



Title	港湾構造物水中部の点検診断のための自律型水中ロボットの開発とその適用に関する研究
Author(s)	喜多, 司
Citation	大阪大学, 2023, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/91951
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

博士学位論文

港湾構造物水中部の点検診断のための
自律型水中ロボットの開発とその適用に関する研究

喜多 司

2022年12月

大阪大学大学院工学研究科

目次

1	緒言	3
2	港湾構造物の点検診断における現在の課題	5
2.1	港湾構造物の維持管理・更新についての考え方	5
2.2	港湾における水中部の点検方法	6
2.3	点検作業での課題	7
2.4	潜水作業の人員確保の困難化	8
2.5	まとめ	9
3	先行のロボットによる港湾構造物の点検手法	10
3.1	UAV による用いた気中部の点検事例	10
3.2	ROV による非 GNSS 環境下での点検事例	10
3.3	AUV による調査・点検事例	12
3.4	まとめ	14
4	ロボットの要件検討	17
4.1	運用方法の検討	17
4.1.1	想定する作業方法	17
4.1.2	想定する構造物	18
4.1.3	投入揚収方法の検討	19
4.2	運用方法による制約条件の検討	21
4.3	ハードウェア構成の検討	23
4.3.1	コンセプトの検討	23
4.3.2	無索化の検討	24
4.4	ソフトウェア構成の検討	27
4.5	センサの選定	27
4.5.1	水平位置計測手法の検討	27
4.5.2	垂直位置計測手法の検討	29
4.5.3	方位計測手法の検討	29
4.6	まとめ	29
5	水中ロボットの製作	31
5.1	ベースマシンの選定	31
5.2	ハードウェアの構築	33
5.2.1	コンピュータの選定	33
5.2.2	センサの選定	34
5.2.3	実装	40
5.3	ソフトウェアの構築	44
5.3.1	直立壁面型構造物の点検を想定した距離計を用いた自律航行制御	45
5.3.2	直立壁面型構造物の点検を想定した車輪を用いた自律航行制御	47
5.3.3	杭型構造物の点検を想定した自律航行制御	48
5.4	まとめ	49
6	水槽試験の実施	52
6.1	性能確認試験の実施	52
6.1.1	方位計測のためのセンサの性能確認	52
6.1.2	水圧計の精度確認	55

6.1.3	DVL の精度確認	55
6.2	パラメータチューニング	57
6.2.1	概要	57
6.2.2	結果	58
6.3	水槽試験	66
6.3.1	対地速度計と超音波距離計を用いた 直立壁型構造物を対象とした自律航行試験	66
6.3.2	車輪を用いた直立壁型構造物を対象とした自律航行試験	70
6.3.3	杭型構造物を対象とした自律航行試験	75
6.4	まとめ	76
7.	実海域試験	78
7.1	試験の実施	78
7.2	試験の結果	79
7.3	実海域での運用の課題	80
7.3.1	海面の浮遊物の巻き込み	80
7.3.2	波による機体傾斜の影響	80
7.3.3	課題への対応	80
7.4	まとめ	81
8.	結言	82
	謝辞	85

1. 諸言

近年、港湾構造物の老朽化が進み点検診断の要請が高まる一方、その水中部分の点検を実施する潜水士が減少している。そこで一部の作業に対し、水中ロボットを用いた点検が導入され始めたが、水平位置が確認できない中での操縦には熟練した作業者が必要となり、普及の妨げとなっている。本研究では、港湾構造物の点検作業に対する作業者の熟練度に依らない方法として、自律型水中ロボットによる港湾構造物水中部の点検法の開発を目指した。

2 章では港湾施設の点検の現状を調査・整理し、本研究の背景を示した。水中ロボットによる点検が今後さらに有用となることを示すため、これまでの港湾構造物の維持管理の歴史的変遷と統計データ等に基づいた点検作業の需要増加と潜水士減少による作業者不足の将来予測を示した。これにより潜水士の作業を代替する手段の必要性を示し、その候補として水中ロボットが有望であることを示した。

3 章では水中ロボットの先行研究事例を収集し、現在の港湾点検に利用されている水中ロボットについて調査した。その結果、機体自身の水平位置を計測せず遠隔操作で運用されるものが多く、操縦が作業者の熟練度に依存すること、その運用にも潜水士による作業と同程度の陸上作業員が必要であることがわかった。別に、他の水中ロボットの水平位置計測法を調査したところ、港湾での水中ロボットの利用に適用できる水平位置計測法として、構造物との相対位置関係を計測し使用する方法があり、この方法を本研究でも採用することとした。これらより、少人数で運用でき、計測した位置情報を基に自律航行する小型・軽量な水中ロボットを開発すべきことを示した。

4 章では、水中ロボットの運用方法、仕様の検討を行い、過去事例とその課題を参考に作業手順等を決定した上で、作業性の観点から水中ロボットの大きさと重量の具体的な設計方針を示した。調査した運用上の課題解決のために、ロボットを無索化が必須であること、実運用時の故障時等への対応の確保の観点から、市販の水中ロボットをベースマシンとし、その内部は改造しないこと、自律航行機能を付与した外部モジュールをベースマシンに取り付けられる構造とした。同様の理由で、自律航行プログラムは、ベースマシンやそのファームウェアのバージョンに関わらず利用できるようにした。

5 章では、実際の水中ロボットの製作について述べた。まず、検討結果に沿った計測機器の選定を行い、ハードウェアの実装を行った。その後、自律航行制御プログラムについて3種類の手法を設計し実装した。これらは、直立壁面型構造物の点検を想定した距離計、あるいは、車輪を用いた自律航行制御、および、杭型構造物の点検を想定した自律航行制御である。

6 章では、前章で製作した水中ロボットに対して水槽試験を実施し、結果をまとめた。まず、選定したセンサの水中性能確認試験を実施し、これらが自律制御に利用できることを確認した。次に、これらのセンサを水中ロボットに適用し、前章で示した自律航行制御を実施した。その結果、距離計を用いた自律航行制御、杭型構造物の点検を想定した自律航行制御で目視点検が可能な自律航行ができることを確認した。ただし、航行中に機体が傾斜し、計画経路に対し蛇行が発生することが確認された。一方、車輪を用いた自律航行制御では、壁面の段差等があった場合に作業継続ができなくなる可能性が判明した。実際の港湾構造物では、壁面の凹凸により調査困難となる可能性が高く、車輪を用いた方法を適用することは困難であると結論付けた。

7 章では、実海域における実機試験を実施した結果をまとめた。ブロック式係船岸壁を対象として、距離計を用いた自律航行制御により自律航行を実施したところ、水槽試験と同程度の誤差で航行できることがわかった。これより、実海域でも開発した水中ロボットが港湾構造物水中部の点検に適用できることが示された。一方、課題として水面の浮遊物がスラスタに挟まること、水面では他船舶の航跡波で機体が大きく傾斜し、対象物の計測ができない場合があることがわかった。

8 章では、以上の研究内容をとりまとめ、小型・軽量な自律型水中ロボットによる港湾

構造物水中部の点検は可能であると結論付けた.

2. 港湾構造物の点検診断における現在の課題

2.1 港湾構造物の維持管理・更新についての考え方

日本では、高度経済成長期に集中的に整備されたインフラ施設の老朽化が急速に進行していることが課題となってきた。港湾の施設においては、その設計供用期間は標準的に 50 年間に設定されている。2017 年時点で当時供用されていた施設の建設年度毎の数を図 2.1 に示す。2017 年当時供用中の施設のうち建設後 50 年を経過しているものの割合は、2018 年には 18%，2023 年には 28%，2033 年には 52%となる見込みである¹⁾。

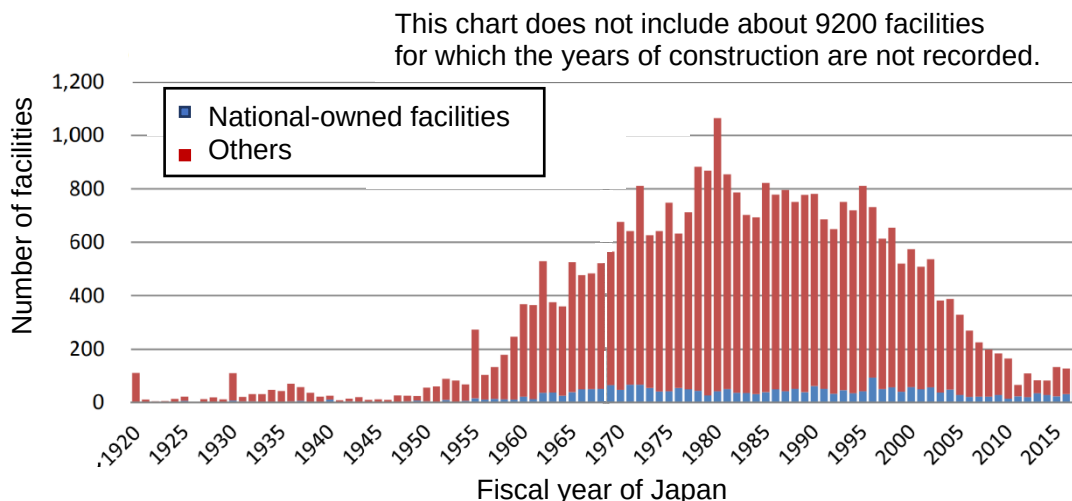


図 2.1 港湾施設の建設年度別施設数（2017 年度集計，母数約 44,000 施設）

次の出典の図を筆者が英語に翻訳，一部の記載を削除した。

出典：参考文献¹⁾

インフラ施設の老朽化が進み，維持管理更新にかかわる経費が大幅に増大する状況下で，LCC（ライフサイクルコスト）を削減のため，従来の「事後保全」型維持管理から「予防保全」型維持管理へ考え方が転換された（図 2.2）。なお，国土交通省は「事後保全」とは，「施設の機能や性能に不具合が生じてから修繕等の対策を講じること。」，「予防保全」とは「施設の機能や性能に不具合が発生する前に修繕等の対策を講じること。」と定義している。

