

5. 実施内容(考察)

5.1 CLAS/SLAM 処理結果

都心部の河川は、建築物や橋梁などが周囲に密集するためGNSS測位環境が劣悪であるために、SLAMによる位置姿勢推定が有用となってくるが、必ずしも安定的に位置姿勢推定ができるとは限らない。SLAMとは自己位置推定と点群統合を同時に行う処理であり、図5-1に示すように、形状特徴を十分得られる空間であれば、SLAM処理が成功する。一方で、図5-2に示すように、形状特徴を十分得られない空間では、退化問題が生じることで、SLAM処理が失敗する。また、図5-3に示すように、LiDAR測距が届いていない箇所がある場合は、当然ながら欠測領域となるが、周囲に形状特徴を十分得られない場合は、SLAM処理ができない可能性が高くなる。しかしながら、LiDARの位置をある程度の精度で特定できれば、形状特徴を十分得られない空間であってもSLAM処理を成功させることができる可能性が従来型SLAMよりも高くなる。そのため本手法では、GNSS測位とSLAMを組み合わせるアプローチを採用しており、特にGNSS測位にCLASを利用したCLAS/SLAMを提案している。

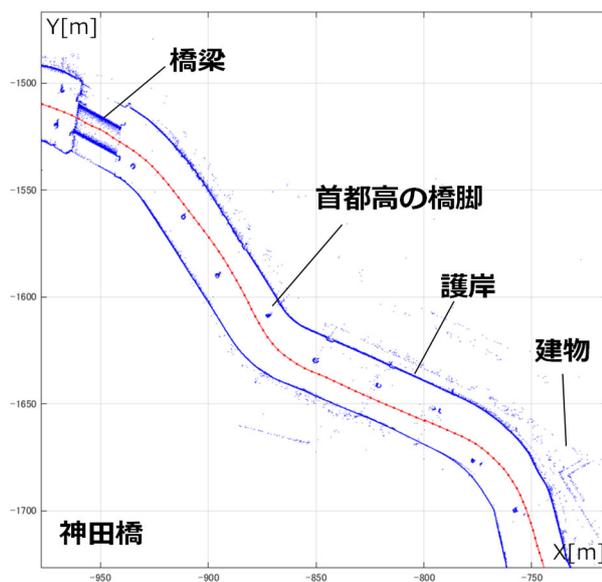


図 5-1. SLAM の成功箇所

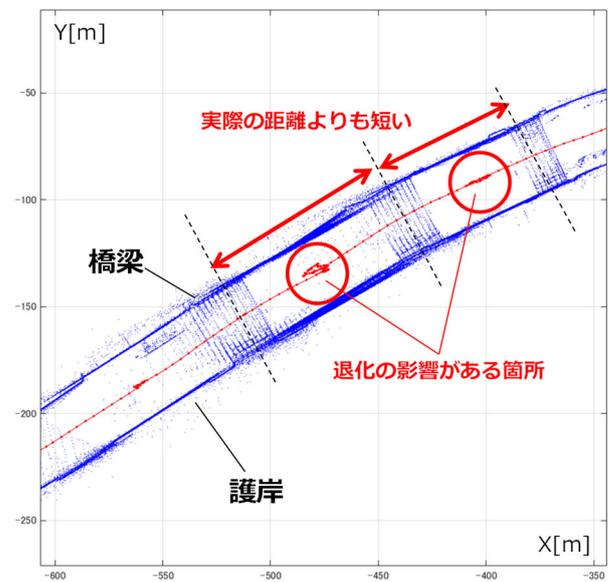


図 5-2. SLAM の失敗箇所

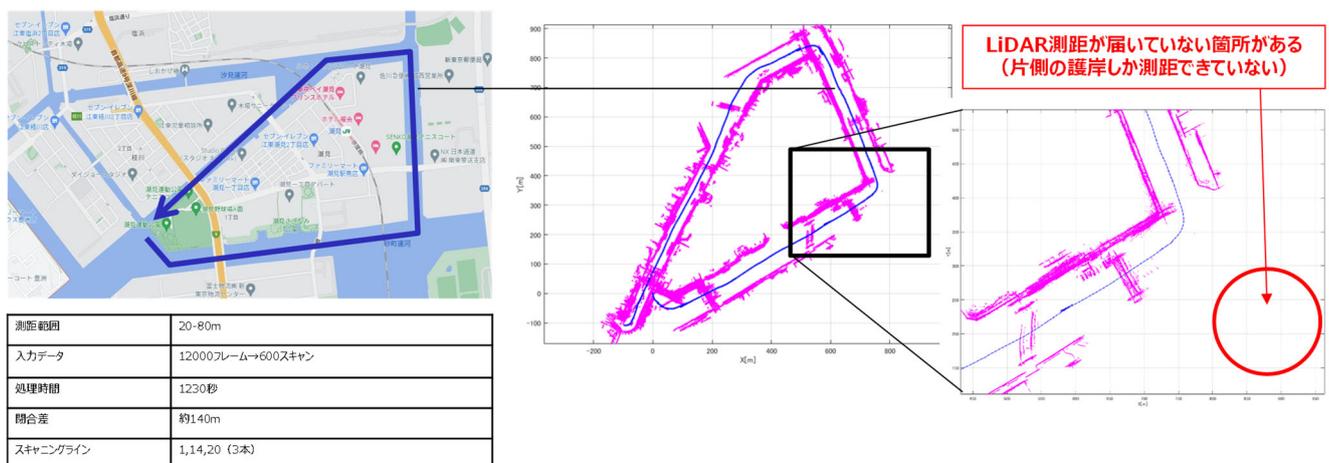


図5-3. 測距可能範囲を超える箇所を含む計測対象が含まれるケース

また、都心部の河川はGNSS測位環境が劣悪であるために、屋内外シームレス測位のアプローチとしても本手法を提案している。屋内外シームレス測位とは、屋外空間と屋内空間の測位モードを自動で切り換えることで、屋内外空間における移動時における連続測位を実現する技術であり、GNSS測位のサービス範囲が屋外空間のみ、屋内測位のサービス範囲が屋内空間とその近傍のみに限定されるため、屋外空間ではGNSS測位、屋内空間では屋内測位を測位モードとして適用している。河川空間における屋外空間と屋内空間は、おおまかに天空率の高低で分類することが安易ではあるため、河川空間は屋外にある空間ではあるが、橋梁や高架橋の下を屋内空間と定義すると、屋内外シームレス測位の測位モードを切り換えるべき位置が明確となる。この切り換えを自動化する際には、測位においてFIX解を得られる位置とFIX解を得られない位置で判別することで、屋内外シームレス測位の測位モードを切り換えることが十分に可能であることが実験で確認できた。

一方で、SLAMについては、形状特徴の量に依存した退化問題の発生の有無がSLAM処理の安定性に影響してくるところであり、河川空間においては測位モードの切り換えよりも、やや複雑であることを確認できた。具体的には、護岸付近であってもその護岸の形状が単調か複雑かで、SLAM処理の安定性が変わることが確認できた。また、船舶が通過する橋梁の大きさ(道路幅など)や橋梁の構造(トラス、アーチなど)の違いによっても、SLAM処理の安定性が変わることが確認できた。

これらの特徴と、本実験で対象とした神田川および日本橋川で得られた計測実験結果をふまえて、測位およびSLAM処理の結果を計測環境によって整理した成果を表5-1に示す。ただし、橋梁の種類は、まだ計測サンプル数が足りていないため、項目から除外する。

表 5-1. 都市河川における水上レーザー計測の課題

	GNSS	SLAM	課題解消案, そのほか
高速道路なし区間	測位可	安定	
護岸付近 (単調形状)	測位可	不安定	GNSS測位結果による直接定位
護岸付近 (複雑形状)	測位可	安定	
