

2.2 検討手法

2.2.1 自動航行のための経路計画の設計法と検証

実施項目 1) 自動航行のための経路計画の設計法と検証 として、主として、操船に必要な地図参照項目とリアルタイム地図参照に関する基礎データの取得を実施した。目視航行と同じレベルの自動航行を実現するための経路計画にもとづき、都市河川航行での最適な経路生成法の確定を目標達成の指標とし、対象河川数 3 を目標値とした。本実施項目は、船舶サイズの設定と、河川空間を再現する情報区分の整理で構成し、自動航行のための経路計画の設計法に関して整理した情報を実データの取得において検証した。

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)

船舶は水面上を航行することから、平面を前提として航路計画を行えば良いと考えられがちである、しかしながら、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(図 9)。そのため、3D 軌道で飛行する UAV の飛行計画作成と同様な、3D 経路計画として情報整理する必要がある。

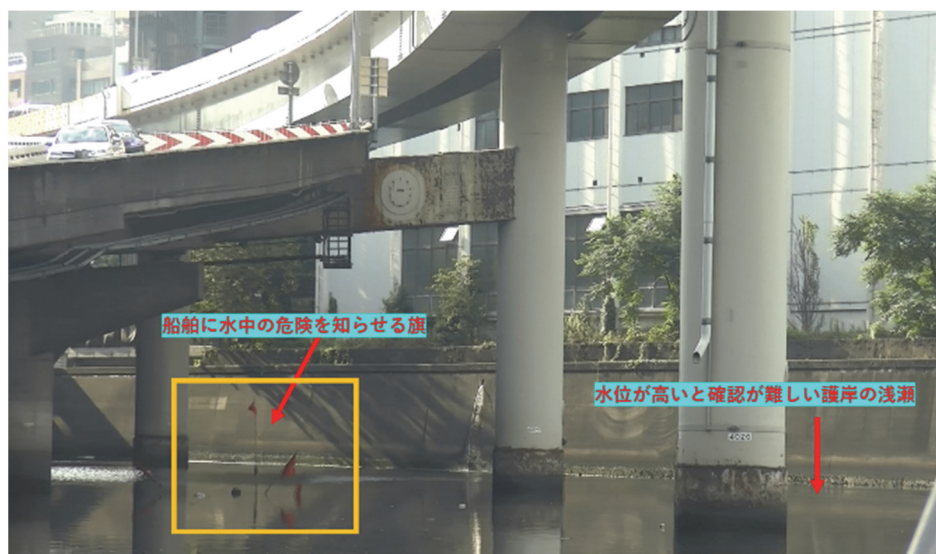


図 9. 水位変化が船舶航行へ与える影響例

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、その計測精度は実際にはマチマチであるため(図 10)、ペイントされている桁下高の値を GIS 上で管理したところで、船舶のナビゲーションなどでも活用しづらい。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 計測も必要となる。