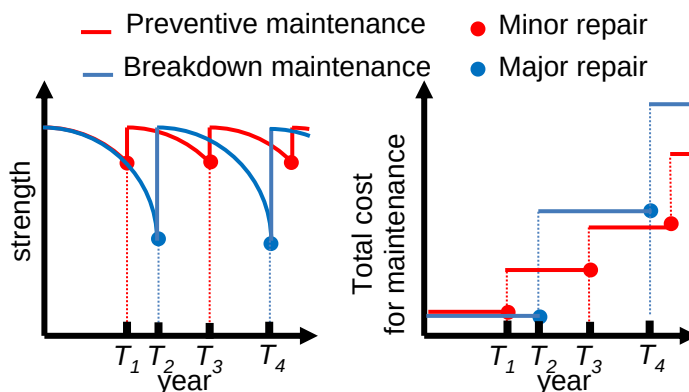


図 2.2 予防保全型維持管理の考え方

2018年には国土交通省が、港湾も含めた国土交通省所管12分野の施設のうち、国や地方公共団体等が管理する施設を対象にLCCの試算を実施している。2018年の維持管理更新費用5.2兆円に対し、2018年から2048年までの30年間、インフラ構造物の維持管理更新を「事後保全」で実施した場合、2048年度の維持管理更新費用が国全体で1年当たり最大12.3兆円、一方、「予防保全」で実施した場合は1年当たり最大6.5兆円で、「事後保全」で実施した場合に比べ費用が約5割に縮減されると示している²⁾。

しかし、「予防保全」で実施した場合でも、2048年度の維持管理更新費用は現在のそれに比べ最大1.3倍となる。維持管理更新の作業量自体もその費用と同様に増加すると考えられる。

制度の変更として、港湾では、2007年に「港湾の施設の技術上の基準を定める省令」等が改正され、港湾施設の計画的かつ適切な予防保全型維持管理が推進されるようになった。2013年に改正された港湾法により「技術基準対象施設の維持は、定期的に点検を行うことその他の国土交通大臣が定める方法により行うこと」と規定された。それに伴い、「港湾の施設の技術上の基準を定める省令」及び「技術基準対象施設の維持に関し必要な事項を定める告示」が改正され、点検診断の方法の明確化が規定された。

これらを踏まえ2014年には、港湾局により「港湾の施設の点検診断ガイドライン」が作成され、技術基準対象施設における点検診断の基本的な考え方や、標準的な点検診断項目、判断基準、点検方法、実施頻度などが取りまとめられた。

2.2 港湾における水中部の点検方法

「港湾の施設の点検診断ガイドライン」の中では、施設の設置者（主に国）が点検診断の時期、対象とする部材及び方法等を定めた点検診断計画を定めることが標準とされている。一方、点検診断は、建設後に引き渡された施設を管理する管理者（主に地方公共団体）が実施する^{3),4)}。

点検診断計画で定める点検診断の種類には初回、日常、定期、臨時点検診断がある。

初回点検診断は、新設の場合、建設直後、あるいは改良後2年以内に行われることが望ましいとされている。方法は、後述の詳細定期点検診断と同様である。

日常点検は、日常的なパトロール等にあわせ実施され、目視により、大規模な変状や、施設利用上で支障となるものを発見するために実施される。

定期点検診断は点検診断計画に定められた期間ごとに行われる。点検内容で、一般定期点検診断と詳細定期点検診断に分かれる。一般定期点検診断は、5年（旅客施設や耐震強化岸壁、主要な航路に面する構造物などの重点点検診断施設は3年）以内に1回行う必要がある。対象は港湾施設の気中部で、陸上、海上からの目視により部材毎の変状を計測、記録することが標準とされる。一方、詳細定期点検診断は、それらの場合、供用期間中の適切な時期に1回、（主要な航路に面する重点点検診断施設では10年以内に1回、）および、供用期間延長時に1回、実施することが求められている。詳細点検診断では、水中部の点検も実施される。

この水中部の点検は従来、潜水士によって実施されてきた。点検内容は、主に目視による変状の調査である。他に鋼材の肉厚測定や、電気防食工の陽極の残存量測定などがある。例えば、図2.3のような係留施設の1つの構造形式である矢板式岸壁では、水中部の目視により、鋼矢板に腐食、き裂、損傷、開孔等の変状がないかを調査する。開孔がある場合には鋼矢板背後の裏埋材が流出し、天端面の陥没につながる恐れがある。変状図を作成する場合には、その表面に付着している貝等の海生生物等をケレン等で除去したうえで、腐食等の状況を写真撮影もしくはスケッチする。

臨時点検診断は、地震時や荒天時等の異常時の直後に行われる。方法は定期点検診断に準ずる。

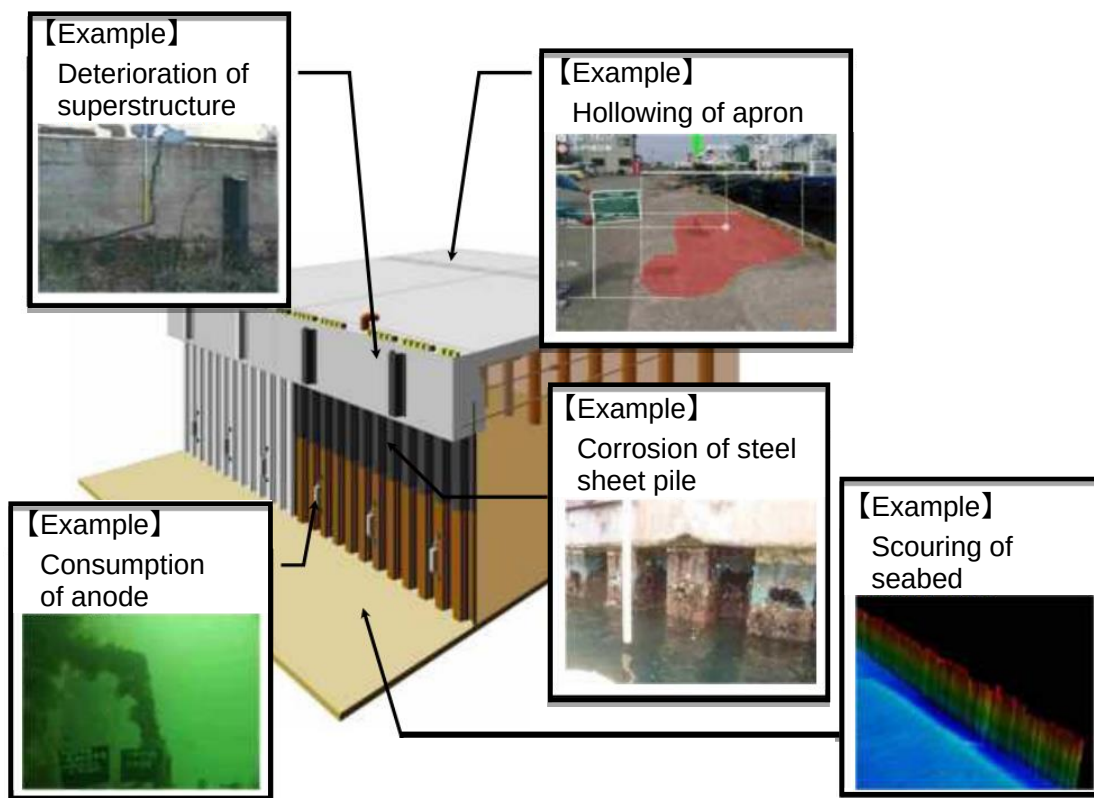


図 2.3 矢板式岸壁の変状の例
 次の出典の図を本筆者が英語に翻訳，図中の配置を変更した。
 出展：参考文献⁴⁾

2.3 点検作業での課題

点検作業を実施する中で課題となるのが，現地での作業時間を確保することである．港湾に限らず，点検をしている最中，そのインフラ施設は供用を停止もしくは制限することが多い．例えば，道路であれば，道路を通行止め，もしくは車線規制を行い，点検を行う．港湾の場合は，代替施設がないことや，日夜を問わず利用があることから，点検のために供用を止めることはできない．現実には，船舶が着岸していない合間の時間で点検作業を実施している．

ボートや潜水土による海からアクセスする作業では，作業場所が狭小である場合が多く，荒天時だけでなく，航跡波や潮位で安全確保が難しい場合にも点検作業が制約される．そのため，作業者の待機時間が多く発生しやすい．これが，作業効率を低下させている^{例え5)}．

現地作業自体は短時間で広範囲の作業を実施する技術や潮位などの影響を受けにくい点検技術が要望されている．

更に，地震など災害時には，水中部の確認ができないことも課題となっている．港湾BCP（Business Continuity Plan：事業継続計画）では，発災後 48 時間以内での使用可否判断を行うよう規定されている場合が多い^{例え6),7)}．その段階では，航路啓開と同時並行となるケースも多く，漂流物に対する潜水作業の安全が確保できない．潜水土の手配が間に合わないことも想定される．そのため，これまでは陸上部の変位のみから構造物の状態を推定し，使用可否判断を実施していた^{8),9)}．

例えば矢板式係船岸壁の場合，図 2.4 のような 2 つの変状モードが考えられる¹⁰⁾が，陸上部の点検のみではこれらを区別出来ない．近年も，それにより，実際には耐力を失った構造物を安全と判断することを懸念し，BCP に使用可否判断のための調査として水中部の状態把握を盛り込もうとする検討が見られる^{例え11)}が，先に述べた課題は解決していない．

