 分間あたり 36,000 点の位置姿勢データと標準 20 億点程度の点群を取得する設定(ただし、1 スキャンで 6 万点(水平 4 万点, 斜め 2 万点), 10Hz の場合)を適用した。

表 8. 河川計測実験の実施日一覧

ID	実施日	時刻	対象河川	概要
1	2023/5/12	12:00-14:00	日本橋川+神田川	テレビ撮影対応, GNSS/LiDAR-SLAM
2	2023/6/7	9:00-12:00	日本橋川+神田川	GNSS/LiDAR-SLAM
3	2023/7/7	10:00-13:00	日本橋川+神田川	GNSS/LiDAR-SLAM
4	2023/7/19	9:30-12:00	月島・レインボーブリッジ	CLAS/LiDAR-SLAM
5	2023/8/30	9:00-12:00	神田川	マルチビームソナー(中断), CLAS/LiDAR-SLAM
6	2023/9/15	10:00-13:00	神田川	マルチビームソナー, Hovermap, CLAS/LiDAR-SLAM
7	2023/9/29	9:00-12:00	神田川	マルチビームソナー, Hovermap, CLAS/LiDAR-SLAM
8	2023/10/13	9:00-12:00	日本橋川+神田川	CLAS/LiDAR-SLAM

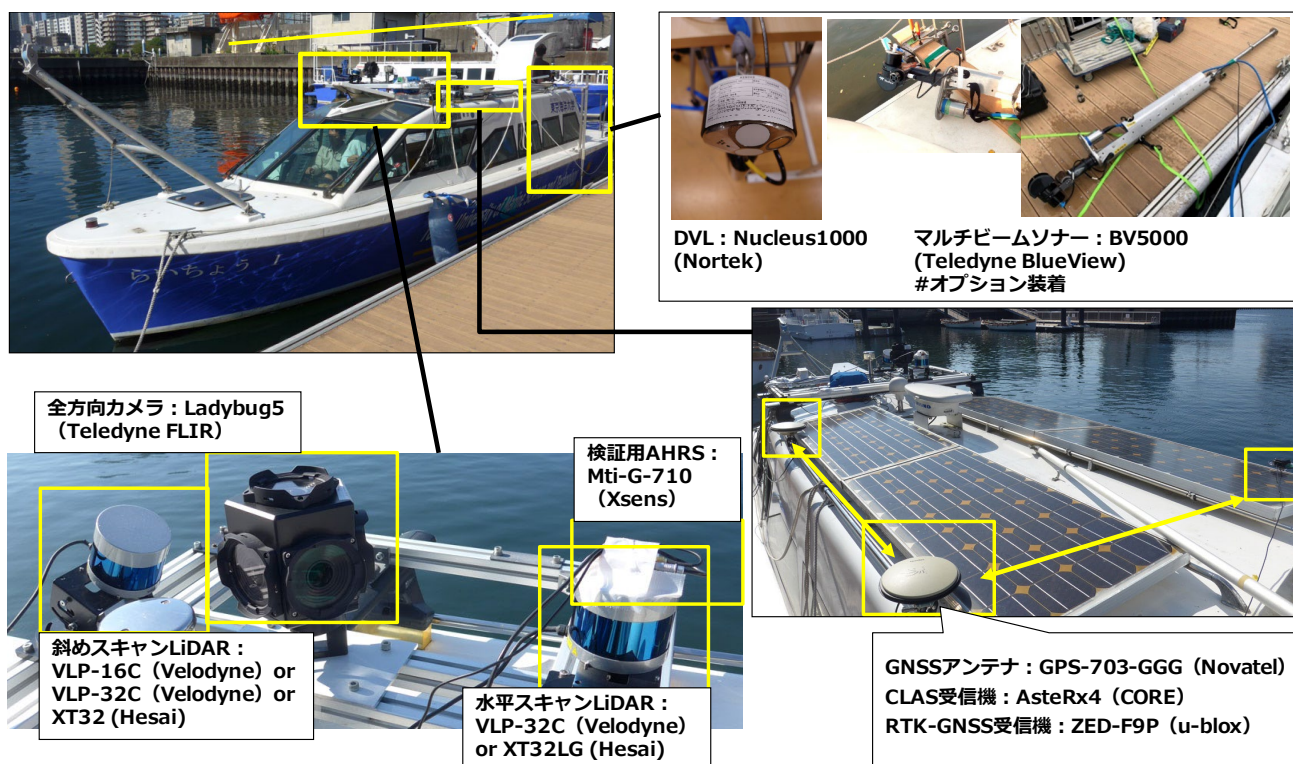


図 21. 本業務で構築している船舶搭載 3D 計測システム

本業務で構築している船舶搭載 3D 計測システムは、電池推進船らいちょうIを計測プラットフォームとし、CLAS 利用の GNSS 測位データ、水平断面および斜め断面のレーザースキャニングによる点群、全方向画像を主データとして取得するものである。CLAS 利用の GNSS 測位では、GNSS アンテナに GPS-703-GGG-HV (NovAtel), GNSS モジュールに AsteRx4 (Septentrio) および mosaic-X5 (Septentrio) を艀装し、すべて 5Hz で測位データを取得した。レーザースキャニングでは、水平スキャニングをする LiDAR として VLP-32C (Velodyne), 斜めスキャニングをする LiDAR として VLP-16 (Velodyne) を艀装し、点群 (10Hz) を取得した。高解像度の全方向カメラとして、Ladybug5 (Teledyne FLIR) を艀装し、全周画像 (1Hz) を取得した。さらに、精度検証用および参照用として RTK-GNSS 測位 (ZED-F9P, u-blox) による測位データや、前方カメラ (HDR-AS300, Sony) による高解像度動画、低解像度の全方向カメラ (Theta Z1, Ricoh) による全周画像 (30Hz), DVL (Nucleus1000, Nortek), マルチビームソナー (BV5000, Teredyne BlueView), ハンドヘルド LiDAR (Hovermap, EMESENT) (図 22) を追加艀装した。

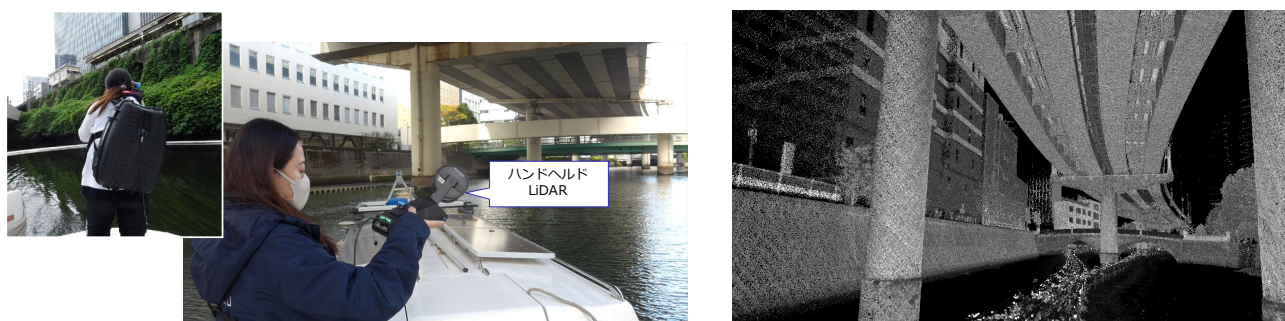


図 22. ハンドヘルド LiDAR 計測 (左: 計測風景, 右: 取得点群)

GNSS 環境・非 GNSS 環境で構成される日本橋川・神田川の測位環境の確認成果として、表 8 に示した実験 ID8 において CLAS を利用した測位の結果例を図 23 に示す。複数の橋梁が架かっている神田川は GNSS 測位環境と非 GNSS 測位環境が混在している環境であることと、上空が首都高で覆われている日本橋川がほぼ全区間で非 GNSS 測位環境であることが示されている。

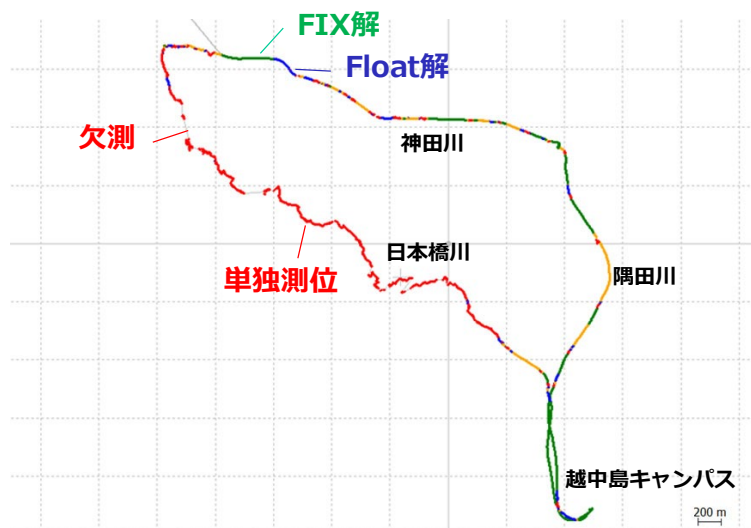


図 23. CLAS を利用した測位の結果 (2023/10/13 取得)

日本橋川および神田川で取得したデータから CLAS/SLAM で生成した点群を図 24 に示す。生成後の点群は、点間隔が 4cm 程度であり、測位精度は相対精度で数 cm 以内、絶対精度で 10cm 以内である。首都高(日本橋川)や聖橋(神田川)の例が示すように、橋梁下などの非 GNSS 測位環境においても点群を生成できていることがわかる。また、主桁や床版などの橋梁の部材が判読できるとともに、護岸や栈橋、水門などの詳細形状も判読できるレベルで点群を生成できていることを示している。そのほか船舶などの地物も再現できることを示している。図 25 は、表 8 に示した実験 ID6 および ID7 で取得したマルチビームスキャニングソナーで取得した点群(音響測深点群)から生成した DSM(Digital surface model)出力例である。実験 ID6 および ID7 とも、神田川(隅田川-御茶ノ水)の左岸と右岸を計測対象とし、2 往復分で 1700 万点の点群を取得した。艀装した音波送受波器の姿勢が水流でずれないようにするために、航行速度は約 3 knot とした。取得した点群の点間隔は、航行方向 6 ～10cm、スキャニング方向 4cm 程度とした。水深が浅すぎ、計測不可であった水底の点群は取得していない。