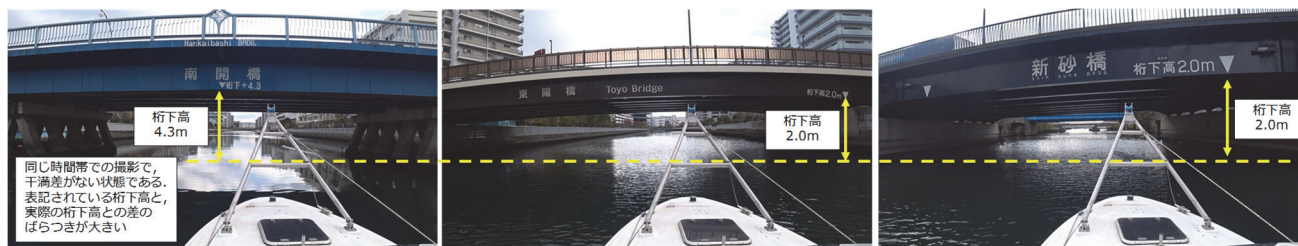


図 10. 橋梁にペイントされた桁下高の値

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。護岸や橋脚・橋台近辺には、船舶が座礁する可能性がある浅瀬が存在することが多いため、船舶に水中の危険を知らせる旗などの標識が設置されている。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、カメラや LiDAR での測距が困難であり、ソナーセンサを利用した測距に大きく依存するが、面的に計測できるタイプの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なアプローチとなる。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。また、低価格帯の RTK-GNSS 測位装置(数万円程度～)は販売開始されているものの、非 GNSS 測位環境でも高精度測位できる装置(慣性航法を利用する装置であれば、1～2 億円程度)は高価格である。さらに、高精度ソナーセンサ(マルチビームソナー)は、計測空間が GNSS 測位環境であることが前提条件となるため、非 GNSS 測位環境での水中計測は不可である。これらの現状において、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、GNSS 測位環境／非 GNSS 測位環境での高精度測位および点群取得を、気中・水中の 3D 地図作成、および、リアルタイムな 3D 地図参照へ適用するために、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ている。これによって、自動航行のための経路計画がようやく可能となる。

自動航行のための経路計画の設計においては、「船舶向けの地図とは何か?」というレベルからの検討が必要となる。船舶向けの地図は、「平面を前提として航路計画を行えば良いと考えられがちである、しかしながら、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。」と述べたとおり、2D 幾何データでは不十分であり、3D 幾何データとして整備していく必要がある。さらに、「その地物が何であるか」を表現するために、幾何データとあわせて、属性データの整備も必要となる(船舶航行空間のセマンティクスモデリング)。これによって、自動航行をする船舶のための地図、いわゆる「ロボットが認識する地図」の基礎部分を構築できる。船舶航行空間のセマンティクスモデリングにおいて、河川空間を再現する情報区分例を表 4 に示す。ただし、各名称は、本提案で提案しているものであり、公的に認められたものではない。

表 4. 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
仮想地物	その他	同上
	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

船舶航行空間におけるセマンティクスモデリングの対象地物は、実在地物と仮想地物に大きく分類できる。実在地物は、橋梁や橋脚、船着線、浮棧橋線、岸壁線、標識、信号などで構成される。「橋梁」は、船舶が橋梁を通行する際に接触するかどうかの判断情報として、船上部と相対する面（高さ・形状）のデータ化が必要となる。「橋脚」は、橋台を含む、橋梁の土台にあたる部分である。水路の障害となるものであるため、その位置（形状）のデータ化が必要となる。船着場において船体と接する線である「船着線」、浮棧橋において船体と接する線である「浮棧橋線」、および、岸壁において船体と接する線である「岸壁線」は、船舶航行の経路計画におけるパスポイントのためのデータ化だけでなく、自動着棧のためにもデータ化が必要となるものである。「標識」および「信号」は、船舶航行の自動化においては、電波標識・電波信号などの対応も必要となるが、まずは目視航行での利用を想定して、位置・種別・状態などを表現する。船舶の障害物という観点では、船舶の上方（橋梁）、水平方向（橋脚、船着線、浮棧橋線、岸壁線、標識、信号）、および、水中（橋脚、岸壁線）といった分類もできる。

仮想地物は、水路の物理的なつながりを表すリンクである「水路リンク」、推奨される船舶の通路を表すリンクである「航路リンク」、および、水路の限界（区画線）を表すリンクである「区画リンク」などで構成される。これらのリンクは、一定間隔で設定したノードを結線したものであり、トポロジーを付与することで、リンクの向きを定義し、一方通行や相互通行などを表現する。また、リンクの属性データとして、速度制限や通行止めなどの情報を付与することで、船舶航行のナビゲーションや自動航行時の経路作成に利用できる地図データとなる。カーナビゲーション向け地図データや自動運転向け地図データなど、道路空間におけるリンクデータでは、レーンによってある程度の走行位置が確定できるためレーンごとにリンクを整備することが一般的である。一方で、歩行者ナビゲーション向け地図データや UAV 向け地図データでは、移動体がレーンに沿った移動ではないために、環境には依存するものの、移動位置とリンク位置を一致させたナビゲーションをする必要性は必ずしもない。船舶向け地図データも基本的にはこの考え方に準ずるが、船舶のすれちがいにおいては右側通行を基本とするため、道路空間での「対向 1 車線（ただし右側通行）」のような設計とする。

2.2.2 構造物計測のための経路計画の設計法と検証

実施項目 2) 構造物計測のための経路計画の設計と検証 として、主として、1) 自動航行のための経路計画の設計法と検証 で取得した基礎データに加え、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の取得を実施した。変状の観測や SfM/MVS 画像撮影における撮影経路計画にもとづいて、船舶の移動制約による撮影位置制約の明確化(定性評価)を目標達成の指標として、対象河川数 3 を目標値とした。