2車線程度の橋梁下	欠測	安定	
4車線以上の橋梁下	欠測	不安定	GNSS測位結果の線形補間など
高速道路あり区間	欠測	安定	
護岸付近 (単調形状)	欠測	安定	高速道路の橋脚でSLAMが安定化
護岸付近 (複雑形状)	欠測	安定	
2車線程度の橋梁下	欠測	安定	
4車線以上の橋梁下	欠測	不安定	船舶モーター回転数などの利用

河川上空に高速道路がない区間については、全体的にGNSS測位もSLAM処理も安定的にデータ取得できた。しかしながら、単調な形状で構成される護岸付近では、SLAM処理が不安定になる傾向があるため、GNSS測位結果による直接定位が有効となることが確認できた。また、4車線以上の橋梁下では、GNSS測位ができないとともに、退化問題によりSLAM処理も不安定となる傾向があった。このような区間は、航行軌跡が直線的であれば、GNSS測位結果の線形補間が有効となることが確認できた。

河川上空に高速道路がある区間については、理論どおりに、GNSS測位がほぼできないことが確認できた。ただし、この区間については、GNSS単独測位は可能であるとともに、RTK-GNSS測位も可能であることを確認できているが、RTK-GNSS測位やPPP-RTK測位において、FIX解を出した位置がほぼないという意味で、GNSS測位がほぼできない、としている。一方で、SLAM処理は安定的にデータ取得できた。特に日本橋川においては、高速道路の橋脚群がSLAM処理に十分な形状特徴として利用できるため、SLAM処理を安定化させることができることを確認できた。しかしながら、河川上空に高速道路がない区間と同様に、4車線以上の橋梁下では、退化問題によりSLAM処理も不安定となる傾向があった。このような区間については、船舶モーター回転数などを利用した慣性航法のような手法を適用する必要があると考えられる。

屋内外シームレス測位における自己位置推定の結果の良否は、自動追尾トータルステーションで得たLiDAR位置の点列データや、地上計測などで得た点群を基準データとした定量評価が検討できるが、都市河川における水上においては、トータルステーションや3Dスキャナを設置できない箇所が多いため、そのような定量評価法は困難である。そのため、ICPでの点群の合成精度による定量評価とあわせて、推定した測位位置の連続性と、統合した点群のずれで定性分析した。まず、CLAS/SLAMで可視化した点群(図4-3)において、地物が鮮明に再現できていることから、提案手法によって推定した測位位置の連続性が十分に確保できていることが確認できる。

次に、実験で使用したLiDARであるVLP-32C (Velodyne)の測距精度が0.05 mであることにもとづき、PPP-RTK測位結果2種は、ほぼ同じ測位精度であると評価し、AsteRx4の測位結果を入力データとし、従来型SLAM (GNSS測位結果を利用しないSLAM)と提案手法の処理結果を比較した。処理環境 (MATLAB, CPU: Intel Core i7-10710U 1.10GHz, RAM: 16Gbytes), および、スキャンマッチングに関する処理内容は同じとした。また入力データには、水平スキャンで取得した点群から図4-2に示した区間番号に対応する区間を選択し、LiDARからの高さが(-0.5~0.5) mの範囲で抽出した点群データを用いた。区間1~4の処理結果を図5-4に、区間5と区間6の処理結果を図5-5に示す。従来型SLAM結果では、自己位置推定結果は得られたが、護岸形状が単調な箇所や、幅が広い橋梁下において、自己位置推定が失敗しやすいことを確認した(図5-4左列)。一方で、提案手法では、従来型SLAMにおいて失敗した箇所であっても、自己位置を良好に推定できていることを確認した(図5-4右列)。