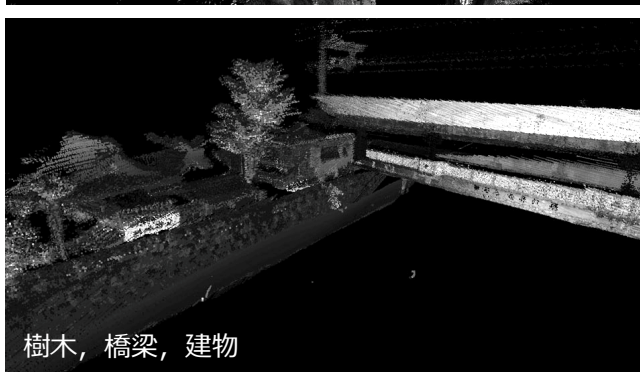
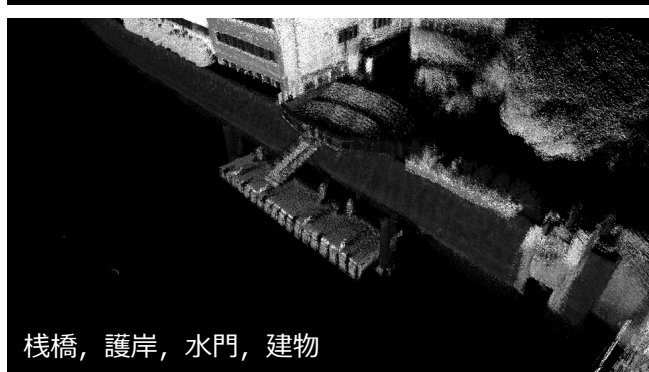
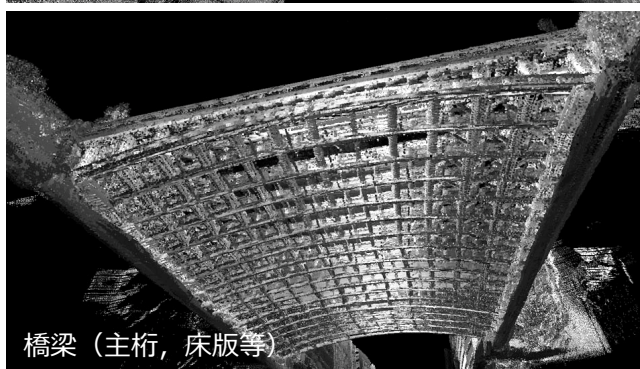
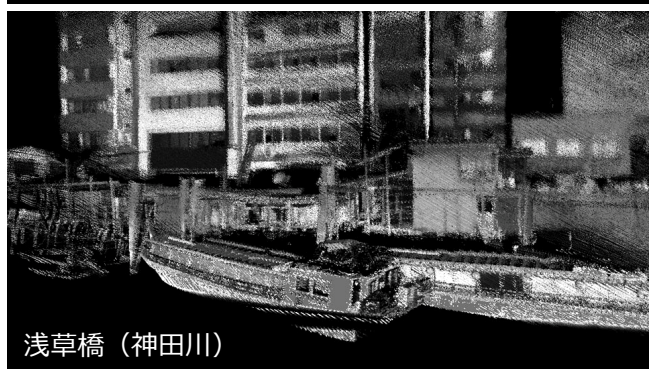
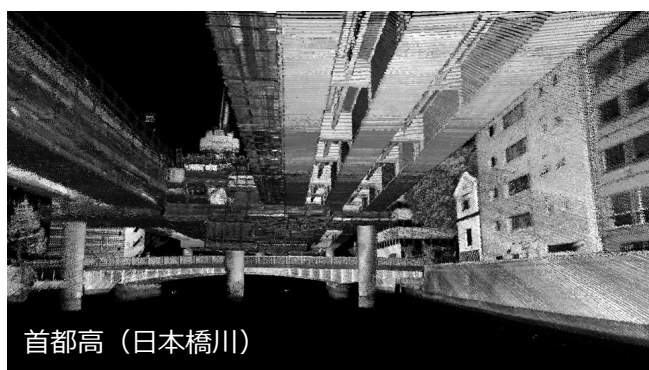


図 24. CLAS/SLAM で生成した点群

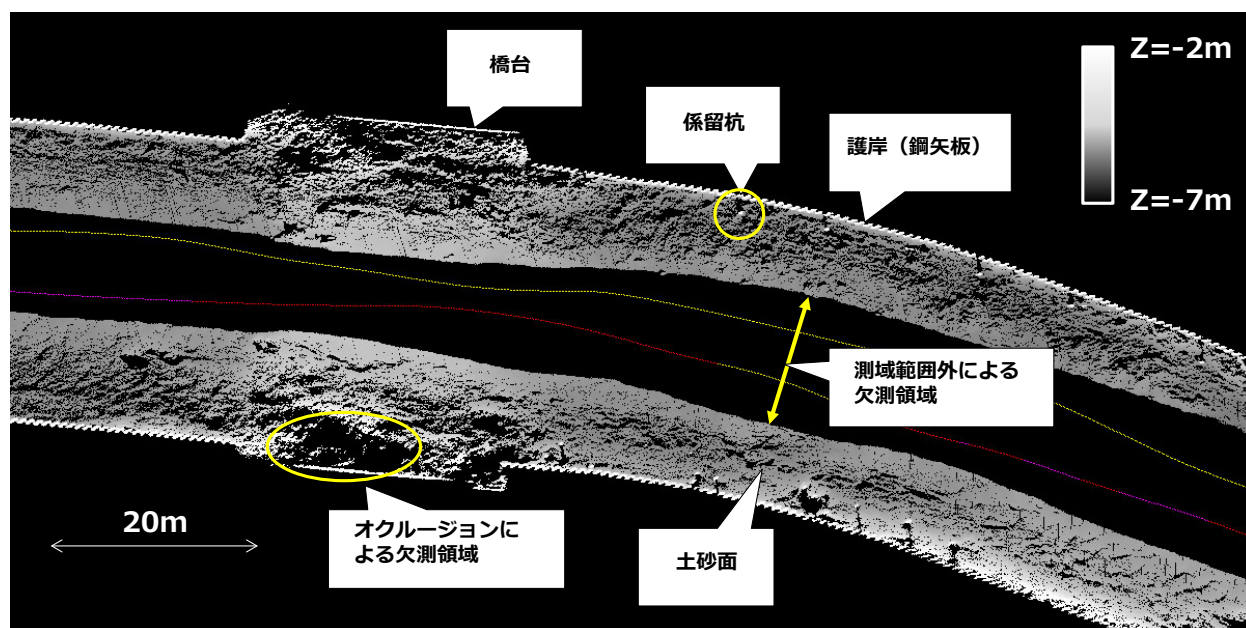


図 25. 音響測深点群から生成した DSM (神田川・左衛門橋付近)

2.3.2 操船に必要な地図参照項目の整理

a) 船舶版ダイナミックマップの応用スキーマ

表 5 に対して、自律船舶航行を想定した地物分類を表 9 に示す。本業務では、ジオメトリの幾何精度は数 cm であることを想定したが、地物分類については CityGML の LOD1 および LOD2 に相当するレベルでできれば十分であり、都市河川空間を建物、樹木、橋梁、栈橋、岸壁・護岸、係留杭、標識、信号、土砂面を地物分類できれば、自律船舶航行を想定した地物分類として適切であると判断した。「その他」には、他船舶などの動体が主として該当する。細分類に記述した項目は、CityGML の LOD3 に相当するレベルで検討する対象となる。自律船舶航行を想定した地物分類の適用にあたって、利用するデータは点群とした。気中で計測できる点群を LiDAR 点群、水中で計測できる点群を音響測深点群(マルチビームスキャニングデータ)とした。気中の点群は SfM/MVS (Structure from Motion and Multi-view Stereo)による画像計測でも取得できるが、都市河川においては、複数測線での撮影は容易ではなく、SfM 処理におけるカメラ位置姿勢推定に求められる多視点性に欠けるため、LiDAR での点群取得を前提とした。

表 9. 自律船舶航行を想定した地物分類

区分	領域	利用データ	地物	クラス分類	細分類
実在地物	気中	LiDAR点群	建物壁面	建物	壁面 開口部
			樹木	樹木	樹幹 枝葉
			橋梁（主桁・床版）	橋梁	主桁 床版 橋脚
			橋脚・橋台		橋台
			閘門・水門	閘門・水門	開閉部 非開閉部
			船着場	栈橋	デッキ 土台
			浮栈橋		柱
			岸壁・分水路	岸壁・護岸	コンクリート護岸 非コンクリート護岸
			係留杭	係留杭	係留杭
			浮き	浮き	浮き
			標識	標識	標識
			信号	信号	信号
			その他	その他	その他
	水中	音響測深点群	橋脚・橋台	橋梁	橋脚 橋台
			閘門・水門	閘門・水門	開閉部 非開閉部
			船着場（土台部）	栈橋	土台
			岸壁・分水路	岸壁・護岸	コンクリート護岸 非コンクリート護岸
			係留杭	係留杭	係留杭
			土砂面	土砂面	土砂 大型ゴミ

b) 操船シミュレーション

CLAS/SLAM やマルチビームソナーで得た点群を入力データとし、大規模点群のデータ配布におけるハードウェア・ソフトウェア的な課題を解決するアプローチとしての検証や、航行シミュレーションとしての利活用の検討の結果として、ゲームエンジン(Unreal Engine, Epic Games)を利用した操船シミュレーションの事例を示す。まず、船舶同士の座礁リスクを可視化することで、船舶同士の衝突や座礁を回避するための最適な航路や操舵方法を検討できるよう、船舶同士がすれ違う際の座礁予測を可視化した(図 26)。次に、船舶が安全に航行するための水深確保を支援し、衝突や船舶の損傷防止を検討できるよう、潮位変化による水面下障害物との衝突予測を可視化した(図 27)。さらに、潮位変化による頭上の構造物との衝突事故防止を検討できるよう、潮位変化による橋梁および水面下障害物との衝突予測を可視化した(図 28)。なお、水面の再現には、Unreal Engine の Water プラグインを利用した。