本業務では、構造物計測を、高解像度かつ高精度に多視点からまんべんなく計測する詳細点検などと、高解像度かつ高頻度に計測するスクリーニングに分類した。高解像度かつ高精度に多視点からまんべんなく計測する手法は、任意の構造物の周囲に足場を設置した目視点検作業(目視検査や打音検査など)や、任意の構造物の周囲を UAV で空撮したデータを利用する点検作業(SfM/MVS 処理による点群生成やオルソ画像生成、ひび割れ幅の自動計測などを含む)であるが、計測コスト(環境設営時間や計測時間、データ処理時間など)が大幅にかかる課題がある。一方で、高解像度かつ高頻度に計測するスクリーニングは、調査計画や点検計画を立案するための情報収集の位置付けであり、構造物点検全体のコストを左右する作業の 1 つである。従来型のスクリーニングでは、目視での調査が実施されるが、本業務で構築している船舶搭載 3D 計測システムを利用することで、定量評価ができるデジタルデータを取得できることに加えて、1 回の航行観測で広域の同時期観測データを得られるとともに、水上バスや運搬船などの多種プラットフォームを活用できれば、高頻度観測データを得られる可能性もあるなど、新たな点検方法を提案できる。1 回の航行観測で広域の同時期観測データを得られることで、複数橋梁の一括広域比較処理ができる可能性がある。これにより、コンクリート橋や鋼橋など構造物の種別ごとの相対比較により、位置データで並べ替えることで、環境が与える構造物への影響など、新しい知見を得ることができる可能性がある。また、高頻度観測データを得られることで、予防保全につなげるための機械学習による変状進展の推定が期待できる。高頻度観測データ取得の一般的なアプローチとしては、構造物にセンサを設置し、定点観測する手法が適用される。しかしながら、観測コストが高いため、観測対象が大規模構造物や一部の重要な構造物に絞られるため、広域の高頻度観測データ取得は実現されていない。そのため、本業務では、スクリーニングへの適用に着目し、構造物計測のための経路計画の設計法と検証に関する実験を実施した。構造物計測向けの経路計画設計に向けて必要となる情報の整理としては、自動航行のための経路計画をふまえつつ、構造物計測における測位環境の評価も必要となる。河川構造物の観測位置は、橋梁の下側や近傍、護岸の近傍などであり(図 11)、GNSS 測位環境が劣悪な環境であることは確実である。そのため、構造物計測における経路計画の自由度を決定するもの(制約条件となるもの)を測位システムの可用性と設定して、屋内外シームレス測位性能を向上することを技術的な目的とし、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の取得を実施した。

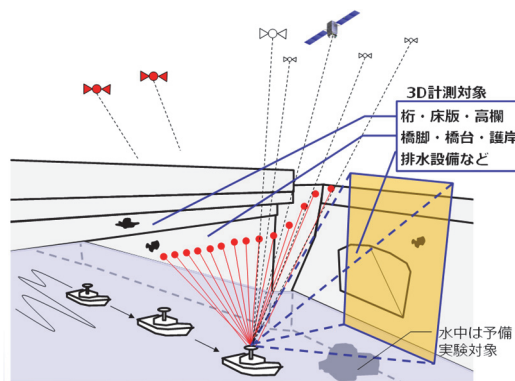


図 11. 船舶からの構造物計測のイメージ図

屋内外シームレス測位は、本業務では CLAS/SLAM で実現しており、GNSS 測位環境にあわせて処理内容を変化させている(図 12)。屋内外シームレス測位においては、非 GNSS 測位環境でも位置取得は可能であるが、基本的に GNSS 測位による絶対位置取得ができることが好ましい。また構造物点検においても、GNSS 測位による絶対位置取得ができることが好ましく、どの程度の GNSS 測位環境で点検できているかの評価ができるとうよい。これらの考えかたにもとづいて、GNSS 測位環境を評価する機能を含めた測位システムとして、基本形とした測位装置を図 13 および図 14 に示す。まず、基本形とした測位装置は、GNSS アンテナ(GPS-703-GGG-HV)と GNSS 受信機(F9P, Mosaic-HAT, AsteRx4)で構成した。また、魚眼カメラによって、天空域と衛星位置から位置解推定ができる機能も付属させた。さらに、2 台の GNSS アンテナで設定した基線を高精度に計測できれば、高価な IMU の代替装置として高精度な姿勢推定ができることにも着目し、3 軸姿勢を推定する GNSS コンパス(図 15)に関する実験データも取得した。3 軸姿勢データは、自律船舶の制御に必要なだけでなく、構造物点検で得たデータの姿勢角(撮影方向など)でも活用するデータとなる。