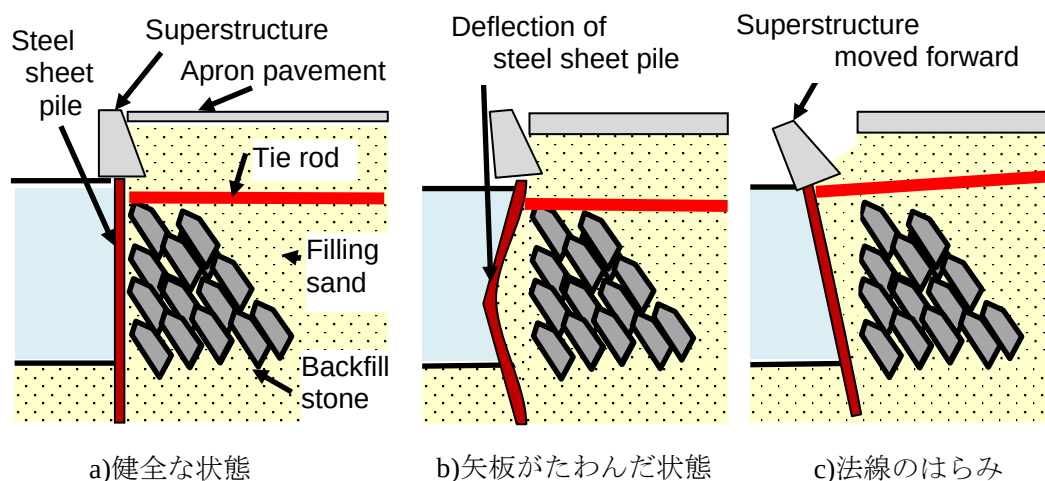


図 2.4 地震発災時に生じた矢板式係船護岸の変状の例

2.4 潜水作業の人員確保の困難化

現在、潜水士の人口が減少しており、その傾向は今後も続くと考えられている。これは、潜水士の高齢化による引退が、新規参入し継続する若手潜水士の人口を大きく上回る傾向が長期的に続いているためである。日本潜水協会の推計によれば、平成 28 年度時点で、港湾整備、サルベージ、船舶修繕などを行う潜水士は図 2.5 の様に約 3300 人とされている¹²⁾。そのうち、当時 51～60 歳の潜水士は 950 人程度であった。一方、21～30 歳の潜水士は 400 人程度である。潜水士が全員 60 歳で引退すると仮定し、30 歳以降に参入する潜水士を考慮しなければ、潜水士数は 1 年で 1.7% の減少傾向にあり、減少傾向は継続していると考えられる。

加えて、近年の船舶の大型化に伴い、港湾が大水深化している。作業深度が深くなると、潜水病対策で、1 回の作業時間が短くなり、陸上待機の時間も長時間化する。しかも、深部では光量が減少し、作業自体も困難になる。

維持管理点検の作業量の増加が想定される一方で、作業者が減少する中、新技術の導入による作業の効率化が求められている。例えば、「港湾の施設の点検診断ガイドライン」でも「点検診断においては、効率性、客観性を重視し、新技術の活用を積極的に検討することが望ましい。」と示されている。そこで近年、水中ロボットを用いた点検診断が進んでいる。

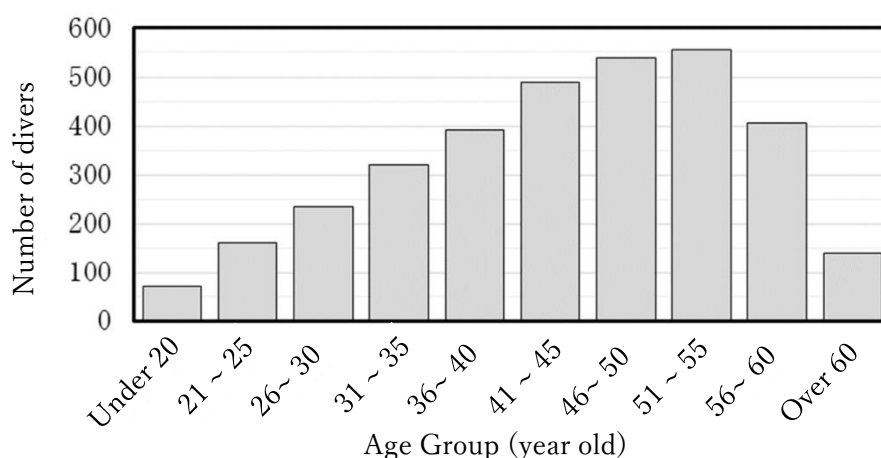


図 2.5 年齢層別職業潜水士数（日本潜水協会推計値）（2016 年 10 月 31 日時点）

次の出典の図を筆者が英語に翻訳した。 出展：参考文献¹²⁾

2.5 まとめ

インフラ構造物のライフサイクルコスト削減のために、点検の要望が高まっている。設計時の供用年数を超える構造物が増え、老朽化が進む中、点検の需要は今後も増大していく。災害の甚大化が進み、被災後の構造物水中部の点検についても要望が上がっている。一方、港湾での点検を実施する潜水士数は減少している。これらの理由で、構造物水中部の点検には、潜水士の作業の一部代替や作業効率向上のために水中ロボットなどの新技術を活用することが期待されている。

参考文献

- 1) 国土交通省：社会資本に関する実態の把握，第20回メンテナンス戦略小委員会（第3期第2回） 配付資料，参考資料 1，2018，<https://www.mlit.go.jp/common/001231388.pdf>, 2022-11-5 参照.
- 2) 国土交通省：予防保全型のインフラ老朽化対策の推進，2020/11/10, <https://www5.cao.go.jp/keizai-shimon/kaigi/special/reform/wg6/20201110/pdf/shiryou1-1.pdf>.
- 3) 国土交通省港湾局：港湾の施設の点検診断ガイドライン【第1部 総論】，2021.
- 4) 国土交通省港湾局：港湾の施設の点検診断ガイドライン【第2部 実施要領】，2021.
- 5) 一般社団法人 日本建設業連合会：海洋・港湾構造物の維持管理・リニューアル技術調査研究報告書（2014年度），
https://www.nikkenren.com/publication/fl.php?fi=395&f=kaiyou_2014_01.pdf, 2022-10-13 参照.
- 6) 神戸港港湾 BCP 協議会：神戸港港湾事業継続計画（神戸港港湾 B C P）【改定版】，2021, <https://www.city.kobe.lg.jp/documents/10791/bcp01.pdf>，2022-10-13 参照.
- 7) 大阪港港湾 BCP 協議会：大阪港の港湾事業継続計画（大阪港 BCP）第6版～海溝型地震編～，2022, <https://www.city.osaka.lg.jp/port/page/0000348325.html>，2022-10-13 参照.
- 8) 菅野高弘，野末康博，塩崎禎郎，小浜英司：地震による岸壁の被災・復旧工法・耐震補強工法，港湾空港技術研究所 資料 No.1145, 2006.
- 9) 加辺 圭太郎，蛭川 愛志，曾根 照人，山本 龍，高岡 慶人，服部 俊朗，平間 仁，丸山 晴広：FLIP 解析を活用した矢板式係船岸の使用可否判定方策の検討，沿岸技術研究センター論文集 No.19，2019.
- 10) 大霜 和倫，安武 輝征，鬼童 孝：大規模地震時における係留施設の使用可否判定手法について，九州国土交通研究会，2022.
- 11) 大阪港 BCP 協議会：第5回大阪港 BCP 協議会 資料4 大阪港 BCP 事前対策項目 被災点検項目の設定について，2019/2/12, https://www.city.osaka.lg.jp/port/cmsfiles/contents/0000470/470519/04_siryou.pdf, 2022-10-13 参照.
- 12) 日本潜水協会：潜水士後継者育成・技術伝承基本方針，2017，<https://www.sensui.or.jp/library/55dc15e00229f781140004d7/59b8edf7300eac8e23e7f39e.pdf>，2022-10-13，2022-10-13 参照.

3 先行のロボットによる港湾構造物の点検手法

これまでもロボットを港湾構造物の点検作業に適用した例はそれなりの数が散見される。ここではこれらを概観する。

3.1 UAVを用いた気中部の点検事例

港湾施設の気中部の点検に UAV (Unmanned Aerial Vehicle : 無人航空機) が用いられている。港湾でも点検の方法は目視による変状の確認が代表的である。人が陸上から見える部分は、当初は人手で点検が行われていた。現在ではドローンと呼ばれる UAV の活用が進んでいる。例えば、Henriques らは、捨石式傾斜堤が機能を保持しているか調査するため、防波堤の形状を飛行ドローンで写真測量した¹⁾。その他にも、海岸堤防や護岸の計測を行った事例もある^{2) - 4)}。また、グリーンレーザを搭載した UAV を用いて、消波ブロックの形状計測を行った事例もある⁵⁾。UAV は屋外では、GNSS (Global Navigation Satellite System) による水平位置測定を活用した自動航行が可能でその利活用が急速に進んでいる。

3.2 ROVによる非 GNSS 環境下での点検事例

暗渠内や水中では、GNSS では、電波が遮断されるか、あるいは減衰し、位置計測が実施できない。他に汎用的な位置計測手法が構築されておらず、ロボットは、自動航行ができない。そのため、ROV (Remotely Operated Vehicle : 遠隔操作型ロボット) がこの作業に用いられることが多い。

暗渠内での点検の事例では、ボート型のロボットが遠隔操作で栈橋上部工下部に進入し下面の写真を撮り、事後に写真から点検診断を行うシステムが開発されている⁶⁾。このロボットは無線 LAN を介した遠隔操作を実施している。水平位置は計測しておらず、操縦者が、その位置をロボットに搭載されたカメラを通して確認しながら操縦する。