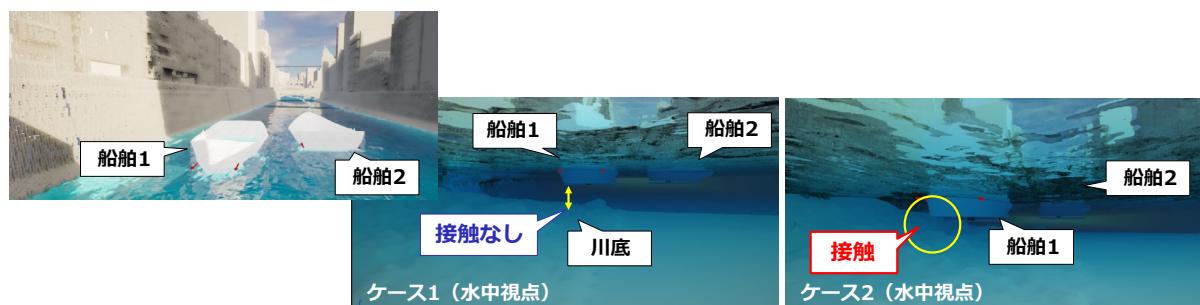


図 26. ゲームエンジン利用例 1 (船舶同士がすれ違う際の座礁予測)

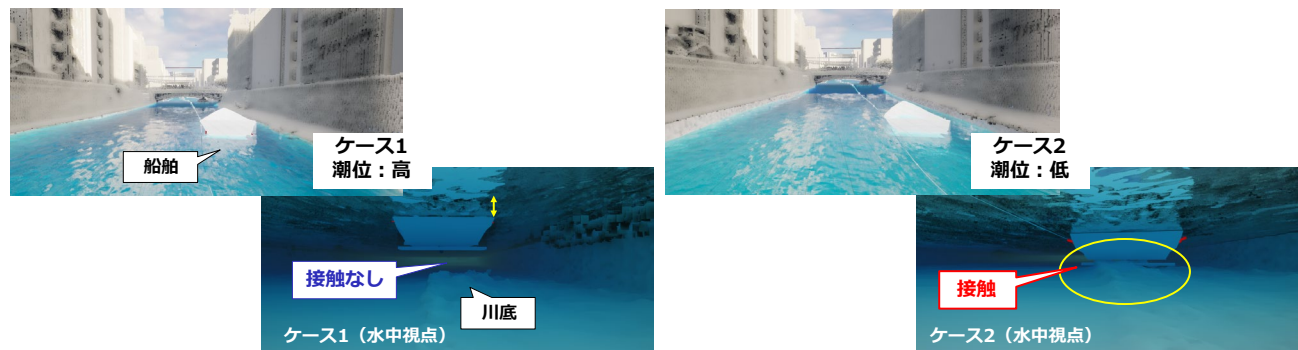


図 27. ゲームエンジン利用例 2 (実施例潮位変化による水面下障害物との衝突予測)

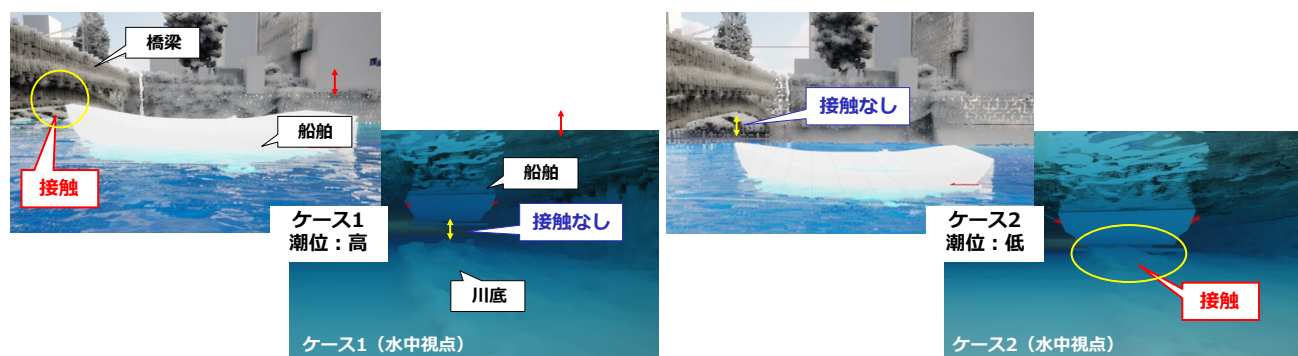


図 28. ゲームエンジン利用例 3 (潮位変化による橋梁および水面下障害物との衝突予測)

2.3.3 リアルタイム地図参照の実証と検証

c) ストリーミング点群のセグメンテーション

ストリーミング点群のセグメンテーション処理は、本業務で開発している CLAS/SLAM の内部処理へ織り込んだ（図 29）。ストリーミング点群のセグメンテーションは、図 30 に示す内容で実装した。各シーンで得た点群に対して、横軸方向に示したデータ処理フローに沿ったレンジ画像生成、ラベル画像生成、点群ラベルづけを適用することを基本処理とし、横軸方向に示したデータ処理フローに沿って、ラベルづけ点群を次シーンで得たラベルづけ点群で参照し、ラベルづけ点群のデータセットとして統合した。

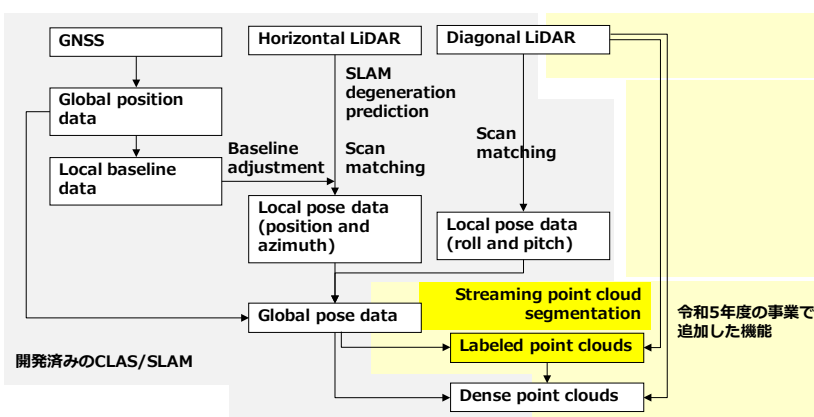


図 29. ストリーミング点群のセグメンテーションの CLAS/SLAM の内部処理への織り込み

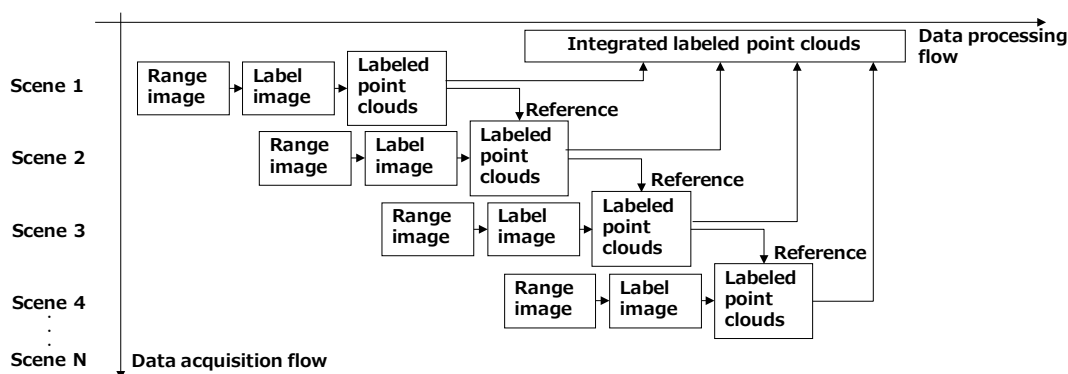


図 30. ストリーミング点群処理の実装例

ストリーミング点群のセグメンテーションにおけるラベリング処理は図 31 に示す内容で実装した。縦軸を各セグメント、横軸をデータ取得フローで示している。

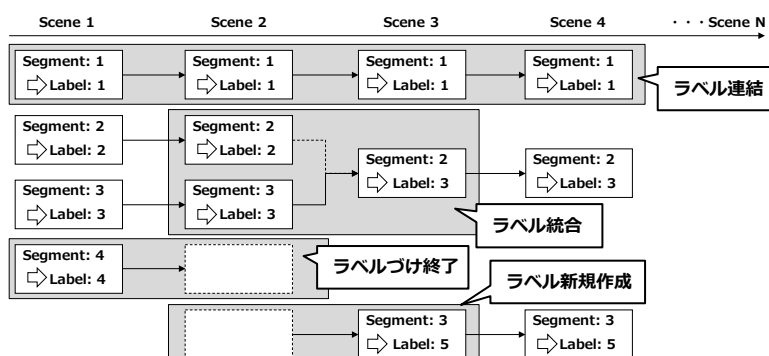


図 31. ストリーミング点群のセグメンテーションにおけるラベリング処理

ラベリング処理は、ラベル新規作成、ラベル連結、ラベル統合、ラベルづけ終了の 4 種の処理で構成した。前シーンに対応するセグメントがない場合、ラベルを新規作成し次シーンに対応するセグメントがない場合、ラベルづけ終了させた。ラベル連結では、連続するシーン間のセグメントの対応付けがなされた場合、同じラベル番号を割り当てた。ラベル統合では、連続するシーン間のセグメントの対応付けにおいて、異なるラベルが付与されたセグメントがラベル連結された場合に、ラベリングにおける矛盾を解消するために、任意のラベルでの上書きを適用した。