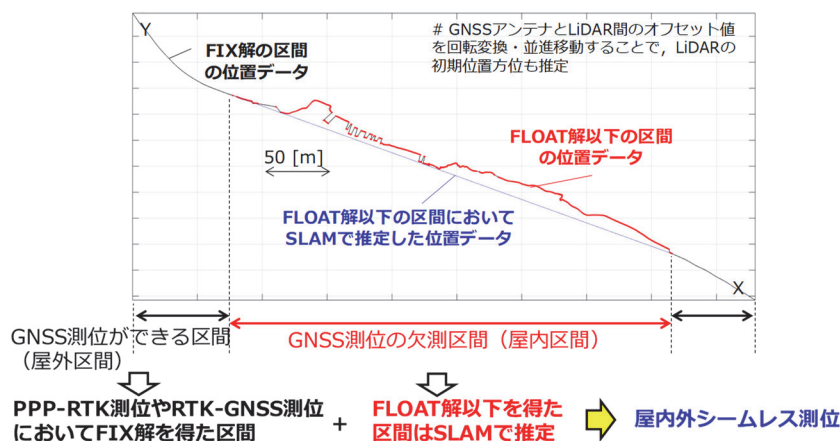


図 12. 屋内外シームレス測位

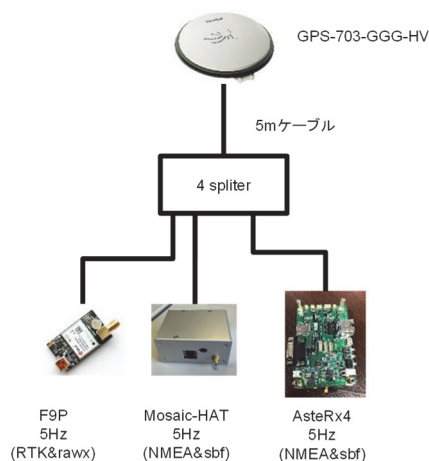


図 13. 基本形とした測位装置

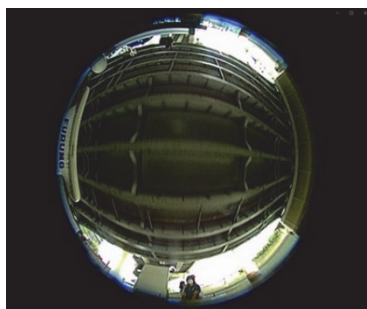


図 14. 魚眼カメラ画像

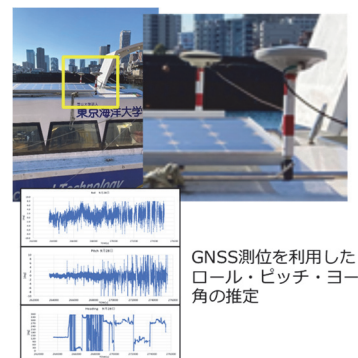


図 15. GNSS コンパス

2.2.3 変状の進展を捉えるための測位・測域精度の検証

実施項目 3) 変状の進展を捉えるための測位・測域精度の検証」に関する実験項目として、橋梁などの定期点検要領にもとづき、0.2mm のコンクリートひび割れを検出する空間分解能での画像撮影を目安とし、変状の進展を捉えるため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）で確立した。