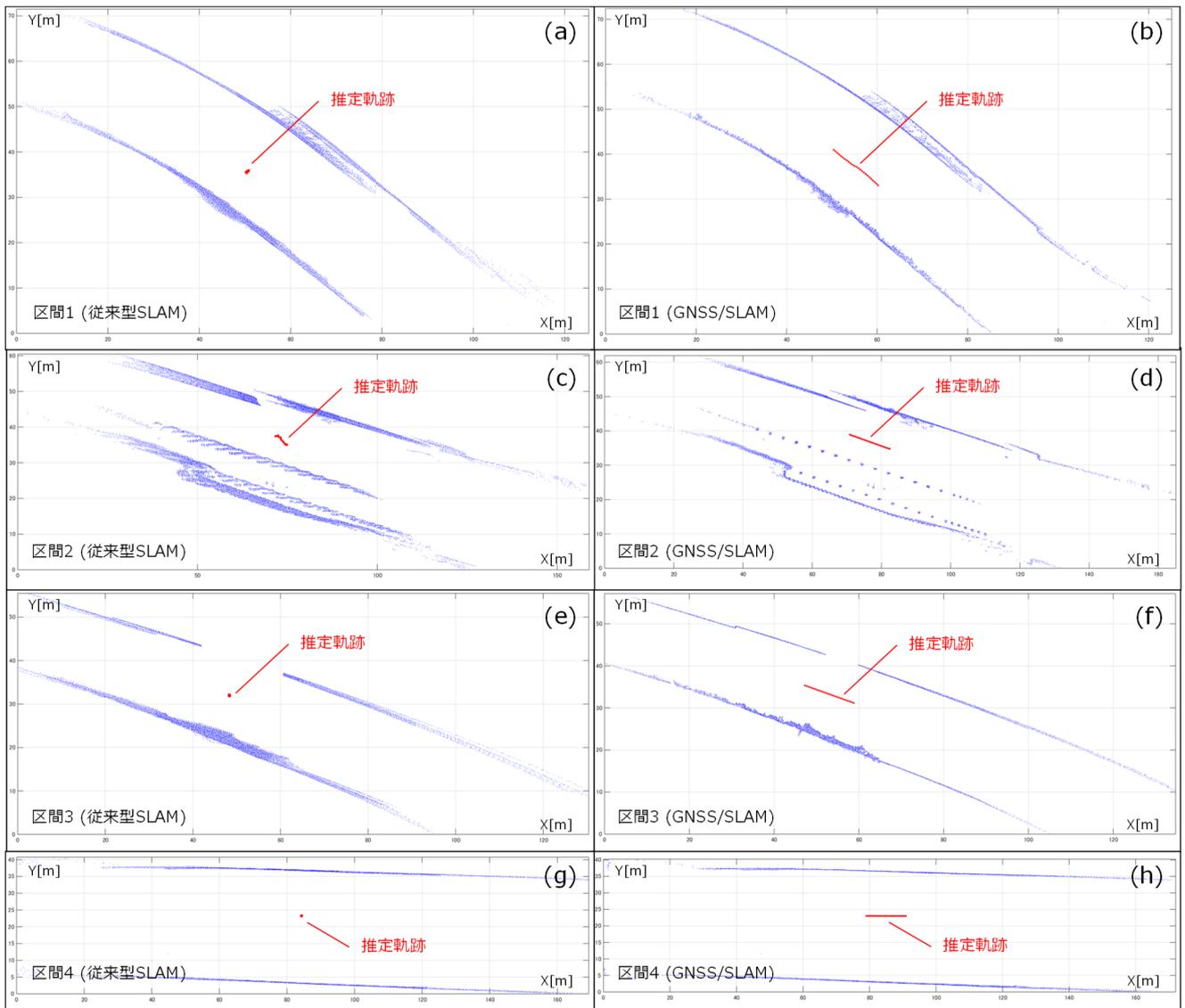


図 5-4. 区間 1~4 の点群処理結果(左列:従来型 SLAM, 右列:CLAS/SLAM)