ストリーミング点群のセグメンテーションで得た結果は、各シーンで得たラベルづけセグメントを扱うセグメント層、ラベルで統合したセグメントを扱うクラスタ層、クラスタ層のセグメントに意味づけをした結果を扱う 3D モデル層 (CityGML 層) で管理した。ストリーミング点群を橋梁、護岸、建物へ分類する処理例を図 32 に示す。

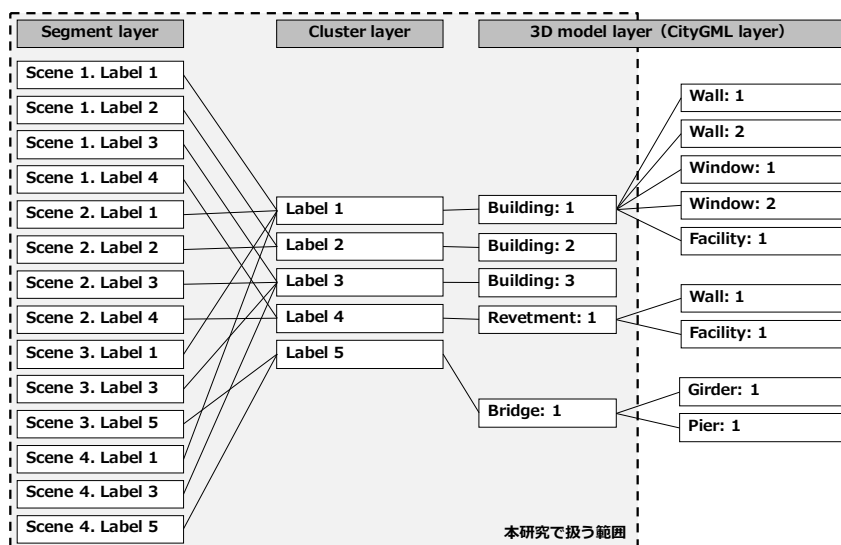


図 32. ラベルづけした点群からの地物分類

c-1) LiDAR 点群 (CLAS/SLAM 点群) のセグメンテーション

セグメンテーション処理へ入力したデータを図 33 に示す。

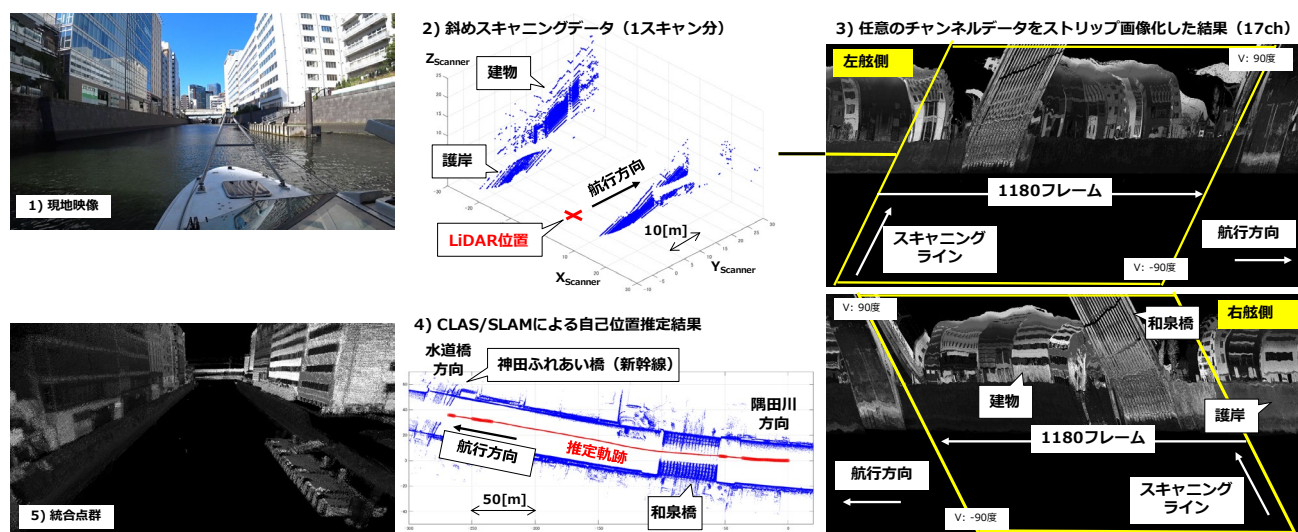


図 33. セグメンテーション処理へ入力したデータ

地物分類結果を図 34 に示す。入力点群に対し、建物、護岸、および、橋梁が分類できていることが示されている。これらのうち、建物をさらに各建物へ分類した結果を図 35 に示す。SLAM 処理の失敗で点群の統合位置がずれた箇所が生じた場合、建物の分類に失敗する例(2 つの建物が統合された例)も含めている。この結果から、CLAS/SLAM による点群生成の精度が地物分類に影響することがわかる。

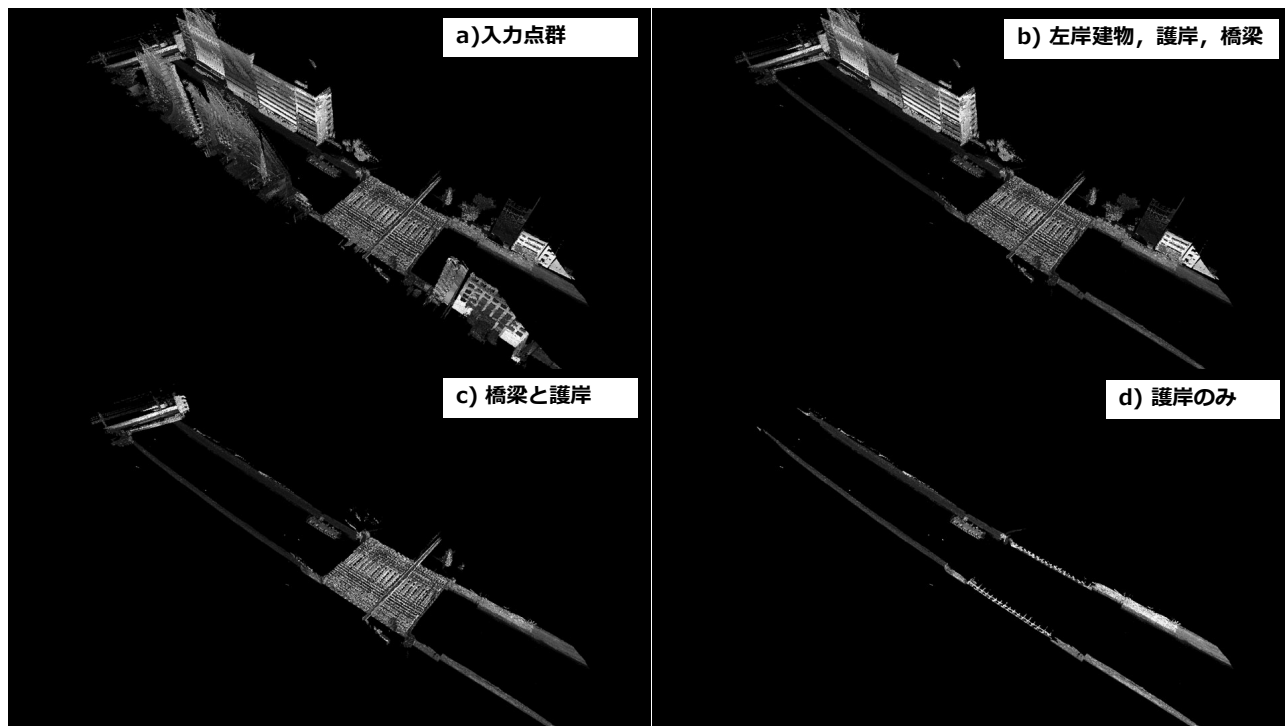


図 34. 地物分類結果(全体)