本実施項目は、実施項目 1) 自動航行のための経路計画の設計法と検証 および 実施項目 2) 構造物計測のための経路計画の設計法と検証 の検討内容を踏まえつつ、令和 3 年度から開発している屋内外シームレス測位・測域技術(CLAS/SLAM)を構造物点検で利用するにあたって、測位・測域精度の検証を通し、点検データをどのように取得するかという観点で、変状の進展を捉えるための位置再現性を地図情報レベル 500 にもとづく精度として設定している。船舶からの構造物点検(スクリーニング)で取得する点検データは、主として高解像度画像である。この撮影位置データをどのように取得するかを技術的な目的とし、変状の観測や点群取得等を実施した。1 回の観測でも有用な点検データを取得できるが、高頻度観測によって時系列画像を取得することで、画像差分処理にもとづく変状の進展の観測が容易となる。画像差分処理を適用するためには、2 枚以上の画像(たとえば、時系列画像における 1 時期目の画像と 2 時期目の画像)をサブピクセル精度で重畳することが求められる。画像の重畳作業は、対応点を手動で入力するといった手作業を適用することも可能である。しかしながら、画像マッチングを主とした処理を適用することが現実的である。たとえば、10 方向を撮影するためのカメラ 10 台を用意し、撮影間隔を 1hz と設定して、1 時間の観測を 2 回実施した場合、36,000 枚(10[台]×1[枚/秒]×3600[秒])×2 セットの画像を撮影できる。画像の重畳作業では、1 セット目の任意の画像を選択した後、2 セット目から対応する画像を探索し、さらに画像中から対応点を取得する作業を行う。取得する対応点数は、2 点(2 枚で計 4 点)あれば、おおまかな画像の重畳は可能であるが、精度良く重畳できない。重畳精度を確保するために、一般的には 6~12 点程度(画像 2 枚で計 12~24 点程度)の対応点を取得する。

ここで、全方向カメラを利用することで、画像管理全体を効率化できることに着目できる。また、対応点取得の自動化と画像の位置情報参照ができれば、これらの手作業を全自動化できることにも着目できる。船舶からの構造物点検(スクリーニング)では、船舶航行中でのデータ取得、および、撮影効率を高めるために全方向カメラを利用する画像撮影(図 16)を基本とする。

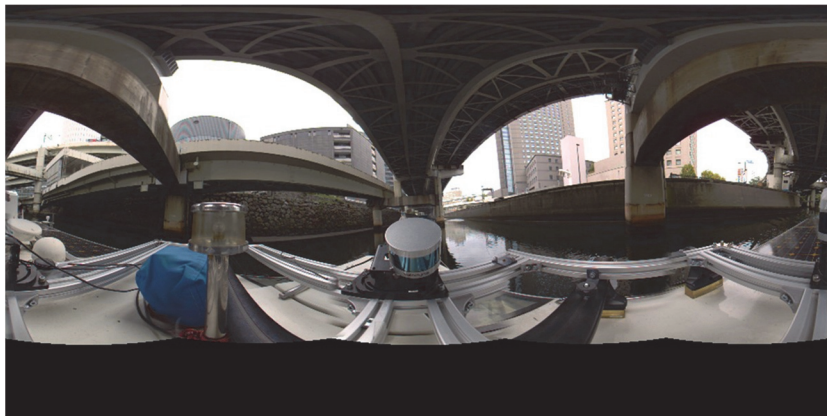


図 16. 全方向画像撮影例(Ladybug5)

パノラマ画像そのものは、スマートフォンや手持ちデジカメでのパノラマ撮影モードによって取得が可能である。しかしながら、静止点からの撮影が前提条件であり、移動体からの撮影は不可である。近年では、小型・高解像

度で廉価な全方向カメラが量販店で購入できるが、画像の接合処理性能が良好な全方向カメラとして、魚眼2眼型の Theta Z1 (Ricoh) が現時点で使いやすいカメラとして挙げられる。画像の接合処理の良好性能については、Theta Z1 (Ricoh) で撮影した画像を多方向の中心投影画像へ変換し、SfM/MVS 処理で点群を生成できる実験で確認できている。しかしながら、解像度や CMOS 歪みの大きさの観点では、船舶航行中のドライブレコーダを担うデバイスとしては十分なものの、構造物の観測や計測向けとしては不十分である。そこで、本業務では、6 台の広角カメラを一体化し、すべてのカメラを同期させた高解像度全方向カメラである Ladybug5 (Teledyne FLIR) を全方向カメラとして採用している。重量が 5kg 程度と重いことが課題であるものの、画像の接合処理性能は良好であり、解像度は十分であり、撮影距離と画素数の関係性(図 17)に示すとおり、サブピクセル処理を前提とするのであれば、十分にスクリーニングで利用可能である。