同様のロボットで、レーザレンジファインダを用い構造物との相対位置を計測することで、現在位置を推定する手法が提案され実現場で使用されたケースがある⁷⁾。この方式を水中に利用しようとした場合には、濁りや減衰でレーザレンジファインダが使用できず適用ができない。

港湾構造物の水中部の点検での水中ロボットの利用では、搭載されたカメラの映像で操作する方法が主流である。市販の小型のホバリング型 ROV を用いた点検実施の事例として、港湾の係船栈橋、岸壁の点検事例がある^{例えば 8), 9)} (図 3.1)。これらの手法でケレンなしの目視調査を実施する場合、潜水士の従来方法では 1 日に点検可能な面積が 1200m^2 であるのに対し、ROV では 1800m^2 の点検が実施できたという報告があり、作業効率の向上の可能性が示されている。

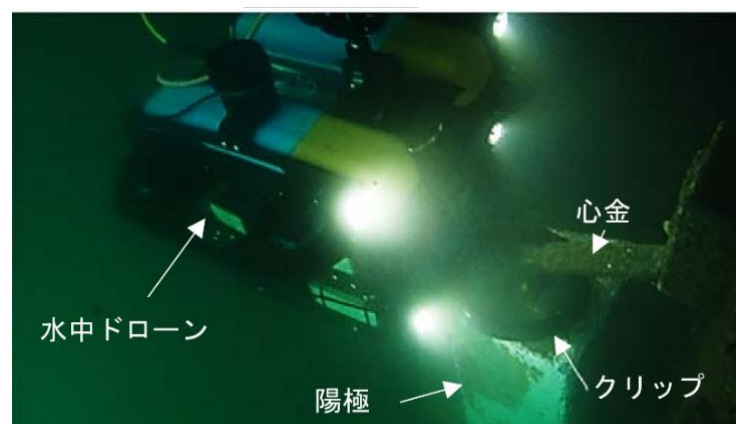


図 3.1 小型 ROV (長さ 0.46m, 質量 18kg) による港湾構造物点検作業の事例

出典：参考文献⁹⁾

ところが、濁った水中では、作業効率が大幅に低下することが懸念されている。濁った水中では、機体の水平位置を把握することは困難であるし、海上からは機体が見えない。機体に搭載されたカメラからは、構造物に接近しないと構造物との位置関係を把握することができない。検査の観点からは、水中カメラに映る構造物を一度見失うと、再び見つけることが困難である。構造物を見つけたとしても、単調な繰り返し構造であるため、以前と同じ場所なのか、他の場所なのか確認できない。加えて、横に移動した場合にも構造物に特徴がないために移動したこと自体を把握することが困難である。よって、水面で機体の水平位置を確認した後、構造物を見失うことなく、機体が大きく横に移動することなく操作できる習熟した操作者が必要となる。

その対策事例としては、構造物天端から重りをつけた蛍光ラインやテープを下ろす"下がり"を設置して、それを頼りに位置を保持する方法がよく見られる。この運用方法で断続的に作業を実施するには、水中ドローンの遠隔操作に必要な人員である操縦者、記録者、ケーブルの取り回しを行う作業員 1 名以上の計 3 名の他に、下がり进行管理する作業員が必要となり、人員が多く必要となる。なお、現場条件次第でこの他に陸上監視員や海上監視船が必要となる。さらにケーブルの引っ掛かり対策などで、通常時、潜水士が陸上作業に参加し、緊急時にその潜水士が水中ロボットを回収することが提案されている。このような場合でも潜水士の水中作業時間が短縮され、身体的負担や、作業時間の制限が緩和されるため、潜水士の不足している状況を改善する効果が期待される。

運用の人員を抑えながら、濁りなどに関係なく点検を実施するためには、ロボット自身が水中でも何らかの方法で機体の位置を計測する必要がある。さらに、これらのロボットの運用には、前述のように多数の人間が必要であるが、これらのロボットの運用ができる人員は限られている。これらの点検を提案実施している企業では、基本的に機器のみの貸し出しは行わず、専門の技術者をあわせて派遣する形で業務が実施されている^{例えば 10)}。そのため、水中構造物点検作業に対するロボットのさらなる利用の拡大のためには、部分的、あるいは、全体が自動化された水中ロボットシステムが必要となる。

部分的に自動化された水中ロボットによる点検の事例として、ダムの堤体部分のひび割れなどの変状の有無を検査する自動制御を組み込んだ遠隔操作型の水中ロボットがある。ダムの作業は作業箇所の深度が深く、潜水士による作業では、作業時間が大きく制限されるため、ロボットによる作業効率向上への寄与が大きいこと、放流口などで、潜水士が吸い込まれる事故が懸念されるため、要望が特に多く、港湾点検に比べ開発、導入が先行している。例えばパナソニック株式会社が開発を行っているロボット¹¹⁾はソナーを 4 つ用いて、構造物との相対距離、相対姿勢を計測し、自動で姿勢制御を実施する機能を有している(図 3.2)。

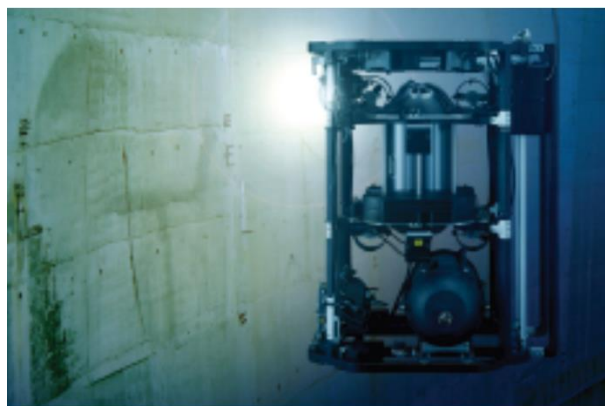


図 3.2 ダム点検ロボット(高さ 0.68m, 質量 約 40kg)の作業イメージ

出典：パナソニック ソリューションレポート：ダム点検 水中 ROV 点検サービス、
<https://content.connect.panasonic.com/jp-ja/fai/file/4725>, 2022-11-05 参照。

水平位置計測は 6 軸慣性センサの計測値の積分、垂直位置は深度センサで計測をしている。それに加え、カメラで撮影した構造物の画像からオプティカルフローにより移動量を計測し補正を行っている。これらの自動制御によりロボットの操縦を簡易化することで、作業者の習熟の必要性が軽減される。

この事例の中に挙げた慣性航法は単独での位置計測が可能なシステムであるが、ジャイロ等で計測した加速度を二階積分するため、測定誤差が時間経過とともに蓄積される。単独の慣性航法で精度の高い位置計測を実施するには、システム全体が数千万円程度のオーダーで高価となることや、電源入力後、安定化までに時間がかかること等が課題として指摘されている^{例えば 12)}。

3.3 AUV による調査・点検事例

AUV (Autonomous Unmanned Vehicle : 自律航行型ロボット) は一般に、事前もしくは音響通信等で指示を受け、自律航行を行う種類のロボットである。自動化する上で必要となるのが、水中ロボットの位置を計測する方法である。

AUV による調査の事例はパイプラインなどで多く見られる^{例えば 13)}。川崎重工株式会社製の SPICE¹⁴⁾は慣性航法装置により機体のおおよその位置を把握しパイプライン近傍まで移動し、その付近ではソナーによってパイプラインとの詳細な位置関係を計測して接近し検査を実施している (図 3.3)。

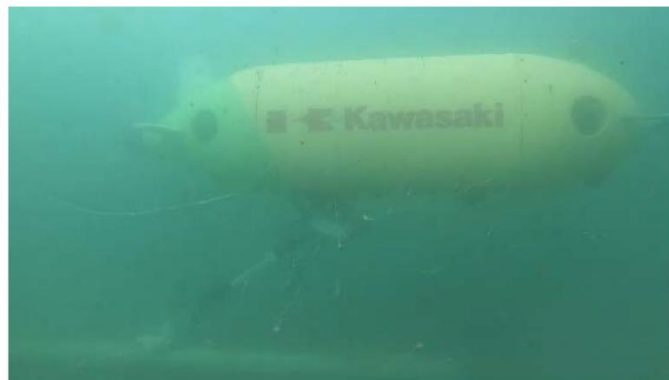


図 3.3 SPICE (長さ 5.6m, 質量 2.5t) の作業実施状況

出典：参考文献¹⁴⁾。

AUV は海底電力ケーブルの調査でも利用されている。KDDI 株式会社の Aqua Explorer 2 は、ケーブルを流れる電流で発生する磁界を計測することで、ケーブルとの相対位置関係を計測している。

さらに、研究として実施された港湾構造物の点検作業の事例でも AUV が用いられた事例がある。東京大学の開発していた Tri-Dog1 を用いて、防波堤水中部の画像撮影が行われた (図 3.4)。この時、Tri-Dog1 は対地速度を計測する DVL (Doppler Velocity Logger) と角加速度を計測する FOG (Fiber Optical Gyro) を組み合わせて、移動量を計測している。加えて、シートレーザとビデオカメラを組み合わせた装置で、構造物の形状を光切断法により計測し、構造物に対する相対距離と相対方位を計測している。これらの手法と深度を計測する水圧計などの計測値をパーティクルフィルタで統合し、機体の位置を計測している¹⁵⁾。

その他に、研究として、三菱重工株式会社が海底地形をマルチビームソナーで計測し、事前に計測された地形と照合することで、地図上の位置を計測する手法の提案、海域試験も実施している¹⁶⁾。

さらに，洞窟などでの作業を想定した AUV も開発されている．SUNFISH, Inc.の AUV は，マルチビームソナーの計測データを用いた SLAM (Simultaneous Localization and Mapping)により，周辺地形のマッピング及び相対位置の計測を実施している¹⁷⁾ (図 3.5) ．



図 3.4 Tri-Dog1 (長さ 2m, 質量 200kg) の運用状況の例

出典：東京大学生産技術研究所 巻研究室 設備 HP,
<http://makilab.iis.u-tokyo.ac.jp/equipment/>, 2022-11-05 参照.