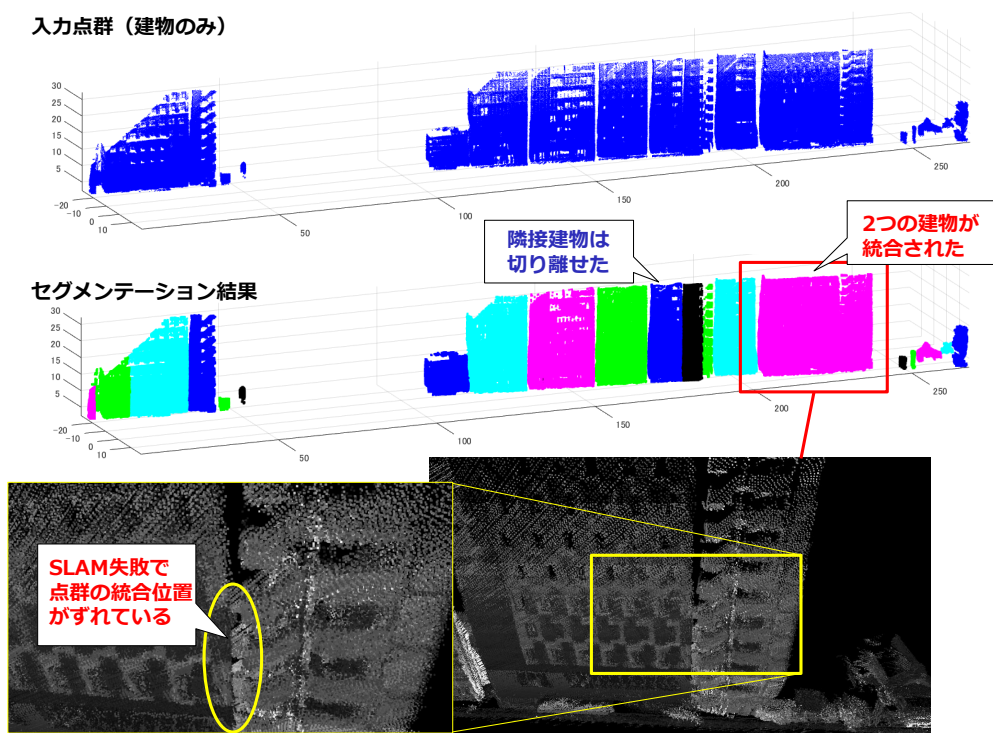


図 35. 地物分類結果(建物のみ)

c-2) マルチビームソナーデータのセグメンテーション

セグメンテーション処理に入力したマルチビームソナーデータ(音響測深点群)の一部を図 36 および図 37 に示す。また、セグメンテーション結果から、コンクリート護岸、非コンクリート護岸(鋼矢板)、橋梁(橋桁)、係留杭、土砂面を含んでいる区間の処理例として、図 38 に示す。それぞれの地物が分類できていることがわかる。

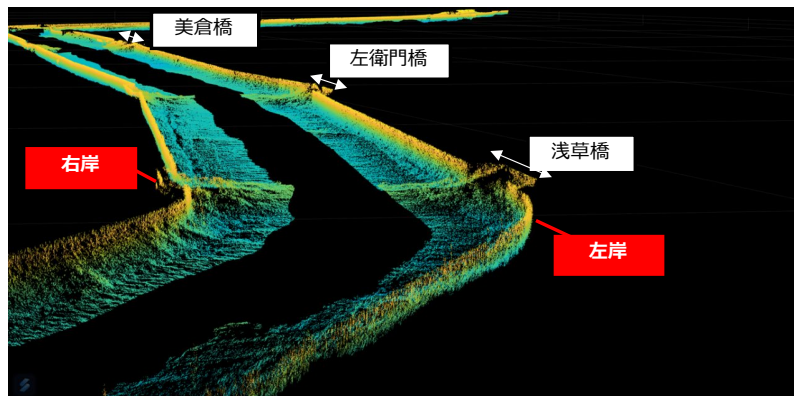


図 36. マルチビームソナーデータ(音響測深点群)

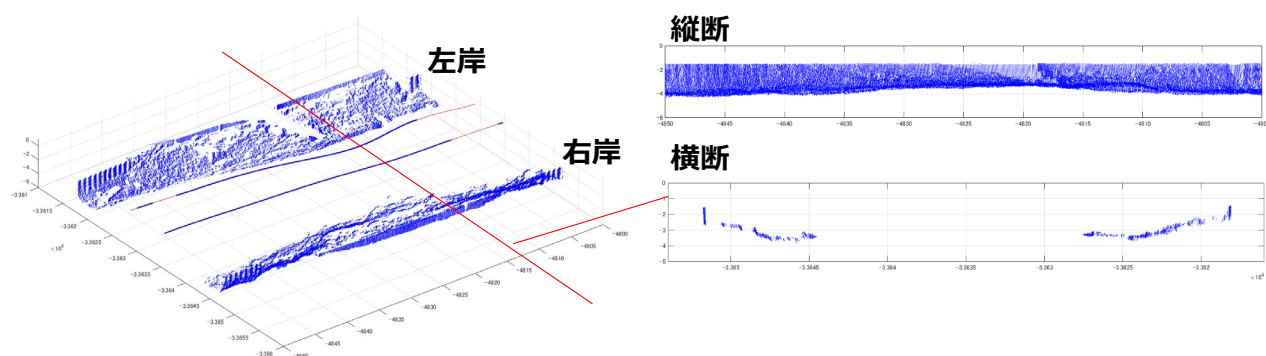


図 37. マルチビームソナーデータ(音響測深点群)の縦断・横断

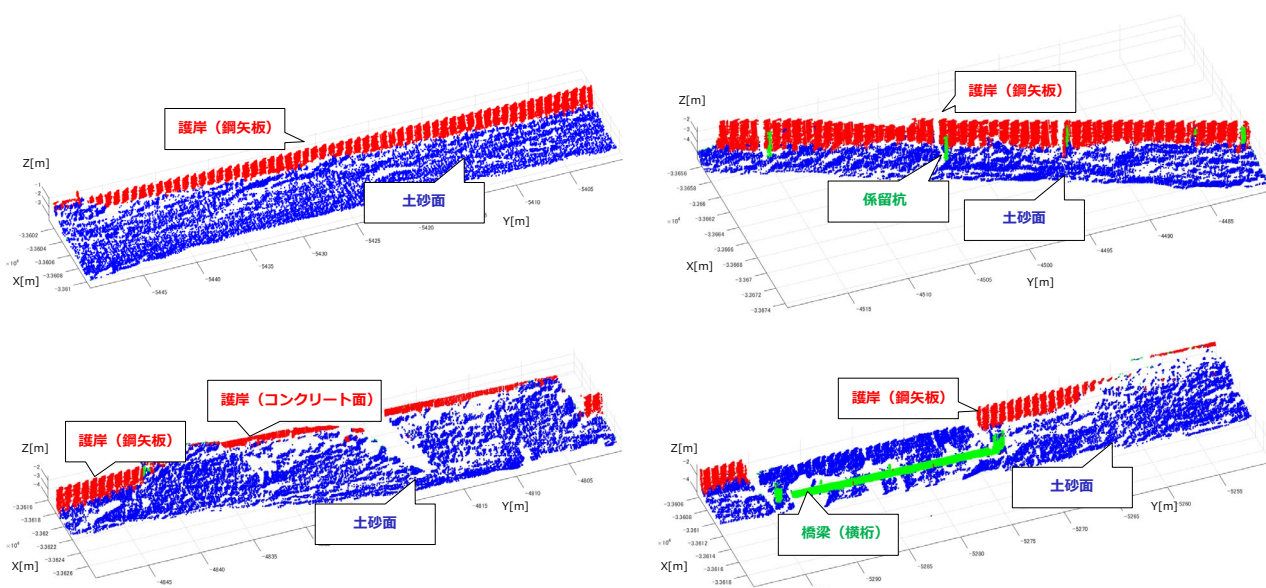


図 38. 音響測深点群のセグメンテーション結果例

d) 点群ベースマップを利用するマップマッチング

表 8 に示した実験 ID1 (2023/5/12: 下流から上流方向へ向かって計測) と ID5 (2023/8/30: 下流から上流方向へ向かって計測) のデータ (図 39) を利用して, リアルタイム地図参照の検証を実施した. それぞれ 5[kn] 程度の航行速度で計測したデータであり, 潮位変化は 0.3[m] である. ID1 の結果をベースマップとし, ID5 のデータで船舶ナビゲーションを再現した結果を図 40 に示す. また, 各 300 秒間のデータセット 4 区間のマップマッチング処理 (地図合致処理) の結果から, LiDAR-SLAM で生じる蓄積誤差をランドマークアップデートにもとづいた補正処理 (図 41) をリアルタイム処理 (データ取得時間よりも短い時間) で実現できることを確認できた (表 10).

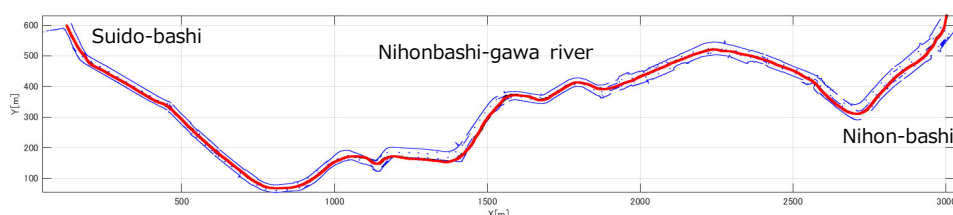


図 39. リアルタイム地図参照の検証で利用した区間 (日本橋川)

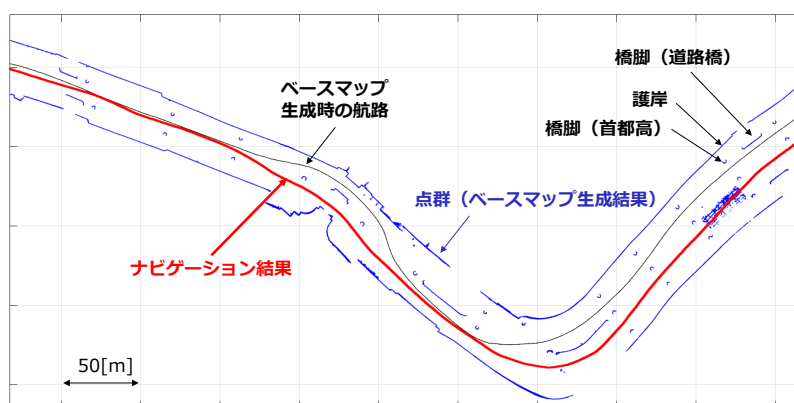


図 40. 船舶ナビゲーションを再現した結果

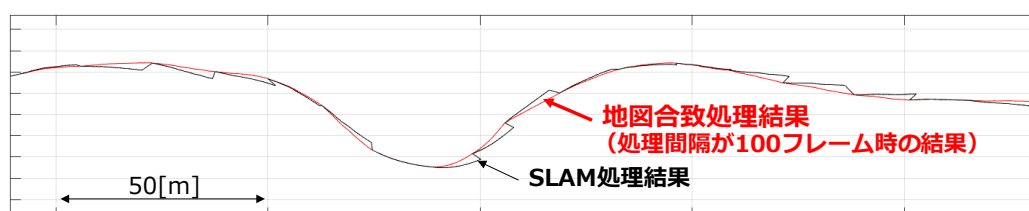


図 41. 拡大表示したナビゲーション検証結果の一部

表 10. 処理結果 (処理時間等)