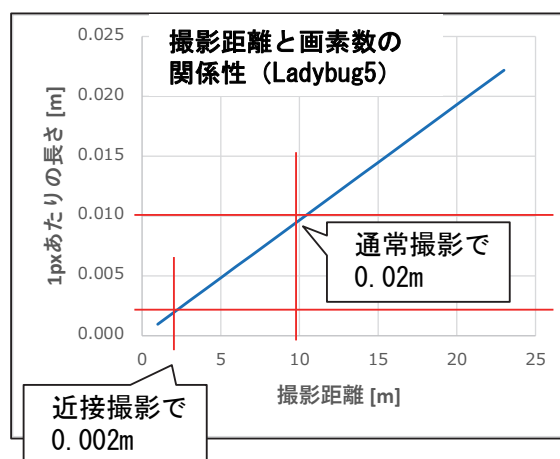


図 17. 撮影距離と画素数の関係性(全方向カメラ Ladybug5 の場合)

対応点取得の自動化については、画像マッチング処理を適用できる。画像間オーバーラップ率が高い場合は、ブロックマッチングなどの従来手法を適用しても、高精度な対応点取得が可能であるが、特徴記述子を利用する画像マッチング (SIFT: Scale-Invariant Feature Transform や SURF: Speeded-Up Robust Features, FAST: Features from Accelerated Segment Test などのアルゴリズム) を適用することで、カメラ回転(船舶の動揺や撮影位置の相違)や拡大・縮小(撮影位置の相違)、照明環境変化に頑健な時系列画像の重畳が可能となる。

画像の位置情報参照については、画像に位置データが付与することが前提となる。一般的には、GNSS 測位で得た位置情報を付与するが、構造物点検においては、ほとんどの撮影位置が非 GNSS 測位環境であるため、画像へ付与したい位置情報を得られない。そこで、本業務で開発している CLAS/SLAM(図 18)によって、非 GNSS 測位環境での画像への位置情報付与を実現する。CLAS/SLAM は、LiDAR の初期位置方位推定、SLAM による精密位置方位推定、および、高密度点群生成で構成される。LiDAR の初期位置方位推定では、GNSS 測位データを入力データとするが、本業務では、CLAS 利用の GNSS 測位データを入力データとする。SLAM による精密位置方位推定および高密度点群生成では、水平スキャニングをする LiDAR のデータと斜めスキャニングをする LiDAR のデータを入力データとする。両データで位置姿勢を推定し(図 19)、斜めスキャニングをする LiDAR のデータを主とした出力で高密度点群(図 20)を生成する。本処理は、実施項目 1) 自動航行のための経路計画の設計法と検証、および、実施項目 2) 構造物計測のための経路計画の設計法と検証 における検討でも利用した。

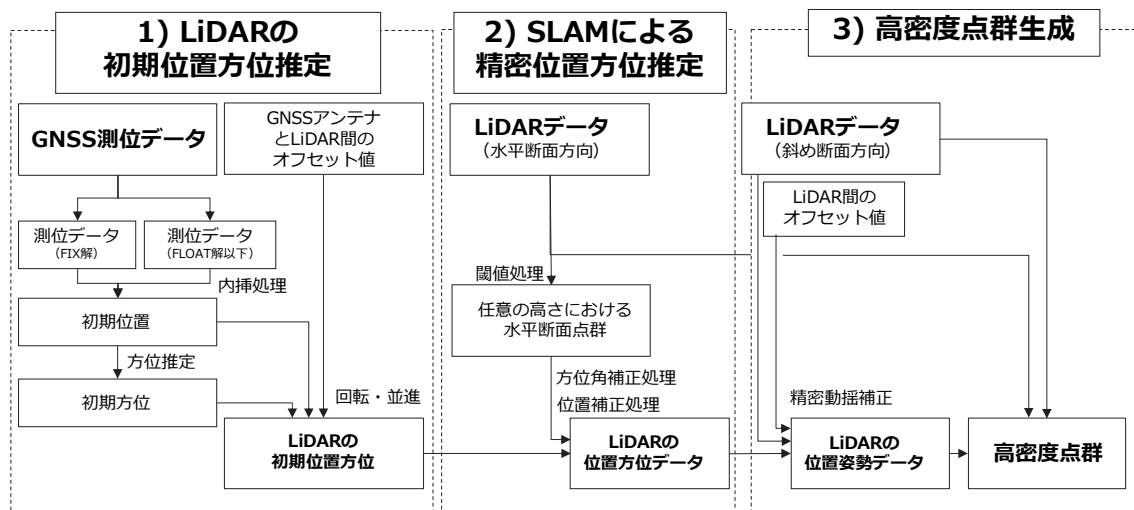


図 18. CLAS/SLAM 処理概要



図 19. CLAS/SLAM での船舶軌跡推定と疎点群生成例



図 20. CLAS/SLAM での高密度点群生成例 (図左: 護岸周辺, 図右: 床版周辺)

