

令和 4 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 5 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 4 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4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4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	自動航行のための経路計画の設計法と検証.....	7
2.2.2	構造物計測のための経路計画の設計法と検証.....	10
2.2.3	変状の進展を捉えるための測位・測域精度の検証.....	12
2.3	実データ取得と処理.....	15
2.3.1	令和4年度の実験概要.....	15
2.3.2	自動航行のための経路計画の設計法と検証.....	17
2.3.3	構造物計測のための経路計画の設計法と検証.....	19
2.3.4	変状の進展を捉えるための測位・測域精度の検証.....	21
2.3.5	各実施項目で共通する根拠データとなる成果.....	23
2.4	実施内容に関する考察.....	26
2.4.1	費用対効果の妥当性.....	26
2.4.2	波及効果.....	27
3	まとめ.....	29

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, 陸空水域統合型 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. 自動運转向け 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).

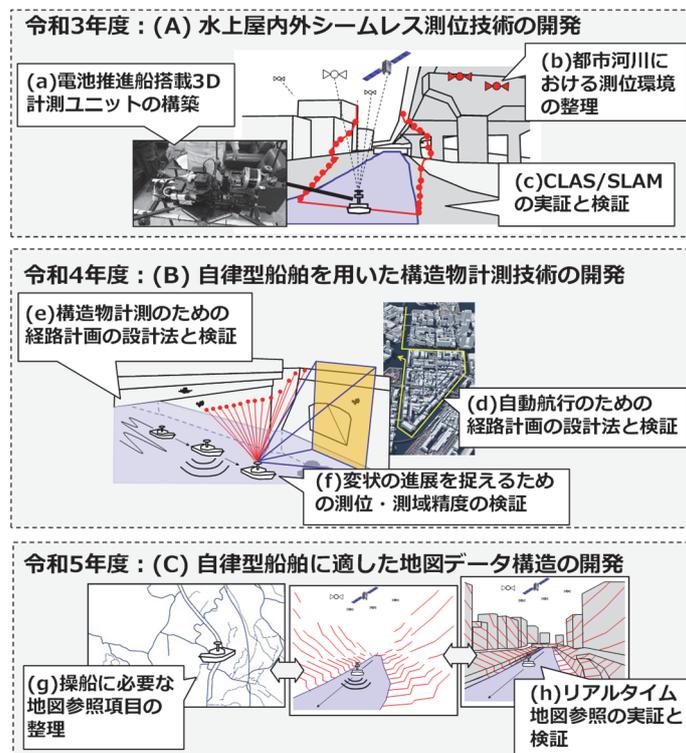


図 1. 業務計画(各年度)

1.3 令和4年度における委託業務の結果概要

令和4年度においては、(B)自律型船舶を用いた構造物計測技術の開発に関する下記3項目を実施した。また、下記3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。

1) 自動航行のための経路計画の設計法と検証

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た。対象河川数3を目標値とし、実績値はのべ8(実験数6:日本橋川4回, 神田川3回, 汐見運河等1回)であり、目標を達成した。

2) 構造物計測のための経路計画の設計法と検証

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を取得した。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た。対象河川数3を目標値とし、実績値はのべ8(実験数6:日本橋川4回, 神田川3回, 汐見運河等1回)であり、目標を達成した。