The number of scan positions	Relocalization intervals [scan position]	Relocalization intervals [sec]	Scan matching		Relocalization		Total [sec]
			Total [sec]	Average [sec]	Total [sec]	Average [sec]	
3000	100	10	223.94	0.07	58.78	1.90	282.72
3000	200	20	245.74	0.08	29.66	1.85	275.40
3000	300	30	226.23	0.08	19.40	1.76	245.63
3000	400	40	218.32	0.07	15.70	1.74	234.02

2.4 実施内容に関する考察

本業務における実施内容に関する考察として、費用対効果の妥当性、および、波及効果(成果の社会的な還元の仕組み)についてまとめる。

2.4.1 費用対効果の妥当性

費用対効果の妥当性の考察において、まず、費用面については、開発済みの船舶やソフトウェア等を利用していることと、実験に必要な購入機材を最小限に抑えていることで、契約額の 2～3 倍の内容を実施できている状態である。次に、効果面については、研究発表数が 22(うち論文賞 2 件)であることと、研究成果に関する学会発表に加え、研究成果の無償公開や基調講演、地上波放送等ができていることから、学術面で十分に貢献できているとともに、社会への貢献・研究成果の周知ができている状態である。これらの点から、総合的にみて、費用対効果が極めて良好である状態である(図 42)。参考資料として、前年度(令和 4 年度)における費用を表 11 に示す。

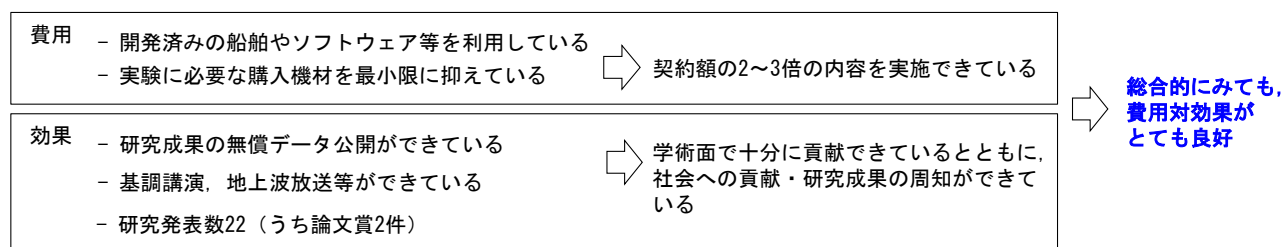


図 42. 費用対効果の妥当性

表 11. 実施項目および費用(令和 5 年度)

令和5年度	
実施項目	費用（直接経費額）
1) 操船に必要な地図参照項目の整理	4.2百万円 # 所有機材と項目2の費用も追加される
2) リアルタイム地図参照の実証と検証	7.9百万円 # 所有機材と項目1の費用も追加される

費用対効果の向上方策としては、下記の項目を検討し、令和 5 年度において下記の項目を実施した。

- 精度検証に必要な高精度/高価格な計測システムをレンタルすることで機材購入コストを抑えた
- ラピッドプログラミングにより開発時間コストを抑えた
- GNSS・非 GNSS 環境で構成される日本橋川・神田川を重点河川として選定し、多様かつ集中的に計測し、データセット間での比較を可能にすることで、実験成果利用の効果を向上した

2.4.2 波及効果

本業務の波及効果、および、事業期間終了後の展望として、成果の社会的な還元の仕組みを図 43 に示す。

国内での動き

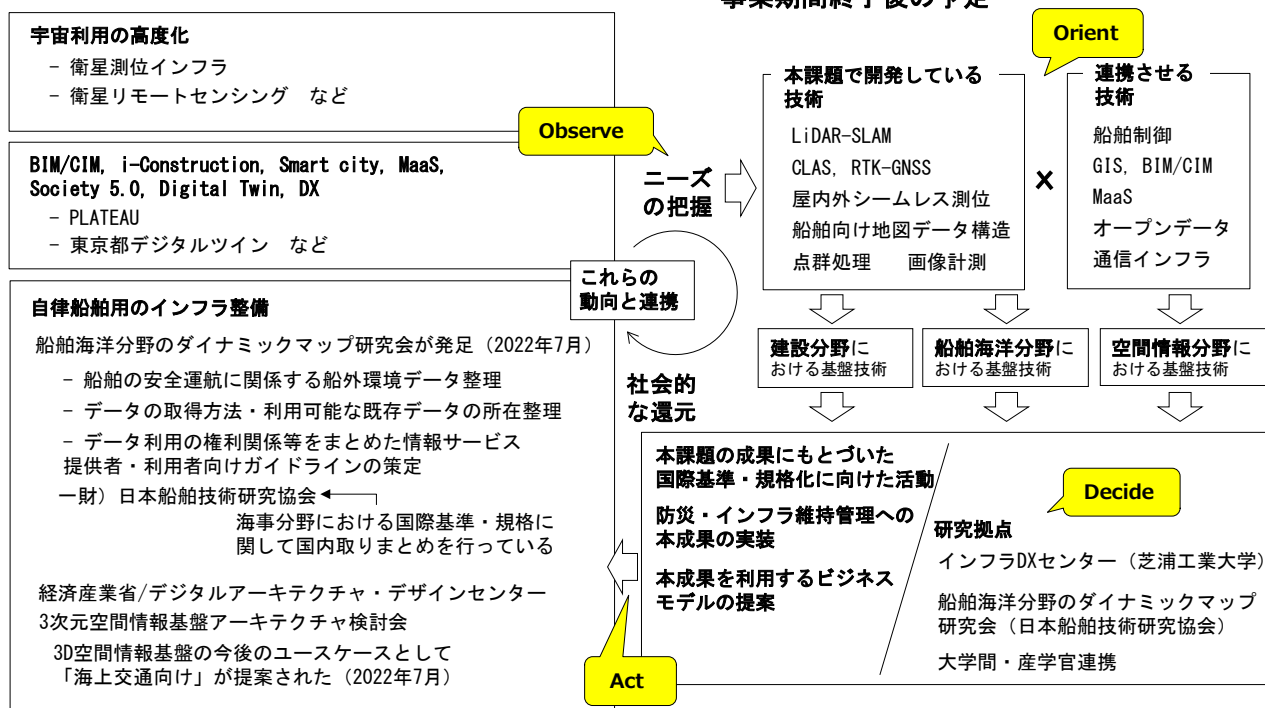


図 43. 成果の社会的な還元の仕組み

今後 10 年程度継続するための組織的・資金的・人的体制の方向性として、まず、インフラ DX センター（芝浦工業大学）を拠点とした活動がある。学生・教員、企業（ゼネコン、建設コンサルタント）、国内外の研究者を参加者とし、構造物の遠隔診断技術（インフラドクター）の実用化における要素技術として、本業務の成果を利活用する。また、船舶海洋分野のダイナミックマップ研究会（日本船舶技術研究協会）を拠点とした活動がある。地図・船舶関係の研究者・技術者・公的機関を参加者とし、船舶版ダイナミックマップの構築における要素技術として、本業務の成果を利活用する。さらに、大学間・産学官連携にもとづいた活動において、所属機関の学生・教員、国内外の研究者を参加者とする継続的な技術開発（学部・大学院の研究、ワークショップ、研究部会、公的機関からの資金調達）においても、本業務の成果を利活用する。

本業務で開発している技術（LiDAR-SLAM や、高精度 GNSS 測位・屋内外シームレス測位、船舶向け地図データ構造、点群処理、画像計測）と、連携させる技術（船舶制御や GIS, BIM/CIM, MaaS, オープンデータ, 通信インフラ）の組み合わせによって、建設分野における基盤技術、船舶海洋分野における基盤技術、および、空間情報分野における基盤技術として、防災・インフラ維持管理への本成果の実装、本成果にもとづいた自律船舶関連の国際基準・規格化に向けた活動、および、本成果を利用するビジネスモデルの提案へつなげていく。

これらを実施するにあたって、社会におけるニーズの把握と社会的還元は、宇宙利用の高度化（衛星測位インフラや衛星リモートセンシングなど）や、空間データの利活用の高度化（BIM/CIM, i-Construction, Smart city/Super city, MaaS, Society 5.0, Digital Twin, DX など）、自律船舶用のインフラ整備における動向にあわせた連携を、データサイクルを主としたフレームワークにもとづいて進める。

3 まとめ

3.1 令和5年度の成果

本業務の目的の達成度を示すにあたって、「2. 実施内容」に委託業務の達成度に関する具体的な内容を掲載してあるが、委託業務の目的に対して、令和5年度の活動でどこまで達成したかを、委託業務の目的の達成度として、下記にまとめる。

1) 操船に必要な地図参照項目の整理

主として、自動運転向け3D地図データであるダイナミックマップなどを参考とし、操船に必要な地図参照項目を明確化した。日本橋川と神田川を重点河川とした地図参照項目の整理、ダイナミックマップなどに準拠した取得データの地物分類、船舶版ダイナミックマップの基盤となるCityGMLに準拠した都市河川の応用スキーマ提案、および、CityGMLのLOD2相当での地物分類ができたことを根拠として、達成目標のレベルに到達したと評価した。本項目は、船舶版のダイナミックマップの提案の根拠を提示する点で意義がある。