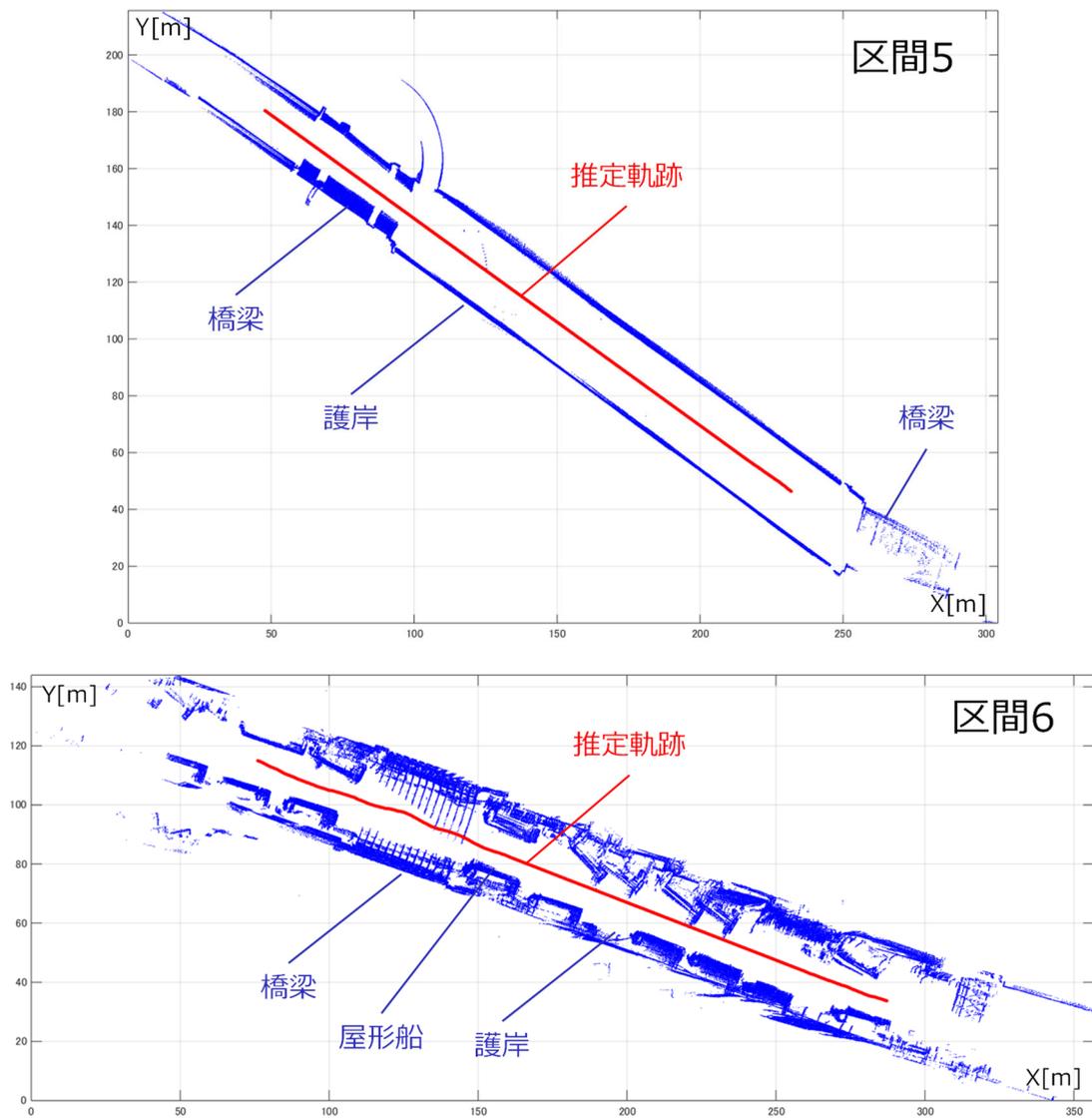


図 5-5. 区間 5 および区間 6 の点群処理結果 (CLAS/SLAM)

従来型 SLAM と提案手法とも、表 5-2 に示すように、LiDAR の測距精度と同じ程度の精度で、各シーンにおける ICP 処理が行われていることを確認した。また、図 5-6 に示すように、従来型 SLAM が失敗している任意シーンにおける ICP 処理結果についても両手法で良好な結果を得ている。これらの結果から、従来型 SLAM において自己位置推定が失敗していることは、SLAM における退化問題が原因であり、提案手法で退化問題を回避できたことを示している。さらに、GNSS/SLAM における良好な初期値として利用できる点で、CLAS 利用の PPP-RTK 測位は、都市河川における水上移動計測で十分に利用できることを確認できた。

表 5-2. ICP 処理における点群の合成精度

		区間1	区間2	区間3	区間4	区間5	区間6
従来型SLAM	平均値	0.036	0.044	0.024	0.028	0.034	0.051
	中央値	0.037	0.041	0.024	0.029	0.031	0.048
CLAS/SLAM	平均値	0.036	0.013	0.017	0.013	0.032	0.035
	中央値	0.035	0.013	0.017	0.014	0.030	0.032