3) 変状の進展を捉えるための測位・測域精度の検証

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。

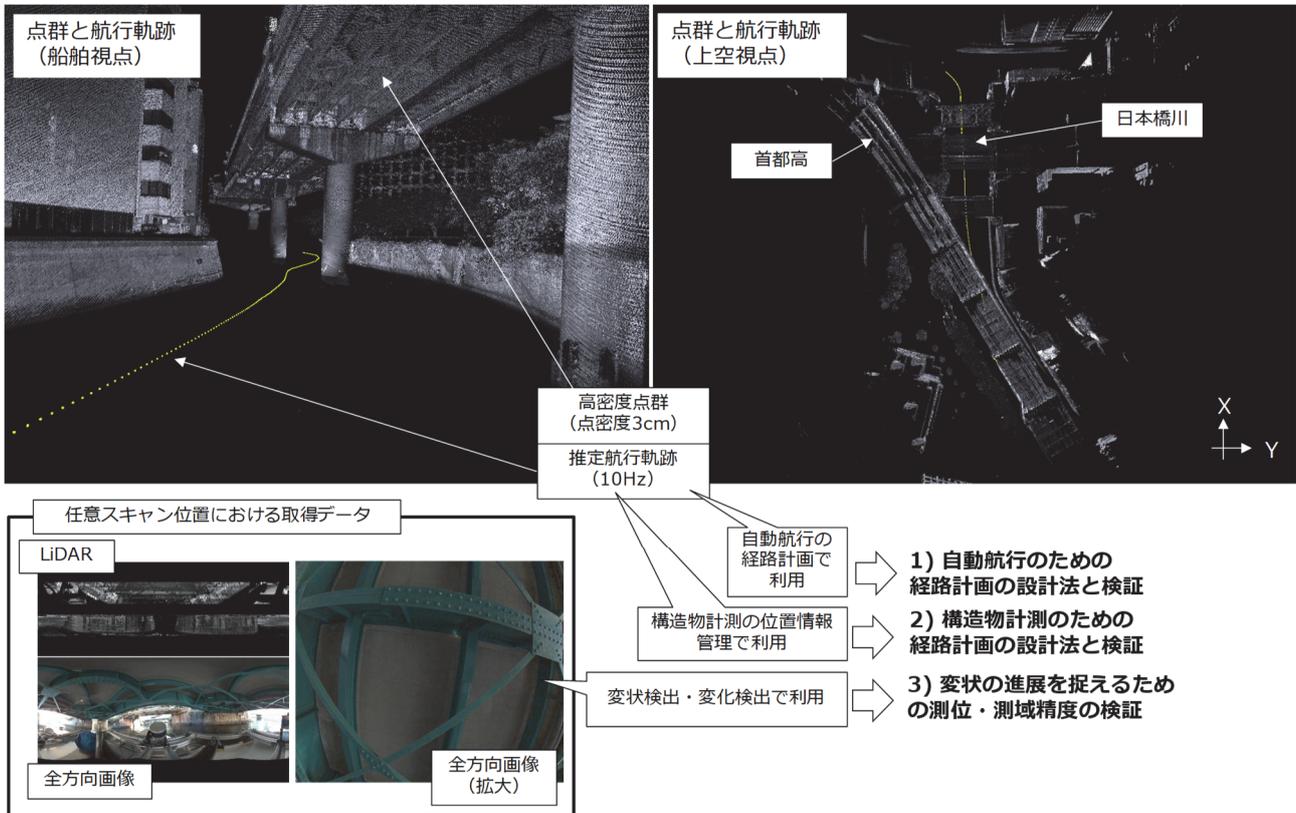


図2. 業務で得た実験結果の概要との関連

2 実施内容

2.1 令和4年度における実施概要

2.1.1 業務内容と実施体制

令和4年度においては、図3に示す項目のうち、(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(東京海洋大学および東京大学)がある。

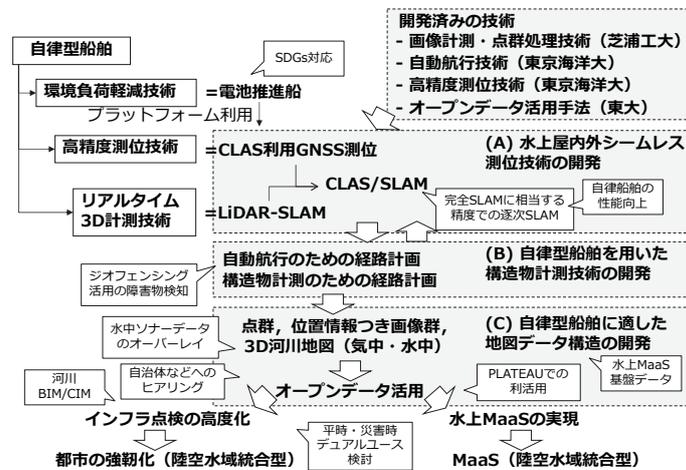


図3. 実施項目

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
(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	水上MaaS基盤データ
		平時・災害時デュアルユース検討	
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) 自動航行のための経路計画の設計法と検証については、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収集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計測データ収集を達成内容とした。2) 構造物計測のための経路計画の設計法と検証については、船舶の移動制約による撮影位置制約を明確化することを目標として設定し、変状の観測等における撮影位置制約の基礎データ収集(定性評価)を達成内容とした。3) 変状の進展を捉えるための測位・測域精度の検証については、変状の進展を捉える位置再現性を地図情報レベル 500 にもとづく精度で確立することを目標として設定し、橋梁などの定期点検要領にもとづく撮影画像の空間分解能を満足する計測を達成内容とした。全体的には、オープンな地理空間データとして公開できた段階で、達成目標のレベルに到達したと評価することとしている。