図 3.5 SUNFISH (長さ 1.61cm, 質量 50kg) の運用イメージ

出典：SUNFISH, Inc. HP, <https://sunfishinc.com/>, 2022-11-05 参照.

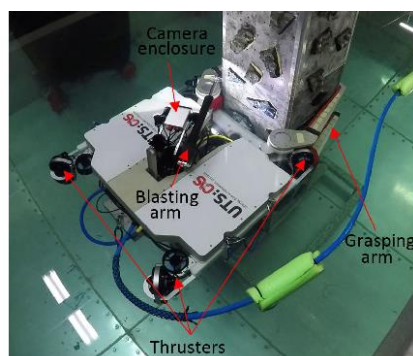


図 3.6 SPIR の試験実施の状況

出典：参考文献¹⁸⁾.

加えて、杭を対象として、構造物にアームで取り付け、極近傍から写真撮影等の作業を行う自律型水中ロボットが開発されている。例えば、シドニー工科大学では、SPIR というロボットを開発している（図 3.6）。ケーブルが付いているが、点検作業自体は自動化されているため、本項に記載した。水中移動時、このロボットは IMU、磁気方位計、音響測位装置を組み合わせて位置計測を実施し、杭に接近する。次に前方のアームで杭に取り付け、その後、ステレオカメラで Visual SLAM を実施し、杭との相対位置を計測しながら作業を実施する¹⁸⁾。

日本国内の港湾施設では、現場条件によるが、鋼管杭は直径 1m 程度のものが多く、一般的なスパイラル鋼管の規格品は外径 400~2500mm¹⁹⁾である。ロボットもそれに合わせた大きさにすると考えると、最も細い杭に対応する場合にも幅 60cm 以上、それに伴い重量も数十 kg 以上となることが想定される。

以上のように、構造物の点検を目的として自動化された水中ロボットの事例は、海中のランドマークや構造物との相対位置を計測する方法が採用されるケースが多くみられることがわかる。

他に、AUV は海底の地形等の調査でも用いられている。最先端の水中ロボット技術を擁する世界各国のグループが参加した海底地形調査の精度や実施面積を競う競技会である Shell Ocean Discovery XPRIZE²⁰⁾では様々な AUV が使用された。例えば日本から参加した Team KUROSHIO は、海上の ASV(Autonomous Surface Vehicle)と海中の複数の AUV を組み合わせて海底地形調査を実施した²¹⁾。AUV にはソナーが搭載されており、船舶に比べて海底に近い位置から調査を行うことで計測精度を向上させる。この際、ソナーの調査結果を統合するためには、AUV の位置を計測する必要がある。位置計測は USBL(Ultra Short Base Line)を用い実施された。USBL は音波による三角測量を行い、座標が既知の点に設置される基地局と水中の移動局の相対位置を計測する手法である。このケースでは基地局は ASV に設置され、その座標は GNSS で計測された。

従来の USBL は深海域での使用を想定して設計されてきたため、港湾では、海底や海面、構造物からの音波の反射（マルチパス）による計測精度の低下や、構造物の影に入った際に計測できないなどの課題があり、本検討の用途には適さないことが従来から指摘されている^{例えば 22)}。

3.4 まとめ

港湾構造物の点検に用いられる水中ロボットについて先行事例の調査を実施した。その結果、現在、港湾構造物水中部の点検に主に用いられている有線遠隔操作型の ROV には、次の課題があることが判明した。

- ・操縦者の習熟が必要。
- ・水平位置が計測できない。

そこで、港湾構造物水中部の点検を目的としたもの以外も含め、ロボットの機体の位置を推定する手法について調査した。その結果、ロボットの位置推定手法には、以下のようなものが適用されていることがわかった。

- ・ UAV, ASV : GNSS を用いるもの。
- ・ ROV : カメラ映像から操縦者が推測し操縦するもの。（現状）
構造物との相対位置関係を計測するもの。
- ・ AUV : 構造物との相対位置関係を計測するもの。
音響測位装置と用いるもの。

このうち GNSS、音響測位装置は本検討の目的には適用が難しいことが先行検討で示されていた。そこで、本研究でも、構造物との相対位置関係を計測する水中ロボットを港湾

構造物水中部の点検に用いることを提案することとした。

先行事例では、構造物との相対位置を計測する水中ロボットの中で、作業員 1 人で投入揚収が可能なものを確認できなかった。つまり、港湾構造物上から人力で投入することが困難で、投入のために船舶、もしくは、クレーン車が必要となる。そのため、運用コストの増加が想定される。加えて、大型のロボットは導入費用も高額になる。

一般に港湾工事、調査で新技術が導入される場合には、既存手法よりも価値がある成果が求められる。もしくは、既存手法と同等か、施設利用等に問題がない成果が達成され、かつ、既存手法に比べ能力当たりの費用が安いことが求められる。

水中ロボットによる点検の成果は、写真や計測値など、後から確認や比較が可能な客観的な成果を残すことができるなどの定性的な効果は認められているものの、それらの金銭的な価値は示されていない。作業員の負担軽減や潜水士不足への対応といった作業実施の観点からの有用性は認められているが、それらは成果に関与するものではない。よって、水中ロボットが港湾工事に導入されるためには、既存手法よりも費用面で優位である必要がある。つまり、作業効率が大きく向上するか、運用人員や機材を減らして費用を抑制するかを達成しなければ、利用は限定的になる。

そこで、本件では、運用人員や機材を増やさないように、機体が小型の水中ロボットを開発することとした。

参考文献

- 1) Henriques, M.J., Lemos, R, Capitão, R, and Fortes, C.J.E.M. (2017). “The monitoring of rubble mound breakwaters. An assessment of UAV technology,” Proc. 7th International Conference on Engineering Surveying - INGE02017, Lisbon, Portugal .
- 2) 水上 幸治, 白谷 栄作, 桐 博英, 関島 建志, 金子 俊幸, 大石 哲, 豊福 恒平 : UAV による海岸堤防の点検効率化のための 変状自動抽出手法, 土木学会論文集 B2(海岸工学), vol.74, no2, pp.I_1435-I_1440,2018.
- 3) 川口 真吾, 鶴田 修己, 高阪 雄一, 岡崎 裕, 朝比 翔太, 酒井 和也, 鈴木 高二朗, UAV を用いた港湾構造物の計測技術に関する検討, 土木学会論文集 B3 (海洋開発) , 2019, 75 巻, 2 号, p. I_121-I_126
- 4) 西 広人, 琴浦 毅, 堺 浩一, 今野 洋幸, UAV を用いた消波ブロックの測量手法に関する検討, 土木学会論文集 B3 (海洋開発) , 76 巻, 2 号, p. I_690-I_695, 2020.
- 5) 琴浦 毅, Sivaranjani JAYAPRASAD, 今野 洋幸, 宮作 尚宏, 堺 浩一, 間野 耕司 : 港湾事業における航空機測深技術 ALB 活用に関する検討, 土木学会論文集 B3 (海洋開発) , Vol. 75, No. 2, I_109-I_114, 2019.
- 6) Mizuno Kenichi: System of Inspection and Diagnosis for Port Structures Using Unmanned Boat, PIANC YEARBOOK 2018, pp. I_3- I_20
- 7) 田中敏成, 加藤絵万, 野上周嗣 : 遠隔操作支援機能を実装した栈橋上部工点検用 ROV の現場実証実験, 第 19 回建設ロボットシンポジウム論文集, O2-5,2019.
- 8) 大井邦昭, 三上信雄, 米山正樹, 完山暢, 岩本典丈, 古殿太郎, 坂本葉月, 中瀬聡 : 漁港施設水中部の点検効率化に向けた水中ドローンの活用方法と適用性について, 土木学会論文集 B3 (海洋開発) ,78 巻, 2 号, 2022
- 9) 野上周嗣, 加藤絵万 : 水中ドローンを利用した港湾構造物の調査に関する検討, 港湾空港技術研究所資料, No.1380, 2020
- 10) 国土交通省港湾局 : 港湾の施設の新しい点検技術 カタログ (案) , 令和 4 年 3 月
- 11) 九郎丸 俊一, 中西 清史, 久保 聖治, 海老名 明弘, 江澤 弘造 : 自律制御による姿勢安定航行型ダム点検ロボットと損傷解析システム, パナソニック技法, vol. 64, No. 1, pp.48-53, 2018.
- 12) 東京大学海洋アライアンス HP, <https://www.oa.u-tokyo.ac.jp/researcher-story/028.html>,