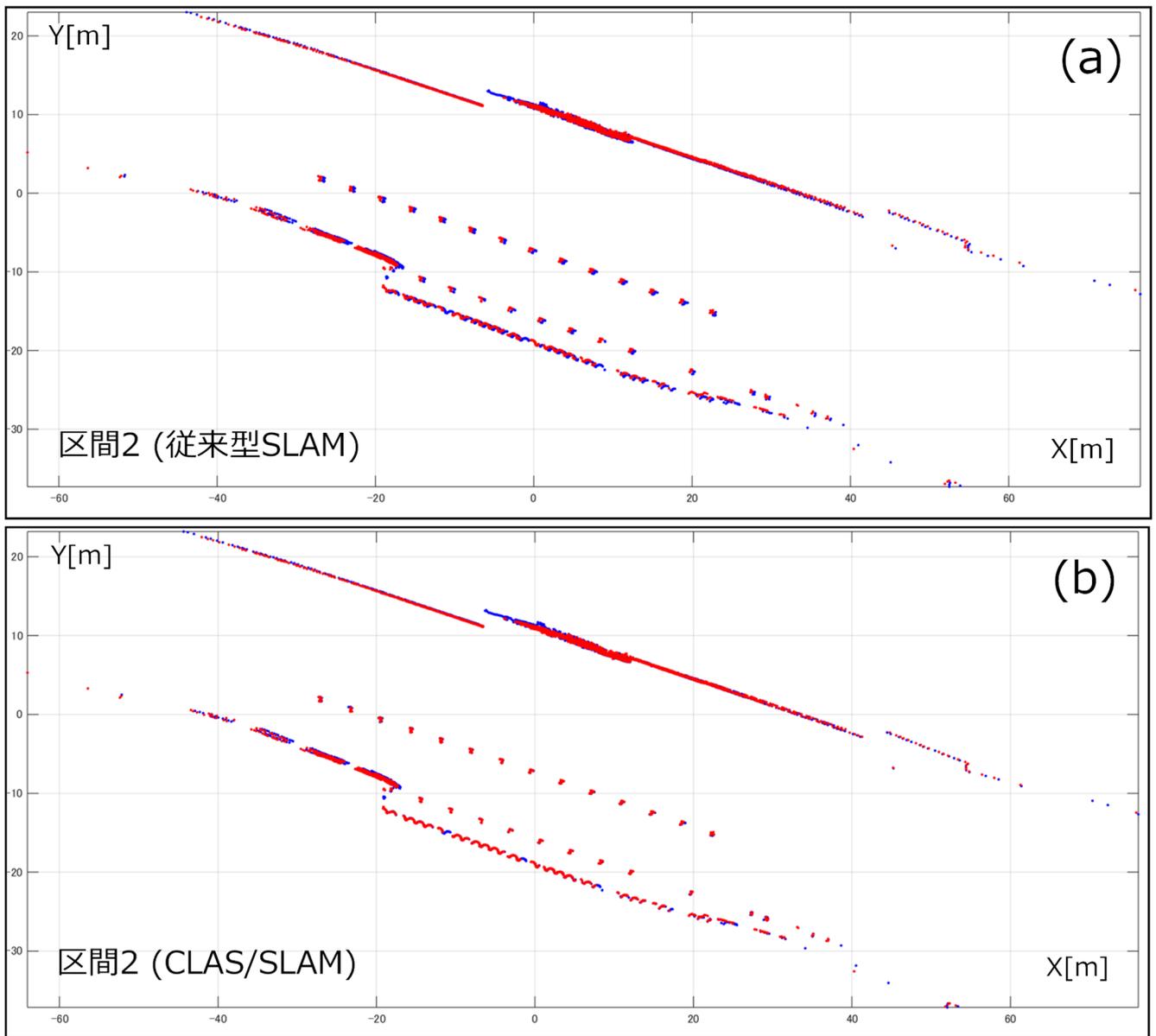


図 5-6. 区間 2 における任意シーンにおける ICP 処理結果

今後の課題としては、市販の計測装置で取得した点群との比較による精度検証や、水中計測への応用、姿勢推定におけるGNSS測位利用、点群を利用した船舶ナビゲーションが挙げられる。水中計測では、船舶に搭載したマルチビームソナーで取得したデータ、GNSS測位のみならず、LiDARデータから推定した位置姿勢データを利用した水中の3D計測を検討している。また、船上ではアンテナ基線長を確保できるため、複数のGNSSアンテナを利用した姿勢推定(図5-7, 図5-8)とLiDARによる姿勢推定の組み合わせを検討しており、すでに予備実験を開始している。さらに、本提案手法を活用して、潮位変化に適合したマップマッチング手法や、船舶の自動航行に適した3D地図データ構造の提案を検討している。CLASを利用したPPP-RTK測位とLiDARを組み合わせた屋内外シームレス測位に関する手法は、対応するGNSS受信機がまだ高額である点が課題であるが、自律航行型船舶への適用のみならず、自動運転車や構造物点検UAVへの適用も可能であるため、これらも今後の課題としている。