2) リアルタイム地図参照の実証と検証

主として、船舶で取得した点群に意味付けを行なった3D地図データを構築するとともに、リアルタイムな地図参照に対応する地図データ構造を開発し、1Hzでの自己位置推定が可能であることを検証した。自動操船で地図参照に求められるリアルタイム性能、高精度屋内外シームレス測位を補強する経路計画設計方法（自動航行・構造物計測）、および、船舶ナビゲーションが困難な非GNSS測位環境での地図参照ができたことを根拠として、達成目標のレベルに到達したと評価した。本項目は、非GNSS測位環境での自律船舶の操船を実現するために必要な地図参照機能を開発できた点で意義がある。

令和6年度以降で、3か年の計画で、「自律型船舶に適した地図データ構造の開発」を拡張させ、LOD3相当のモデリングを検討している。あわせて、点群の配布ツールとしてのゲームエンジンの有用性にも継続して着目し、オープンデータの利活用を技術面で促進するとともに、月面基地建設の測量ローバーシステムへの技術フィードバックを令和6年度に予定している。そのほか、技術的な展開としては、表12のように整理できる。

表 12. 技術的な展開

本業務で開発している技術	概要
CLAS/SLAM	河川計測において課題となる屋内外シームレス測位問題を解決する点群取得と位置姿勢推定する手法の提案
	GNSS測位にCLASを利用することで、電子基準点の設置や通信を省略し、計測作業効率性を改善する
	船舶以外の移動ロボット（自動運転車、UAVなど）へも展開できる
	すでに軽量UAV-LiDARや簡易MMS-LiDAR、月面測量ローバに機能搭載する実験を進めている
GNSSコンパス	複数の低価格GNSSアンテナを利用することで、衛星測位で姿勢推定する手法の提案
	高価格なIMUの代替センサとして、計測システム全体の価格を大幅に改善する
	船舶以外の移動ロボット（自動運転車、UAVなど）へも展開できる
異常検知にもとづく 構造物スクリーニング手法	工場での検査に利用される異常検知処理を構造物スクリーニング手法へ適用する手法を提案
	正常画像のみを学習に利用するアプローチにより、学習データ収集に関する効率性を改善する
	GANベースの処理の適用により、性能改善を検討できる
オープン地図データ活用	CityGMLのLOD0程度の情報量で、CLAS/SLAMのグローバルマッチング性能を改善する手法を提案
	オープン地図データ（PLATEUデータ）の利活用事例として貢献する
	PLATEUデータ更新手法へも展開できる

3.2 令和3～5年度の成果

令和3～5年度の成果のまとめとして、実施項目および費用(表13)と本業務の成果の意義(表14)を示す。

表13. 実施項目および費用(令和3～5年度)

令和3年度	
実施項目	費用(直接経費額)
1) 電池推進船搭載3D計測ユニットの構築	3.9百万円 # 所有機材と項目3の費用も追加される
2) 都市河川における測位環境の整理	3.3百万円 # 所有機材と項目3の費用も追加される
3) CLAS/SLAMの実証と検証	7.9百万円 # 所有機材と項目1・2の費用も追加される
令和4年度	
実施項目	費用(直接経費額)
1) 自動航行のための経路計画の設計法と検証	2.6百万円 # 所有機材と項目3の費用も追加される
2) 構造物計測のための経路計画の設計法と検証	2.6百万円 # 所有機材と項目3の費用も追加される
3) 変状の進展を捉えるための測位・測域精度の検証	7.1百万円 # 所有機材と項目1・2の費用も追加される
令和5年度	
実施項目	費用(直接経費額)
1) 操船に必要な地図参照項目の整理	4.2百万円 # 所有機材と項目2の費用も追加される
2) リアルタイム地図参照の実証と検証	7.9百万円 # 所有機材と項目1の費用も追加される

表14. 成果の意義

令和3年度	成果の意義
1) 電池推進船搭載3D計測ユニットの構築 - LiDAR (Velodyne LiDAR, 1～3台) とマルチビームソナー, CLAS対応GNSS受信機・アンテナで構成する 3D計測ユニットを電池推進船に搭載	研究実施のデータ取得基盤環境を構築できた点で意義がある
2) 都市河川における測位環境の整理 - 実験対象での DOP値や可視衛星数, FIX率, 天空率を観測 し, 取得点群精度との関連を可視化	都市河川の測位環境と課題を明確化する点で意義がある
3) CLAS/SLAMの実証と検証 - 船舶から取得したLiDARデータに CLAS/SLAM処理 (CLASを利用したGNSS測位とLiDAR計測を組み合わせたSLAM処理)を適用	次年度以降の課題着手のためのデータ処理手法を構築できた点で意義がある
令和4年度	成果の意義
1) 自動航行のための経路計画の設計法と検証 - 都市河川を航行する船舶(L10m×W3m×喫水0.5m)の自動航行で必要となる情報を実測・検証 - 都市河川は, 潮の干満により, 船舶航行に利用可能な水路幅が護岸形状・橋脚位置・橋梁形状で変化するため, 3D経路計画として情報整理	早期の自律船舶の実運用を念頭に入れている点で意義がある
2) 構造物計測のための経路計画の設計法と検証 - 変状の観測やSfM/MVS画像撮影における撮影位置制約の基礎データを取得 - CLAS受信機の性能比較に加えて, CLAS以外の測位手法の比較実験を実施 (RTK-GNSS測位, 慣性航法(IMU), 魚眼カメラによる位置解推定など)	屋内外シームレス測位の低コスト化を探る点で意義がある
3) 変状の進展を捉えるための測位・測域精度の検証 - CLAS/SLAMで点間隔4cmかつ測位精度10cmで 点群を生成し, データ公開を開始 している - 異常検知にもとづく構造物スクリーニング手法なども並行して提案している	未着手法河川航行用3D地図の生成・利活用方法を提示する点で意義がある
令和5年度	成果の意義
1) 操船に必要な地図参照項目の整理 - 自動運转向け3D地図データであるダイナミックマップなどを参考とし, 操船に必要な地図参照項目を明確化 - ダイナミックマップなどに準拠した取得データの地物分類を実施	船舶版のダイナミックマップの提案の根拠を提示する点で意義がある
2) リアルタイム地図参照の実証と検証 - 船舶から取得された点群に意味付けを行なった3D地図データを構築するとともに, リアルタイムな地図参照に対応する地図データ構造を開発し, 1Hzでの自己位置推定が可能であることを検証	非GNSS測位環境での自律型船舶の操船を実現するために必要な地図参照機能を開発できた点で意義がある

学会等発表実績

委託業務題目「都市河川構造物点検における自律型船舶利用のための水上屋内外シームレス測位」

機関名 芝浦工業大学

1. 学会等における口頭・ポスター発表(令和5年度)

番号	発表した成果(発表題目、口頭・ポスター発表の別)	発表者氏名	発表した場所(学会等名)	発表した時期	国内・外の別
1	UAV 搭載機能のための CLAS 利用による測位精度評価(口頭発表)	大平和輝, 齋藤一葉, 中川雅史	令和5年度年次学術講演会発表論文集, 日本写真測量学会	2023/5/18	国内
2	都市河川空間における船舶 MMS 点群を用いた河川構造物の 3D モデル生成(口頭発表)	金井欽太郎, 山口哲, 中川雅史	令和5年度年次学術講演会発表論文集, 日本写真測量学会	2023/5/18	国内
3	セマンティックセグメンテーションによる船舶 MMS 点群からの都市河川地図生成(口頭発表)	山口哲, 木邨直人, 中川雅史, 久保信明, 清水悦郎	令和5年度年次学術講演会発表論文集, 日本写真測量学会	2023/5/18	国内
4	橋梁のひび割れ個所のスクリーニング検出手法と色付き点群の生成(口頭発表)	目黒耀彦, 木邨直人, 中川雅史	令和5年度年次学術講演会発表論文集, 日本写真測量学会	2023/5/19	国内
5	衛星測位環境に冗長な船舶の移動軌跡推定(口頭発表)	木邨直人, 中川雅史, 清水悦郎, 久保信明	令和5年度年次学術講演会発表論文集, 日本写真測量学会	2023/5/19	国内
6	非 GNSS 環境における LiDAR-SLAM 退化に対応する軌跡補正(口頭発表)	木邨直人, 中川雅史, 清水悦郎, 久保信明	測位航法学会・全国大会 2023 研究発表会	2023/5/19	国内
7	LiDAR-SLAM による屋内外シームレス測位とマップマッチングによる船舶の自己位置推定(口頭発表)	中川雅史, 木邨直人, 久保信明, 清水悦郎	電気学会・衛星測位補強を活用する G 空間技術	2023/10/26	国内
8	橋梁点検前のスクリーニングのための SLAM による位置推定(ポスター発表)	目黒耀彦, 木邨直人, 中川雅史	GPS/GNSS シンポジウム 2023	2023/10/26	国内
9	インフラ点検での CLAS 利用のための測位性能評価(ポスター発表)	大平和輝, 齋藤一葉, 中川雅史	GPS/GNSS シンポジウム 2023	2023/10/26	国内
10	都市河川空間における船舶 MMS 点群を用いた橋梁 3D モデル作成(ポスター発表)	金井欽太郎, 山口哲, 中川雅史	GPS/GNSS シンポジウム 2023	2023/10/26	国内
11	都市河川でのマルチビーム測深における RTK-GNSS 測位環境の評価(ポスター発表)	定近希美, 木邨直人, 中川雅史, 小森健史, 久保信明, 清水悦郎	GPS/GNSS シンポジウム 2023	2023/10/26	国内
12	都市河川における非 GNSS 測位区間の移動軌跡推定(口頭発表)	木邨直人, 中川雅史, 久保信明, 清水悦郎	GPS/GNSS シンポジウム 2023	2023/10/27	国内