- 2022-11-05 参照.
- 13) Yin, Fangrui: Inspection Robot for Submarine Pipeline Based on Machine Vision, Journal of Physics: Conference Series, 2021.
 - 14) 湯浅鉄二: AUV SPICE-1 北海にチャレンジ, 第 6 回海中海底工学フォーラム・ZERO, 2021, <https://seasat.iis.u-tokyo.ac.jp/UTforum/UTforumzero06/6-6.pdf>, 2022-11-5 参照.
 - 15) 巻 俊宏, 近藤 逸人, 浦 環, 能勢 義昭, 坂巻 隆: 自律型水中ロボットによる人工構造物の観測, 日本船舶海洋工学会論文集 1 (0), 17-26, 2005.
 - 16) 長倉博, 浅野陽一郎, 秋山勝俊, 帛 田 祐 二, 阿 久 根 大 成: 水中航走体向け海底地形照合航法 技術の開発, 三菱重工技報, VOL.45 NO.4, pp74-77, 2008
 - 17) K. Richmond, C. Flesher, N. Tanner, V. Siegel and W. C. Stone, "Autonomous exploration and 3-D mapping of underwater caves with the human-portable SUNFISH® AUV," Global Oceans 2020: Singapore – U.S. Gulf Coast, 2020, pp. 1-10, 2020.
 - 18) Le, Khoa Duy, Wing-Keung To, Brenton Leighton, Mahdi Hassan and Dikai Liu : The SPIR: An Autonomous Underwater Robot for Bridge Pile Cleaning and Condition Assessment, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 1725-1731, 2020.
 - 19) 一般社団法人 鋼管杭・鋼矢板技術協会 HP, <http://www.jaspp.com/koukannkui/index.html>, 2022-11-05 参照.
 - 20) Shell Ocean Discovery X Prize HP, <https://www.xprize.org/prizes/ocean-discovery/guidelines>, 2022-11-05 参照.
 - 21) Ohki, Takeshi; Kakami, Hitoshi; Nishida, Yuya; Nakatani, Takeshi; Thornton, Blair: Development and Testing of an Unmanned Surface Towing System for Autonomous Transport of Multiple Heterogeneous Underwater Vehicles for Seafloor Survey, Marine Technology Society Journal, Volume 54, Number 5, September/October 2020, pp. 61-71(11), 2020.
 - 22) 浦 環, 巻 俊宏: 栈橋式構造物水中支持部の全自動点検手法, (財) 港湾空港建設技術サービスセンター研究開発助成報告書, 2009.

4 ロボットの要件検討

4.1 運用方法の検討

4.1.1 想定する作業方法

想定する作業は、目視調査による構造物の表面の状態の調査である。この作業は多くの水中部点検で、全体もしくは広い範囲に対して行われるため対象とした。

作業方法は、ロボットが水中を自動で移動させ、搭載された光学カメラで壁面を動画で撮影する。水中ロボットによる点検後、陸上で作業員が映像から変形の有無を確認する。変形を発見した場合、撮影時刻とロボットの移動記録を比較し、変状個所の位置を確認する。ロボットが位置計測を行っている場合の点検診断の手順のイメージを図 4.1 に示す。

一般に、適用水域では水が濁っていることが予想されるため、水中ロボットは壁に近い位置を移動して映像を撮影する必要がある。図 4.2 は、計画経路の考え方を示した図であるが、有効であると考えられる経路は、まず、構造物に沿って、ロボットは海面から海底付近まで潜行する。一定距離まで海底に接近すると上昇を開始する。海面に到達した後、撮影が完了していない部分へ横移動することである。

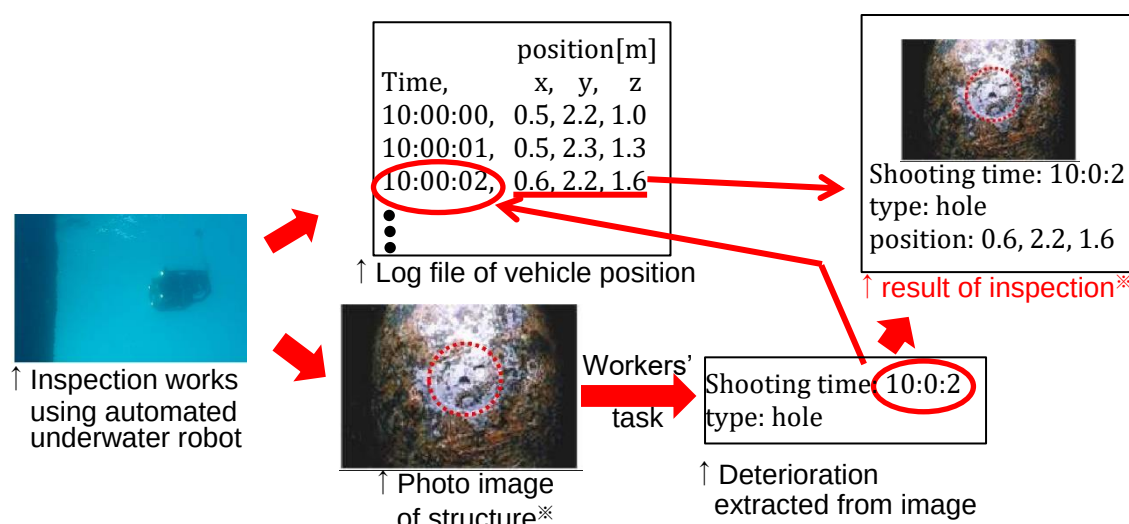


図 4.1 点検診断の手順のイメージ

※の画像の出典：国土交通省港湾局，港湾の施設の点検診断ガイドライン【第 2 部 実施要領】，2021。

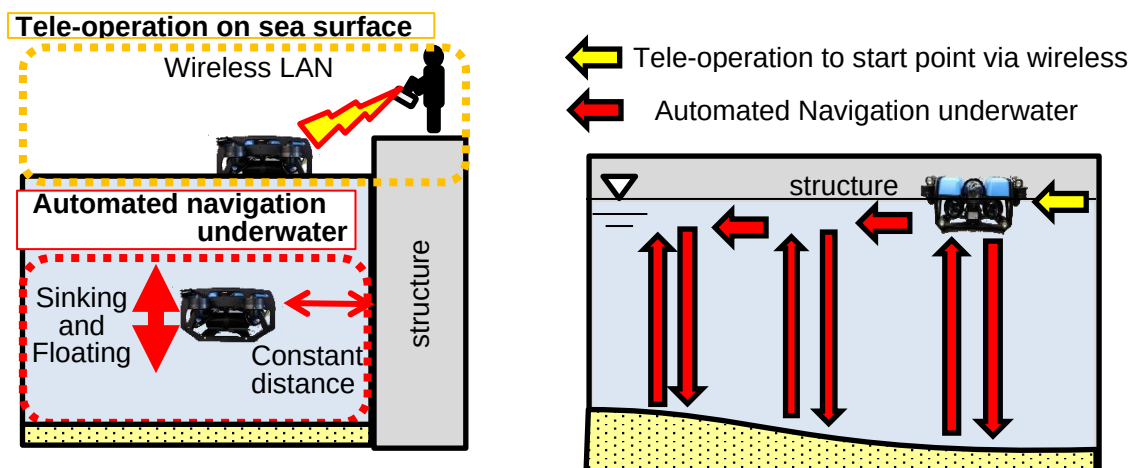


図 4.2 作業時の計画経路のイメージ (左：側面図，右：正面図)

この経路であれば、設計図面等がない突起等の障害物があった場合、潜行時にこの障害物に衝突することが想定されるが、浮上するまでの経路はすでに一度移動した経路であるため、障害物がないことが確認できており、安全に離脱が可能となる。海面だけでなく、海底付近でも水平移動した方が作業効率は上がるが、障害物への対処が複雑になるため、このような経路設定の方法を採用した。なお、移動経路の設定方法として、今回の手法と、他に、横方向に大きく移動し、その後、撮影が終わっていない高さに移動し、また、横方向に大きく移動する方法もある。今回の手法では、海面に浮上する度に大まかな位置が海上から確認できる。その時に設定位置から大きく違えば作業の中断を指示できるため、採用することとした。海底地盤の底質次第では後者を採用する必要があるが、今回の手法は潜航浮上の操作が多く、海底土砂を巻き上げ、濁りを発生させるため、海底土砂が濁りを起こしやすい現場条件では後者の方が、鮮明な写真を撮影できる。詳細については、機器選定後に決定する。

4.3.2 に検討の詳細は記載するが、構造物近傍の数十 cm のところを機体が航行する可能性があるため、ケーブルの引っ掛かりを防ぐため、ロボットを無索化するものとした。これによりロボットは水中にあるときに陸上と通信することができない。

そのために自律航行のプログラムは水中では完全自律とする。構造物との衝突防止のため、構造物壁面からの距離などを計測し、相対位置を適切に把握することとした。喪失対策については、今回は、供用を一時停止している施設の点検を想定し、喪失時にはロボットが浮き上がるように設計するものとした。

さらに、リアルタイムに映像を確認することができなくなるが、これについては大きな問題とならないと考える。点検においてリアルタイムに映像を確認できる一番のメリットは、構造物に顕著な損傷があった場合に、そこを重点的に確認できることである。しかし、水中構造物は表面に生物付着などがあるため、リアルタイムに映像を確認できるかどうかにかかわらず、ロボットだけでは詳細な状況は把握できない。詳細な状況を把握するには、潜水士が損傷個所に移動し、付着物をケレンし、構造物自体を目視する必要がある。

開始位置までの移動は遠隔操作で行うものとした。本件で想定する現場は水面では、見通しが良い。ロボットが水面にあるとき、機体を目視することで位置推定ができる。また、無線 LAN などを経由した無線通信も遮蔽されにくい。そこで、水中ロボット側に無線 LAN アダプタを搭載し、水面では、無線通信による遠隔操作を行うこととした。

4.1.2 想定する構造物

対象とする構造物の形式は形状の観点で大別し、そのうち本件で対象とするものを“直立壁面型構造物”，“杭型構造物”と呼称することとする。表 4.1 に港湾構造物を役割から分類した表と、その主な形状を示した。