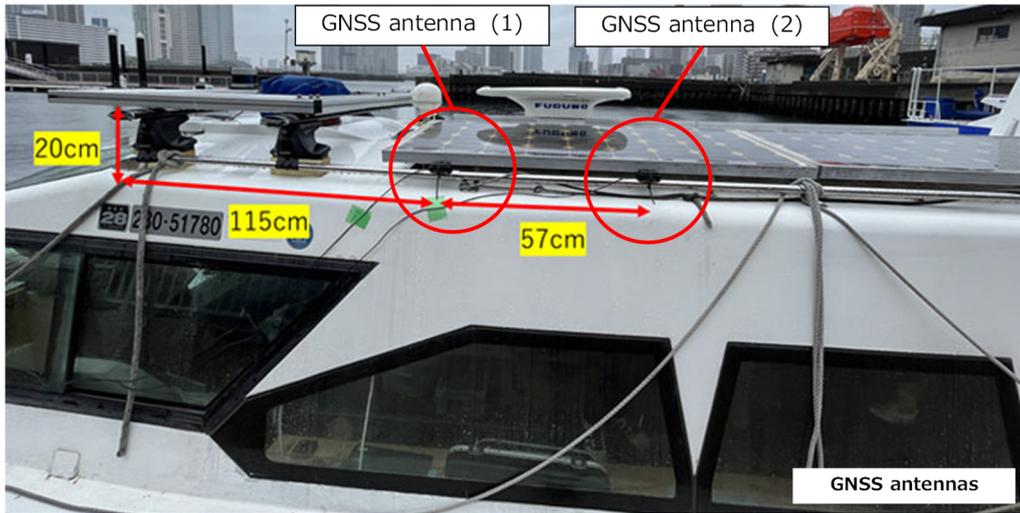


図5-7. 姿勢推定を目的としたGNSSアンテナの複数設置

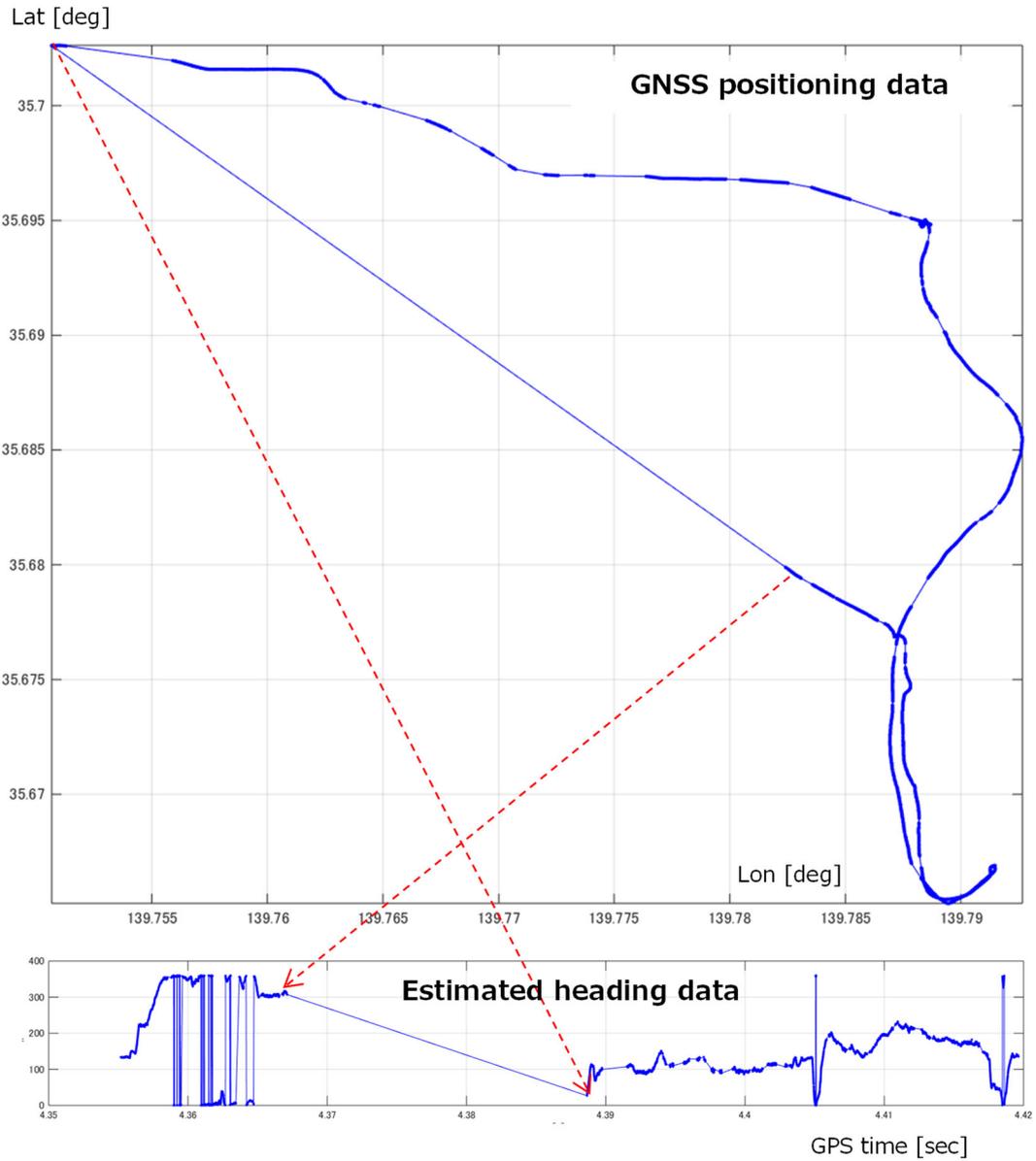


図5-8. 複数のGNSSアンテナを利用した姿勢推定

5.2 現地踏査時における初見・課題

研究協力者である建設コンサルタントとの現地実験および協議をとおして、現地踏査時に感じた初見・課題を整理した結果を表 5-3 に示す。この結果は、建設コンサルタントの視点からの課題として整理されているものであり、本成果の点検業務への活用方法の基礎データとなるものである。

表 5-3. 現地踏査時における初見・課題

情報	
1	1往復すればある程度の点群データがとれる
2	工口航行の観点から電気自動車と同様のリチウム電池を利用した船
3	航行速度は現状8km/h目安（今後、最低・最大速度を検討する）
4	首都高のランプ橋や橋脚等が入り組んだ場所のほうが、固定物が多いため位置合わせ等のデータ処理がしやすい
5	首都高の橋脚情報など、他管理者がもつデータがないため、河川内にどの程度支障物があるか不明（橋脚の根巻コンクリート等）。さらに、首都高の地下化を行っている箇所などは、橋脚が撤去された場合、支障物の位置が全く分からなくなる
6	点群データ取得精度が3cm誤差
7	360°カメラを併設すれば写真・動画データも同時取得可能。
8	水中計測は音波によるもので、水中汚濁状況は関連しない
9	データ取得可能な測距距離100m程度
所見や課題	
1	点群データ取得等において、道路渋滞状況に左右されないが天候や潮位に大きく左右される
2	点群データ取得精度が3cm誤差のため、ひび割れ幅の取得や変位計測は困難である。現状では、近接目視点検の代用としては適用が難しい
3	計測できる範囲は船から見える範囲のみ。横桁の裏側を見るには1往復では難しく、高い位置の橋座部・支承周り等の死角となる範囲は調査できない
4	橋面上からの日常点検では確認できない床版下面の遊離石灰析出有無、伸縮装置部や排水管の漏水チェックに活用が期待できる。（損傷サイズ等が細部まで必要なく、損傷の有無やおおよその範囲が確認できればよい損傷レベル）
5	1週の航行時間が短く、容易に調査を行うことができるが、詳細な損傷状況把握はできないのが現状。定期的に変位（3cmの誤差の課題はあるが）などの計測データを集計し、構造として異常がないかや損傷原因の推定の材料として使用できる可能性はある
6	鋼桁は部材形状が複雑なため死角が多い。航行ルートの複数選定やカメラ固定高さの調整が必要と考えられる。ただし、水位が低い（浅い）箇所は航行ルートとして適していない
7	橋梁形式、諸元によって構造的な弱点位置は異なるため、それら情報や着目点を洗い出し・マッピングして航行ルートを選定すべき
8	水中ソナーにより河床の形状計測も可能だが、音波による計測のため、ほとんど航行位置直下しか情報が得られない。護岸や橋脚の洗堀を確認する場合は、それらに寄り付いた航行ルートを意図的に選定する必要がある
9	自動運行、無人遠隔操作が可能となれば、災害時における安全な緊急点検（スクリーニング）に活用できそう
10	1週の航行でテラバイトレベルの容量となるため、データの取得・共有方法について検討する必要がある
11	公共建造物のデータだけでなく、河川に近接する民間ビルなども変状管理すると扱いの幅が広がる
12	水位情報（満潮・干潮の影響）を時間軸で取り込み、自動運転時の3D計測と合わせて時間軸の走行シミュレーション管理<4D管理>（計測時の高さの精査・日常水上船舶利用時の運行経路予測）ができないか
13	公共建造物（橋、護岸、水門等）の既存データを計測した3次元データに全て取り込ませ、河川主体の周辺建造物の一元管理、最新情報の更新を常態化させ、河川管理の主軸的なシステム作りはできないか
14	今回の実験では積みブロック型やL型の護岸が整備された中小河川が主体であったが、例えば一級河川（荒川、江戸川、中川、利根川、鬼怒川、小貝川等）の将来的に堤防沈下が見込まれるような築堤盛土・護岸が整備された箇所で常時点群データ取得を行い、治水安全上必要な堤防・護岸の天端高さを確保しているかモニタリングする
15	自動航行が実現した際には、例えば補修工事を行う際の資機材輸送路として活用する