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) 自動航行のための経路計画の設計法と検証	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収集する	日本橋川、神田川を重点河川とした計測データ収集	高精度な屋内外シームレス測位を利用する経路計画設計法(自動航行)の提案	船舶海洋分野のダイナミックマップ、地図情報レベル500
2) 構造物計測のための経路計画の設計法と検証	船舶の移動制約による撮影位置制約を明確化する	変状の観測等における撮影位置制約の基礎データ収集(定性評価)	高精度な屋内外シームレス測位を利用する経路計画設計法(構造物計測)の提案	地図情報レベル500、橋梁などの定期点検要領
3) 変状の進展を捉えるための測位・測域精度の検証	変状の進展を捉える位置再現性を地図情報レベル500にもとづく精度で確立する	橋梁などの定期点検要領にもとづく撮影画像の空間分解能を満足する計測	水平位置の標準偏差0.25m以内、標高点の標準偏差0.25m以内での測位・測域技術の提案	地図情報レベル500、橋梁などの定期点検要領
	オープンな地理空間データとして公開できた段階で、達成目標のレベルに到達したと評価する		公開したデータを利用した応用事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・測域の要素技術を構築できること(CLAS や LIDAR 等の利用)、および、都市河川の通常航行により高密度点群を生成できることを現段階の状態とし、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)を提案できること、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)、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、地理空間オープンデータとして利用できるデータ公開(G 空間情報センター)、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・測域の要素技術を構築できる (CLASやLIDAR等の利用)	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)を提案できる
都市河川の通常航行により高密度点群を生成できる	生成した点群をオープンデータとして公開できる

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)	地理空間オープンデータとして利用できるデータ公開 (G空間情報センター)
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4年度の実施状況を図5に整理する。

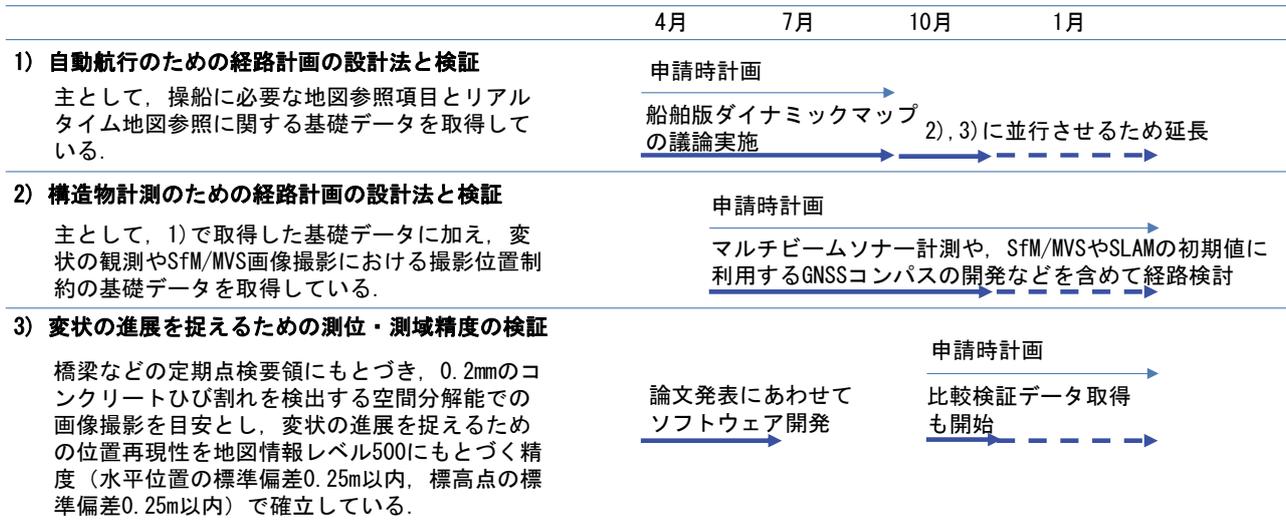


図5. 令和4年度の実施状況

まず、1) 自動航行のための経路計画の設計法と検証 については、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) 構造物計測のための経路計画の設計法と検証 および 3) 変状の進展を捉えるための測位・測域精度の検証 に並行させるために、年度内まで延長した。