ただし、表中，“形状”の項目で、直立面と表記しているものを“直立壁面型構造物”，杭と表記しているものを“杭型構造物”とした。

表 4.1 のように、港湾構造物の水中部の形状は、多くが直立壁面となっている。そのため、直立壁面型構造物を対象とした。また、経年劣化が特に課題となりやすいのは鋼構造物である。常に塩化物イオンにさらされ、錆が進行しやすいためである。そこで、鋼管杭が良く使われる杭式構造物についても対象とすることとした。港湾構造物を役割から分類した場合、水中部に一部、もしくは全部が位置するのは、水域施設、係留施設、外郭施設がある。他に港湾管理用移動施設の清掃船、通船や、臨港交通施設の橋梁なども水中部に一部位置するが、本研究では対象としない。水域施設には、航路、泊地、船だまりなどがある。全て、埋没対策が課題となり、海底の水深変化を管理している。係留施設には構造形式で様々な種類がある。その中で一般的に水中部にあるのは、防波堤、防砂堤、導流堤、水門、閘門、護岸、堤防、突堤が挙げられる。このうち、水門、閘門は、構造形式が場所により大きく異なり一般化が難しいため、本研究では対象としない。

表 4.1 港湾構造物の役割の観点からの分類と主な構造形式・形状

港湾構造物の分類		主な構造形式	水中部	形状
水域 施設	航路	海底	○	海底
	泊地			
	船だまり			
外郭 施設	防波堤	ケーソン式・ブロック式	○	直立面, 斜面, 円筒, 消波ブロック, スリット
	防砂堤	捨て石式, 消波ブロック式	○	斜面, 消波ブロック被覆
	導流堤	ケーソン式, ブロック式, 杭式	○	直立面, 杭
	突堤	浮体式	○	鎖, 浮体
	護岸	ケーソン式・ブロック式	○	直立面, スリット, 消波ブロック
		捨て石式, 消波ブロック式	○	斜面, 消波ブロック
		矢板式	○	直立面
	防潮堤, 堤防, 胸壁			
	水門, 閘門		○	その他
係船 施設	岸壁	重力式	○	直立面, スリット
		矢板式	○	直立面
		棚式	○	直立面
		セル式	○	円筒もしくは円弧
	係船浮標	ブイ, 鎖	○	鎖, 浮体
	係船くい	杭	○	杭
	栈橋	杭式	○	杭
	浮栈橋	浮体, 鎖	○	鎖, 浮体
	物揚場	岸壁と同様	○	岸壁と同様
	船揚場			

4.1.3 投入揚収方法の検討

本研究では、岸壁上から手作業で水中ロボットを投入することを想定する。

港湾構造物の点検時、水中ロボットの投入は、岸壁や栈橋など、点検対象となる構造物上からの投入を想定する。船舶から投入する方法も想定されるが、陸上局を設置する作業場所を線上に確保する必要がある。波しぶきなどの対策を考えると、作業室が必要となり、1tクラスの漁船では対応できない。用船の費用を考えると、構造物上からの投入に比べ、コストがかかる。立ち入れない場合などを除き、構造物上からの投入が現実的である。

投入揚収にクレーンを利用する場合にも、費用がかかる。加えて、クレーンの入場が可能な場所に使用が制限されるほか、災害直後の調査ではクレーンの設置の可否を判断できず、点検ができない。よって、本研究では、岸壁上から手作業で投入することを想定する。その場合、作業者は、図 4.3 のような姿勢で、構造物の海際から腕を伸ばし、ロボットを投入することとなる。

潜水作業を不要とするため、吊り具とロボットの切り離しには、図 4.4 のような方法が考えられる。

(1)フック方式

水中ロボットに吊輪を取り付けて、そこにフック付きのロープ等をかけることで投入揚収を行う。必要な機材は少ない。

(2)ランチャー方式

カゴ等に水中ロボットを格納した状態で吊り上げ、吊り下ろしを行い、水中ロボットの推進力で発進、帰還する方法である。荷が振れて構造物に衝突した場合にも、ロボットを保護することができる。

本研究では、4.2 節に示すように重量制限があるため、比較的軽量のフック方式を採用する。ロボット側の吊輪については、次節に示す水中ロボットの大きさの制約から、機体後方に取り付けることとした。これは、投入揚収時、機体が壁面に衝突しないようにするためである。一般に水中ロボットは縦方向、横方向に比べ前後方向が最も長い。機体後方にフックをつけることで、吊った際には機体の下を向き、水平方向の長さは小さくなり、機体と構造物との間隔を確保しやすい。

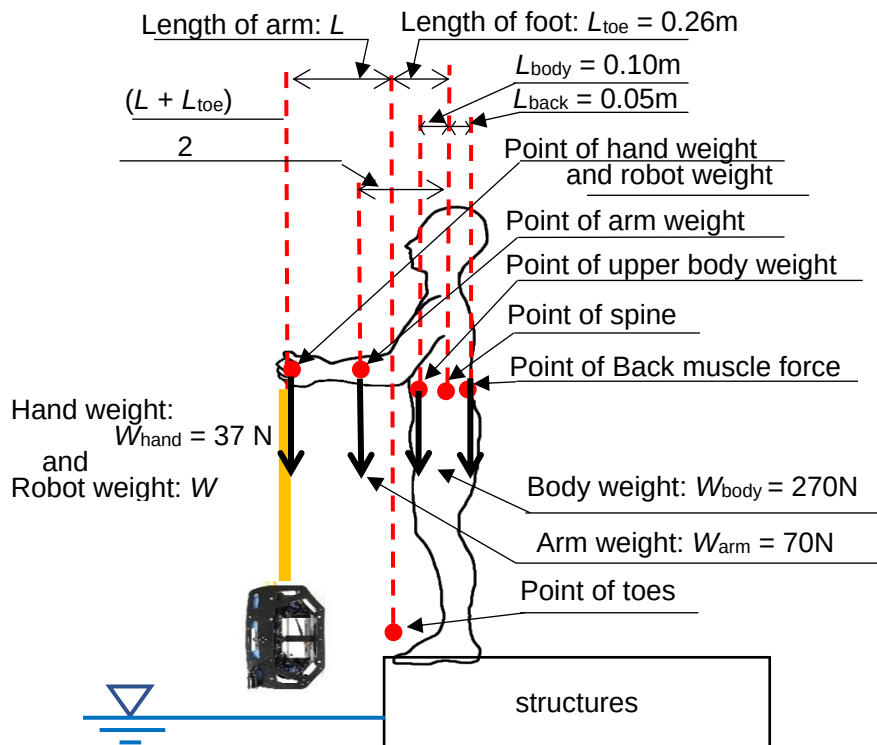
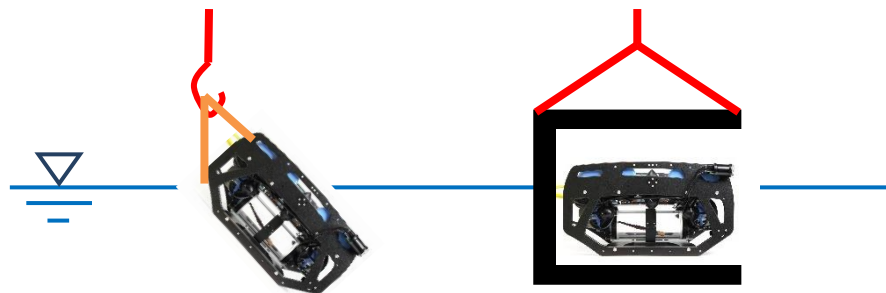


図 4.3 想定する投入揚収時の姿勢



(1)フック方式 (2)ランチャー方式

図 4.4 水中ロボットの投入揚収方法

フックはクレーン等安全規則に準じ、耐荷重が、水中ロボットの重量の 5 倍以上のものを選定することとした。取り回しを考慮し、フックには繊維ロープを取り付けることとした。繊維ロープについては、安全規則等には安全率が規定されていない。係留用ロープの安全率の検討¹⁾を参考に安全率を 7.5 以上とすることとした。また、一般的な三つ打ちロープの使用を想定し、撚りが戻らないように、ロープは 2 本取り付けるものとした。

4.2 運用方法による制約条件の検討

手作業の場合、投入揚収時の作業者の負担を考えると、水中ロボットの気中重量 W と長さは大きく制約される。

一般的な姿勢での作業では、作業対象物の重量は、男性の場合、通常を持ち上げ作業では作業者の腰痛防止のため、体重の 40% 以下が推奨されている。しかし、今回の想定では、物を持ち上げるときに一般的ではない姿勢で作業を行うことになり、重量物の持ち上げ時に負傷しやすい腰部にかかる負担を考えると、一般的な姿勢より腕を伸ばした本想定の方の方が腰部に作用するモーメントは増大することから、機体重量をより制限する必要がある。

一般的な姿勢での重量物の持ち上げ作業についての検討では、脊髄に作用する力が一定値以下になるように作業を設計する方法がある^{例えば2)}。この方法では、脊髄が損傷なしに耐えられる力を 3.4kN と想定し、作業時の姿勢などを図 4.5 のようにモデル化して計算を行っている。