5.3 令和4年度に実施する課題

令和4年度においては、令和3年度の実施体制・役割分担にもとづいて、予定どおりに実施する。また、図5-9に示した項目のうち、(B)自律型船舶を用いた構造物計測技術の開発に関する業務を実施する。

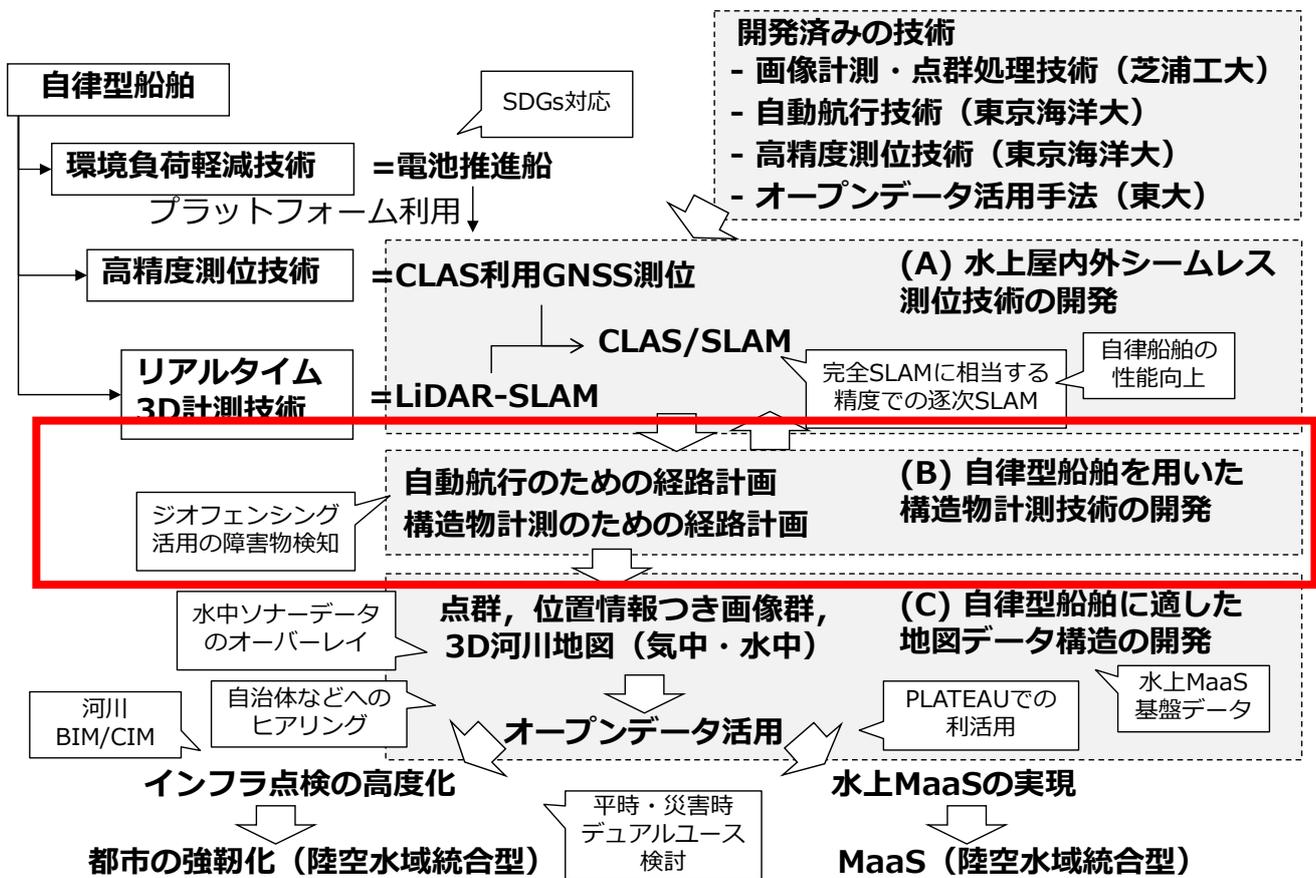


図 5-9. 実施項目

令和4年度において、具体的には、下記の内容を実施する。

- d) 自律航行のための経路計画の設計法と検証(主担当:久保・東京海洋大学, 研究参画者): 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を取得する。
- e) 構造物計測のための経路計画の設計法と検証(主担当:清水・東京海洋大学, 研究参画者): 主として d) 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を取得する。
- f) 変状の進展を捉えるための測位・測域精度の検証(主担当:中川・芝浦工業大学, 研究代表者): 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)で確立する。