2.3 実データの取得と解析

2.3.1 令和4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、汐見運河周辺を実験対象とした(図 21)。

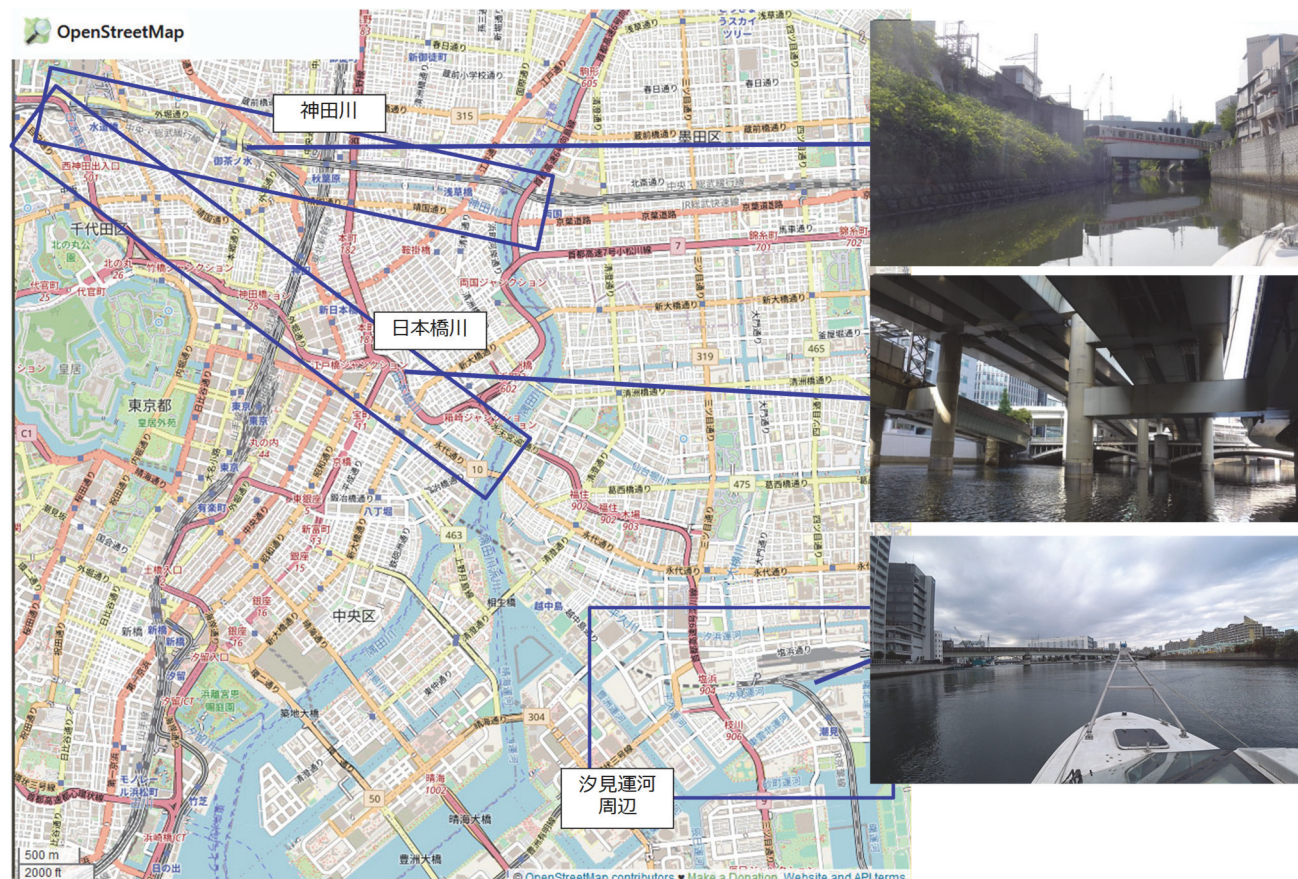


図 21. 実験対象

実施計画にもとづき実施した河川計測実験の実施日(表 5)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 22)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 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 5. 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	2022/9/7	9:00-12:30	日本橋川+神田川	Ladybugテスト, ThetaXテスト
2	2022/9/28	8:00-16:00	神田川	マルチビームソナー, GNSS/LiDAR-SLAM
3	2022/10/12	8:00-12:30	日本橋川	GNSS/LiDAR-SLAM (VLP32不十分)
4	2022/11/7	8:00-12:00	日本橋川+神田川	Hovermap, プロジェクションマッピング
5	2022/11/14	12:00-14:30	日本橋川	GNSS/LiDAR-SLAM
6	2022/12/2	8:00-12:00	汐見運河	GNSS/LiDAR-SLAM