13	非衛星測位環境下における三次元河川モデリング(口頭発表)	山口哲, 小森健史, 久保信明, 清水悦郎, 中川雅史	GPS/GNSS シンポジウム 2023	2023/10/27, 優秀研究発表 賞受賞	国内
14	Point Cloud Acquisition based on GNSS/SLAM with an Autonomous Boat in Urban River Environments(口頭発表, アブストラクト査読)	Masafumi Nakagawa, Naoto Kimura, Takeshi Komori, Nobuaki Kubo, Etsuro Shimizu	Asian Conference on Remote Sensing 2023	2023/11/1	国外
15	Semantic Segmentation of Point Clouds using Water-borne MMS in Urban Rivers(口頭発表, アブストラクト査読)	Tetsu Yamaguchi, Takeshi Komori, Nobuaki Kubo, Etsuro Shimizu, Masafumi Nakagawa	Asian Conference on Remote Sensing 2023	2023/11/1	国外
16	Pose Graph Adjustment for LIDAR-SLAM with Boat Motion Characteristics in Urban Rivers(口頭発表, アブストラクト査読)	Naoto Kimura, Masafumi Nakagawa, Takeshi Komori, Nobuaki Kubo, Etsuro Shimizu	Asian Conference on Remote Sensing 2023	2023/11/1	国外
17	船舶SLAM点群をベースマップとした都市河川での自己位置推定(口頭発表)	中川雅史, 木村直人, 久保信明, 清水悦郎	令和5年度秋季学術講演会発表論文集, 日本写真測量学会	2023/11/17	国内
18	Positioning Accuracy Evaluation of CLAS for Infrastructure Inspection(ポスター発表, アブストラクト査読)	Kazuki Ohira, Kazuha Saito, Masafumi Nakagawa	The 18th South East Asian Technical University Consortium Symposium	2024/2/27	国内 (国際会議)
19	Preliminary Experiment on Infrastructure Inspection Screening from Water-borne MMS(ポスター発表, アブストラクト査読)	Teruhiko Meguro, Naoto Kimura, Masafumi Nakagawa, Takeshi Komori, Nobuaki Kubo, Etsuro Shimizu	The 18th South East Asian Technical University Consortium Symposium	2024/2/27, Best Poster Award 受賞	国内 (国際会議)
20	3D Modeling of Bridge Piers using Water-borne MMS Point Clouds(ポスター発表, アブストラクト査読)	Kantaro Kanai, Tetsu Yamaguchi, Masafumi Nakagawa	The 18th South East Asian Technical University Consortium Symposium	2024/2/27	国内 (国際会議)

2. 学会誌・雑誌等における論文掲載(令和5年度)

番号	掲載した論文(発表題目)	発表者氏名	発表した場所 (学会誌・雑誌等名)	発表した時期	国内・外の別
1	Semantic Segmentation of Water-borne MMS Point Clouds for 3D River Modeling(口頭発表, 査読あり)	Tetsu Yamaguchi, Takeshi Komori, Nobuaki Kubo, Etsuro Shimizu, Masafumi Nakagawa	The 18th South East Asian Technical University Consortium Symposium	2024/2/27	国内(国際会議)
2	Trajectory Estimation on LIDAR-SLAM in Urban Rivers(口頭発表, 査読あり)	Naoto Kimura, Masafumi Nakagawa, Takeshi Komori, Nobuaki Kubo, Etsuro Shimizu	The 18th South East Asian Technical University Consortium Symposium	2024/2/27	国内(国際会議)

4. 学会等における口頭・ポスター発表(令和3-4年度)

番号	発表した成果(発表題目、口頭・ポスター発表の別)	発表者氏名	発表した場所(学会等名)	発表した時期	国内・外の別
1	水上レーザー計測による都市河川マッピングにおける課題整理	中川雅史, 栗田航貴, 尾関友啓, 久保信明, 清水悦郎, 柴崎亮介	測位航法学会全国大会	2021/6/25	国内
2	PPP-RTKを利用した水上移動レーザー計測における課題整理	中川雅史, 栗田航貴, 尾関友啓, 久保信明, 清水悦郎, 柴崎亮介	令和3年度秋季学術講演会発表論文集, 日本写真測量学会	2021/11/22	国内
3	IMUステレオカメラを用いた地上SfM/MVSにおける画像間対応付けの効率化(口頭発表)	中川雅史, 山口友一朗	令和4年度年次学術講演会発表論文集, 日本写真測量学会	2022/5/19	国内
4	SLAMとPPP-RTKによる河川空間での屋内外シームレス測位(口頭発表)	木邨直人, 中川雅史, 栗田航貴, 尾関友啓, 久保信明, 清水悦郎	令和4年度年次学術講演会発表論文集, 日本写真測量学会	2022/5/20, 論文賞受賞	国内
5	画像群からのコンクリート変状抽出におけるオートエンコーダによる異常検知の適用(口頭発表)	山口哲, 的場日菜, 中川雅史	令和4年度年次学術講演会発表論文集, 日本写真測量学会	2022/5/20, 論文賞受賞	国内
6	CLAS測位結果を用いたLiDAR-SLAMの精度検証手法(口頭発表)	重藤李佳子, 木邨直人, 中川雅史, 尾関友啓, 久保信明, 清水悦郎	測位航法学会2022年度全国大会研究発表会	2022/6/10	国内
7	IMUによる小型船舶の姿勢推定(口頭発表)	小松大生, 久保信明, 清水悦郎, 中川雅史	測位航法学会2022年度全国大会研究発表会	2022/6/10	国内
8	Accuracy Verification Methodology of Water Borne Lidar-SLAM Using CLAS Positioning (口頭発表, アブストラクト査読)	Rikako Shigefuji, Naoto Kimura, Masafumi Nakagawa, Tomohiro Ozeki, Nobuaki Kubo, Etsuro Shimizu	The 43rd Asian Conference on Remote Sensing (ACRS2022)	2022/10/4	国外
9	Positioning and Trajectory Interpolation using SLAM and PPP-RTK for River Mapping(口頭発表, アブストラクト査読)	Naoto Kimura, Masafumi Nakagawa, Tomohiro Ozeki, Nobuaki Kubo, Etsuro Shimizu	The 43rd Asian Conference on Remote Sensing (ACRS2022)	2022/10/4	国外
10	Anomaly Detection with Autoencoder for Concrete Deformation Extraction from Images(口頭発表, アブストラクト査読)	Tetsu Yamaguchi, Hina Matoba, Masafumi Nakagawa	The 43rd Asian Conference on Remote Sensing (ACRS2022)	2022/10/4, 論文賞受賞	国外
11	Efficient Image Matching using IMU Stereo Camera in SfM/MVS(口頭発表, アブストラクト査読)	Masafumi Nakagawa, Yuichiro Yamaguchi	The 43rd Asian Conference on Remote Sensing (ACRS2022)	2022/10/4	国外
12	単調な空間におけるSLAM退化問題の解消案(口頭発表)	新堀五月, 重藤李佳子, 木邨直人, 斎藤一葉, 中川雅史	GPS/GNSSシンポジウム2022, ビギナーズセッション	2022/10/21	国内
13	IMUとGNSSコンパスを用いた船体運動測定(口頭発表)	小森健史, 小松大生, 久保信明, 清水悦郎, 中川雅史	GPS/GNSSシンポジウム2022, 研究発表会	2022/10/21	国内

14	CLAS/LiDAR-SLAM を用いた都市河川シームレス測位の精度検証(口頭発表)	木邨直人, 中川雅史, 尾関友啓, 久保信明, 清水悦郎	GPS/GNSS シンポジウム 2022, 研究発表会	2022/10/21	国内
15	都市河川計測における建物データを用いた CLAS/SLAM の補正処理(口頭発表)	中川雅史, 木邨直人, 尾関友啓, 久保信明, 清水悦郎	GPS/GNSS シンポジウム 2022, 研究発表会	2022/10/21	国内
16	SLAS と CLAS の長期観測結果(口頭発表)	柳澤亘, 姚凝致, 宇田川千尋, 久保信明, 清水悦郎, 中川雅史	GPS/GNSS シンポジウム 2022, 研究発表会	2022/10/21	国内
17	CLAS/ LiDAR による船舶位置姿勢推定と 3D データ活用(口頭発表)	中野雄太, 重藤李佳子, 山口哲, 木邨直人, 中川雅史	GPS/GNSS シンポジウム 2022, ビギナーズセッション	2022/10/21	国内
18	建物データを用いた都市河川計測における CLAS/SLAM 補正処理(口頭発表)	中川雅史, 木邨直人, 尾関友啓, 久保信明, 清水悦郎	令和 4 年度秋季学術講演 会発表論文集, 日本写真 測量学会	2022/11/11	国内
19	Anomaly Detection for Concrete Deformation in Urban Rivers from Images (ポスター, アブストラクト査読)	Tetsu Yamaguchi, Hina Matoba, Masafumi Nakagawa	The 17th South East Asian Technical University Consortium 2023 (SEATUC2023)	2023/2/23	国外

4. 学会誌・雑誌等における論文掲載(令和 3-4 年度)

番号	掲載した論文(発表題目)	発表者氏名	発表した場所 (学会誌・雑誌等名)	発表した時期	国内・外の別
1	Experiment on PPP-RTK with Mobile Laser Scanning in Urban River Mapping(査読あり)	Kimura Naoto, Masafumi Nakagawa, Koki Kurita, Tomohiro Ozeki, Nobuaki Kubo, Etsuro Shimizu, Ryosuke Shibasaki	South East Asian Technical University Consortium Symposium 2022 (SEATUC2022)	2022/2/23	国外
2	都市河川での GNSS/SLAM による屋内外シームレス測位(査読あり)	中川雅史, 木邨直人, 尾関友啓, 久保信明, 清水悦郎	応用測量論文集, 第 33 巻, 日本測量協会	2022/8/29, 論文賞受賞	国内