2) 構造物計測のための経路計画の設計法と検証 については、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を取得した。申請時計画では、CLAS 利用の GNSS 測位のデータや、LiDAR データ、全方向画像といった基礎データの取得や、変状の観測を5～11月に予定したが、これらのデータ解析に加えて、マルチビームソナー計測や、SfM/MVS や SLAM の初期値に利用する GNSS コンパスの開発などを含めた経路検討を年度内まで延長して実施した。

3) 変状の進展を捉えるための測位・測域精度の検証 については、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）で確立することを実施した。申請時計画では、マルチビームソナーデータなどの比較検証データ取得を10～3月に予定したが、これらのデータ取得・検証に合わせて、5・6月期の論文発表にあわせてソフトウェア開発を4～6月に実施した。

そのほか、令和5年度に、「自律型船舶に適した地図データ構造の開発」を実施するために、「操船に必要な地図参照項目の整理」と「リアルタイム地図参照の実証と検証」を計画している。これに関する準備として、実験データで得た点群のオープンデータ化を進めている。三菱総研および東京都デジタルサービス局との数回の協議後、オープンデータ化の調整を進めていたが、オープンデータ化に関して説明責任できない旨の相談があり、オープンデータ化ではなく、データ利用という形で実施することになっている。現在は、G 空間情報センターの利用を

検討している。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、今後は土木構造物の維持管理における本研究成果の展開を予定している。

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、次年度の業務に関連する研究内容に関する追加実験を実施した。令和4年度の実施状況に対応する実施実績を図6に整理する。また、令和4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)を図7に整理する。

1) 自動航行のための経路計画の設計法と検証

経路計画(自律航行向け)の設計に向けて必要となる情報の整理

- 都市河川を航行する船舶としてL10m×W3m×喫水0.5mを設定し、想定される航行水域で自動航行で必要となる情報を実測・検証
- 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、UAVの飛行計画作成と同様な**3D経路計画として情報整理**している(TRL5を想定。課題終了時にはTRL6に到達)
- 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(一財)日本船舶技術研究協会において、実施項目担当(清水)が委員長となり、船舶海洋分野のダイナミックマップ研究会を発足(2022年7月)。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取り組んでいる

2) 構造物計測のための経路計画の設計法と検証

経路計画(構造物計測向け)の設計に向けて必要となる情報の整理

- 主として、1)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している
- 日本橋川・神田川を重点河川と設定し、マルチビームソナー計測や、SfM/MVSやSLAMの初期値に利用するGNSSコンパスの開発などを含めて経路検討
- **GLAS受信機の性能比較に加えて、RTK-GNSS測位、慣性航法(IMU)、魚眼カメラによる位置解推定などの比較実験を実施**している

3) 変状の進展を捉えるための測位・測域精度の検証

屋内外シームレス測位・測域技術(GLAS/SLAM)の開発

- 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)で実現するGLAS/SLAMを開発している
- GLAS/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
- 計測画像がサブピクセル処理で撮影距離25m程度まで対応可能であることを確認し、AI利用の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

図6. 令和4年度の実施実績

令和3年度末の目標値

令和4年度末の進捗

1) 自動航行のための経路計画の設計法と検証

指標・目標値：都市河川航行での最適な経路生成法の確定
根拠：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とする

- 経路最適化に利用する陸上点群取得(100%~)

2) 構造物計測のための経路計画の設計法と検証

指標・目標値：船舶の移動制約による撮影位置制約の明確化(定性評価)
根拠：変状の観測やSfM/MVS画像撮影における撮影経路計画とする

- 通常航行速度でのスクリーニング(100%~)

3) 変状の進展を捉えるための測位・測域精度の検証

指標・目標値：変状の進展を捉える位置再現性(地図情報レベル500にもとづく精度)
根拠：橋梁などの定期点検要領にもとづく撮影画像の空間分解能より決定

- GLAS/SLAMによる位置姿勢推定(100%~)
- 異常検知へのAI適用可能性(100%)
- SLAM退化問題への対応(一部区間)
- 安全航行のための水中点群の重要性確認

図7. 令和3年度末の目標値との対比