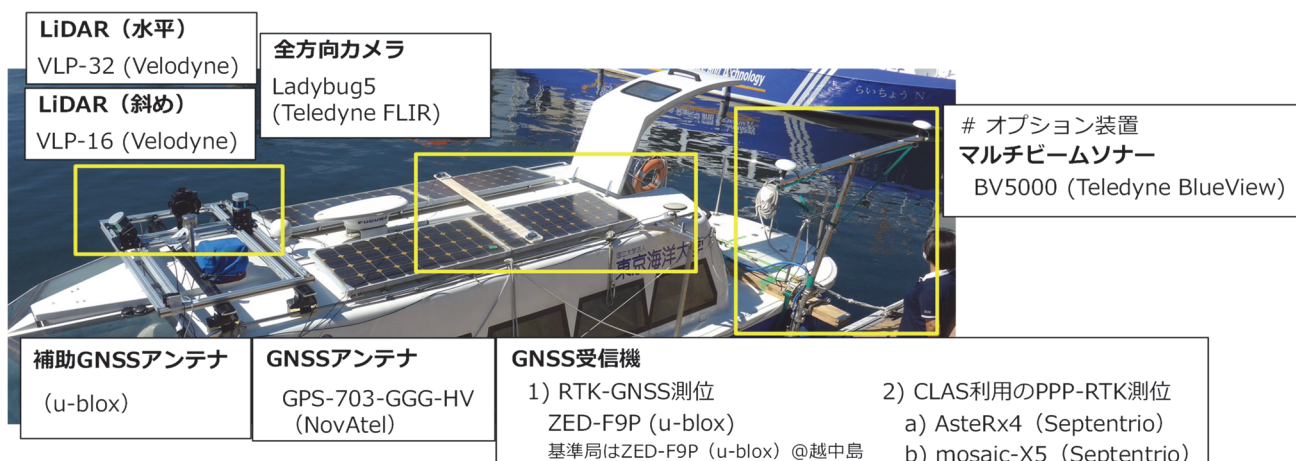


図 22. 本業務で構築している船舶搭載 3D 計測システム

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する。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) を取得する。全方向カメラとしては、Ladybug5 (Teledyne FLIR) を艀装し、全周画像 (1Hz) を取得する。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、全方向カメラ (Theta Z1, Ricoh) による全周画像 (30Hz)、マルチビームソナー (BV5000, Teredyne BlueView) (図 23)、ハンドヘルド LiDAR (Hovermap, EMESENT) (図 24) などを追加艀装する。



図 23. マルチビームソナー計測

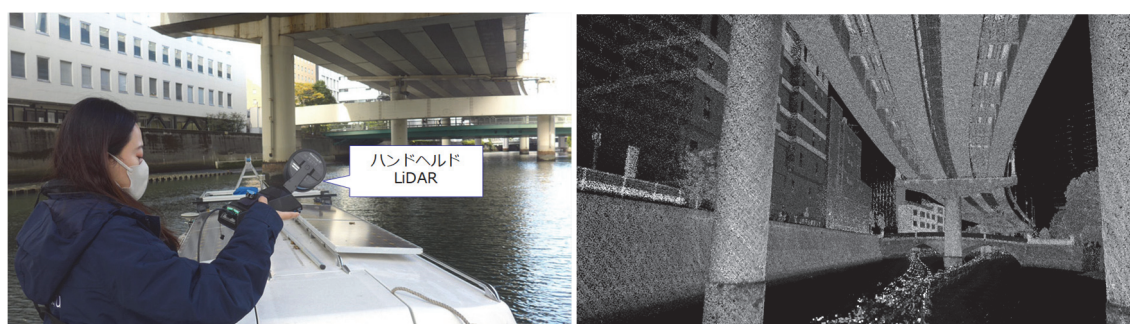


図 24. ハンドヘルド LiDAR 計測 (左: 計測風景, 右: 取得点群)