6. まとめ

本業務の成果は準天頂みちびきの有効活用例のひとつとして貢献するものであるとともに、本提案手法は自律型船舶を利用した日常点検業務および緊急点検業務をUAVと連携したスクリーニング調査手法として活用できる。水上交通インフラとなる自律型船舶にインフラの計測ができる機能を搭載すれば、水上巡視で取得できるデータを利用した日常点検業務の効率化かつ高度化を実現できる。令和3年度において、下記について実施し、それぞれで設定した目標を達成できた。

- a)電池推進船搭載3D計測ユニットの構築:開発済みの外付け型ICT建機での艀装時間が1時間程度であることを根拠として、艀装時間1時間以内を目標値とし、令和3年度において実施した実験をとおして、これを達成した。
- b)都市河川における測位環境の整理:DOP (Dilution Of Precision) 値, 可視衛星数, FIX率, 天空率の点群精度との関連の可視化に必要な数値を踏まえて、測点間隔2mおよび対象河川数3を指標とし、令和3年度において実施した実験をとおして、これを達成した。
- c)CLAS/SLAMの実証と検証:航行速度3ノット, LiDAR測距精度3cm, GNSS測位精度10cmを見積値とし、取得点密度3cm, 点群のばらつき5cmを指標として、令和3年度において実施した実験をとおして、これを達成した。

添付資料:点群データ(2021/12/3 日取得. 浅草橋付近 14,744,818 点. X,Y,Z,I,I,I の ASCII 形式)
[pts_exp20211203_sample3]

参考文献

- 1) 齊藤詠子:スマートフォンによる小型船舶の衝突防止に必要な情報の精度, 電気学会次世代産業システム研究会, IIS-19, 3 pages, 2019.
- 2) 澤田涼平, 平田宏一, 北川泰士, 齊藤詠子, 宮崎恵子, 上野道雄, 福戸淳司:着棧操船の音声支援と自動着棧制御に関する研究, 海上技術安全研究所報告 第20巻別冊, pp.85-90, 2020.
- 3) Dai Mimura, Katsumasa Miyatake, Yukihiro Kubo, Sueo Sugimoto: Positioning Accuracy of Single Frequency GNSS PPP by CLAS Comparing with MADOCA Products, Proceedings of the ISCIE International Symposium on Stochastic Systems Theory and its Applications, pp.43-48, 2020.
- 4) Masafumi Nakagawa: Improvement in the Geofencing Service Interface Using Indoor Positioning Systems and Mobile Sensors, ISPRS Archives, Volume XL-4/W4, pp.27-30, 2013.
- 5) Ryosuke Ichikari, Ryo Shimomura, Masakatsu Kouroggi, Takashi Okuma, Takeshi Kurata: Review of PDR Challenge in Warehouse Picking and Advancing to xDR Challenge, 2018 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), pp. 1-8, 2018.
- 6) 中川雅史, 栗田航貴, 尾関友啓, 久保信明, 清水悦郎, 柴崎亮介: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, 日本写真測量学会 令和3年度秋季学術講演会発表論文集, pp.17-18, 2021.
- 7) Masafumi Nakagawa, Shinjiro Abe, Sho Sanuka, Kazuo Saito, Masahiro Miyo: LiDAR Scan Matching with RTK-GNSS Positioning and Geometric Constraints, The 41st Asian Conference on Remote Sensing, 10 pages, 2020.
- 8) Jan Weingarten, Roland Siegwart: EKF-based 3D SLAM for Structured Environment Reconstruction, Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and System, pp.2089-2094, 2005.
- 9) Kevin P. Murphy: Bayesian Map Learning in Dynamic Environments, Advances in Neural Information, Processing Systems 12, pp.1015-1021, 2000.
- 10) Yang Chen, Gérard Medioni: Object Modelling by Registration of Multiple Range Images, Image Vision, Computing. Butterworth-Heinemann. Vol. 10, Issue 3, pp. 145-155, 1992.
- 11) Peter Biber, Wolfgang Straßer: The Normal Distributions Transform: A New Approach to Laser Scan Matching, Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Vol. 3, pp. 2743-2748, 2003.
- 12) Jialong Yang, Hongdong Li, Dylan Campbell, Yunde Jia: Go-ICP: A Globally Optimal Solution to 3D ICP Point-Set Registration, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 14 pages, 2016.

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

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
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，口頭発表	中川雅史， 栗田航貴， 尾関友啓， 久保信明， 清水悦郎， 柴崎亮介	日本写真測量学会	2021/10/22	国内
Urban River Mapping by Boat-based Mobile Laser Scanning with PPP-RTK	Kimura Naoto， Masafumi Nakagawa， Koki Kurita， Tomohiro Ozeki， Nobuaki Kubo， Etsuro Shimizu， Ryosuke Shibasaki	The 42th Asian Conference on Remote Sensing	2021/11/24	海外

2. 学会誌・雑誌等における論文掲載

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
都市河川でのGNSS/SLAMによる屋内外シームレス測位	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	審査中	国内

(注) 発表者氏名は、連名による発表の場合には、筆頭者を先頭にして全員を記載すること