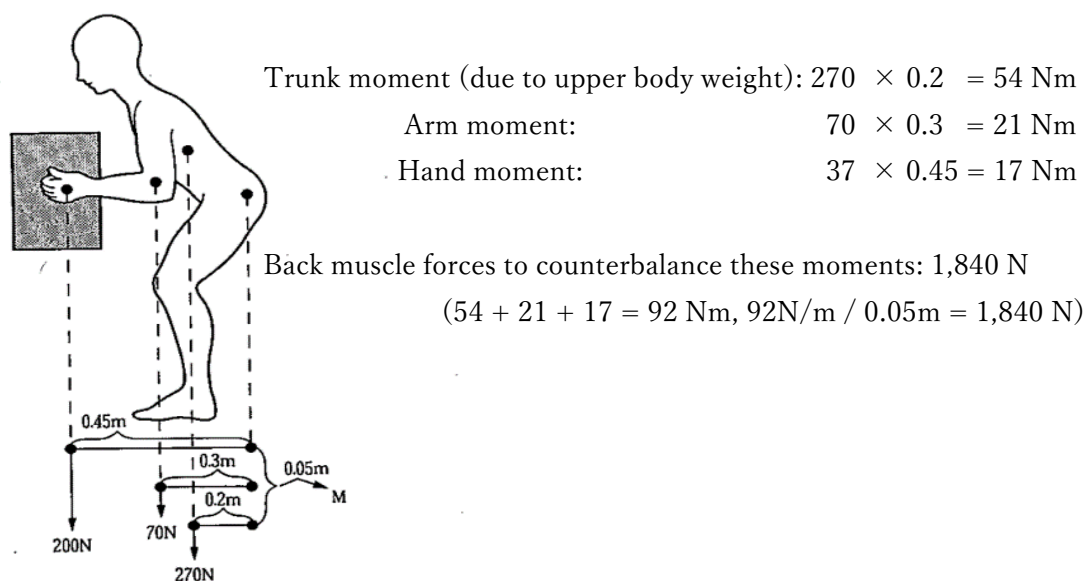


図 4.5 屈曲姿勢で荷物を持った時のモデル

次の出典の図を本筆者が英語に翻訳、配置を変更した。図中の数字、数式は原文ママ。
出展: 参考文献²⁾

文献²⁾に倣い、図 4.3 のような作業想定で腰部を痛めることなく投入揚収作業可能な水中ロボットの最大重量 $W_{\text{max,spain}}$ を計算した。ただし、岸壁壁面から腕先までの距離 L は水中ロボットが吊り揚げ、吊下ろし中に岸壁の垂直面に衝突し破損することのないように設定する必要がある。図は簡略化したものだが、実際には、岸壁天端面から、水面までは、2m 以上あることがほとんどである。

背筋の力 F_{back} によるモーメントは、上体が前後に傾斜しないように、他の脊髄に作用

するモーメントと釣り合うことから、次の式で表される。

$$F_{\text{back}} \times L_{\text{back}} = M_{\text{spain,body}} + M_{\text{spain,arm}} + M_{\text{spain,hand}} + M_{\text{spain,robot}} \quad (4.1)$$

$$M_{\text{spain,body}} = W_{\text{body}} \times L_{\text{body}} \quad (4.2)$$

$$M_{\text{spain,arm}} = W_{\text{arm}} \times \frac{L_{\text{toe}} + L}{2} \quad (4.3)$$

$$M_{\text{spain,hand}} = W_{\text{hand}} \times (L_{\text{toe}} + L) \quad (4.4)$$

$$M_{\text{spain,robot}} = W_{\text{robot}} \times (L_{\text{toe}} + L) \quad (4.5)$$

なお、 L_{back} ：脊椎から背筋までの距離、 $M_{\text{spain,body}}$ ：上体の重量により脊椎に作用するモーメント、 $M_{\text{spain,arm}}$ ：腕と重量によるもの、 $M_{\text{spain,hand}}$ ：手の重量によるもの、 $M_{\text{spain,robot}}$ ：ロボットの重量、 W_{body} ：上半身の重量、 L_{body} ：脊椎から上半身の重心までの水平距離、 W_{arm} ：腕の重量、 L_{toe} ：脊椎から爪先までの水平距離、 W_{hand} ：手の重量、 W_{robot} ：ロボットの重量である。

また、脊椎に作用する力 F_{spain} は次のようになる。

$$F_{\text{spain}} = F_{\text{back}} + W_{\text{body}} + W_{\text{arm}} + W_{\text{hand}} + W_{\text{robot}} \quad (4.6)$$

F_{spain} を整理すると以下のようになる。

$$F_{\text{spain}} = \frac{L_{\text{body}} + L_{\text{back}}}{L_{\text{back}}} \times W_{\text{body}} + \frac{(L_{\text{toe}} + L)/2 + L_{\text{back}}}{L_{\text{back}}} \times W_{\text{arm}} + \frac{(L_{\text{toe}} + L) + L_{\text{back}}}{L_{\text{back}}} \times (W_{\text{hand}} + W_{\text{robot}}) \quad (4.7)$$

ここで、文献²⁾より腰部を痛めない脊椎への荷重の範囲として、 $F_{\text{spain}} < 3.4 \text{ kN}$ とする。

また、他の定数も文献²⁾より、 $W_{\text{body}} = 270 \text{ N}$ 、 $W_{\text{arm}} = 70 \text{ N}$ 、 $W_{\text{hand}} = 37 \text{ N}$ 、 $L_{\text{body}} = 0.10 \text{ m}$ 、 $L_{\text{back}} = 0.05 \text{ m}$ とした。腕の重心は腕の長さ方向中心とした。日本人男性の足の平均サイズ 0.253 cm^3 を参考に $L_{\text{toe}} = 0.26 \text{ m}$ とした。

加えて、作業者の姿勢が安定である必要がある。この想定では、特に前方への転倒は落水に繋がる危険が大きく、かつ、それが発生しやすい作業想定であるから、つま先での転倒モーメントを計算した。姿勢の安定条件は次のようになる。

$$M_{\text{toes,body}} + M_{\text{toes,arm}} + M_{\text{toes,hand}} + M_{\text{toes,robot}} + M_{\text{toes,leg}} > 0 \quad (4.8)$$

$$M_{\text{toes,body}} = W_{\text{body}} \times (L_{\text{toe}} - L_{\text{body}}) \quad (4.9)$$

$$M_{\text{toes,arm}} = -W_{\text{arm}} \times \frac{L - L_{\text{toe}}}{2} \quad (4.10)$$

$$M_{\text{toes,hand}} = -W_{\text{hand}} \times L \quad (4.11)$$

$$M_{\text{toes,robot}} = -\alpha \times W_{\text{robot}} \times L \quad (4.12)$$

$$M_{\text{toes,leg}} = W_{\text{leg}} \times L_{\text{toe}} \quad (4.13)$$

ここで、 W_{leg} は足の重量、 α は安全率を示す。 W_{leg} は参考文献²⁾の想定体重 60 kg から計算し 211 N とした。 α は移動式クレーンの「転倒安全係数の下限値とも考えられる係数」である $1.27^4)$ を準用した。水中ロボットの大きさ、吊具の取り付け方で決定される L に対し、安全に投入揚収作業ができる水中ロボットの気中重量 W の関係は図 4.6 のようになる。

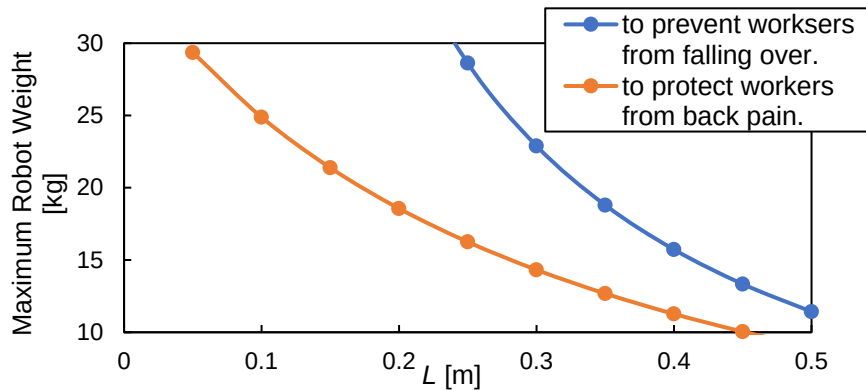


図 4.6 水中ロボットの重量と投入揚収時の張り出し距離の関係

4.3 ハードウェア構成の検討

4.3.1 コンセプトの検討

本検討では市販の小型の水中ロボットを対象に自律化を行うこととした。市販の小型水中ロボットを対象とする理由は、特注品や受注製作品に比べ比較的安価であることが多いためである。さらに、現場作業では水中ロボットが故障することが想定されるから、作業を止めないためには、代替品の入手が迅速に行える必要がある。市販品であれば流通在庫が各所に存在し入手しやすく、作業中断を短期に解消することが期待される。

ここで、点検をはじめとした作業の自律化を行うには、センサの追加が必要となることが多い。自律化には水中ロボットの位置を把握する必要があるが、一般的な市販の水中ロボットに標準搭載されているセンサだけでは、水平位置の推定は困難である。たとえば、市販の水中ロボットの多くに搭載されている AHRS (Attitude Heading Reference System) で計測した加速度や角速度情報を、カルマンフィルタ等を介し、組み合わる方法による位置計測が考えられるが、安価ではあるが精度が足りず実用的な慣性航法は困難である。

本研究では、先行研究に倣い、構造物との相対的位置関係を計測することで位置計測を行うことを想定する。そのための必要なセンサを選定し、機械に追加する必要がある。センサの構成は、作業の種類や作業場所によって異なり、水中ロボットの構成を変更することが必要となる。水中ロボットのハードウェアを直接改造して構成を変更する場合には、防水容器の容量や、回路構成が限定されて追加装置の大きさや消費電力に制限が生じるため、構成変更の検討には時間とコストがかかる。さらに点検に必要なセンサなどの知識だけでなく、ロボットの構成についても知識も必要となり、作業可能な人材が限られる。市販の水中ロボット自体のハードウェアの改造は、複製が難しい。特定のバージョンの機体を対象に、ハードウェアの改造は提案が可能である。ところが、現状、小型の市販品の水中ロボットは、半導体の進歩などで、頻繁に機体設計などが更新されている。そのため、他のバージョンの機体を改造し自律化するためには、それに合わせた配線図などを検討、作成する必要がある。作業の種類や現場ごとの自動化のための構成と、水中ロボットのバージョンの組み合わせの数は膨大となる。

そこで、本研究ではベースとなる市販の水中ロボット自体のハードウェアの改造は行わず、新たに防水容器を追加し、その中に自動化のためのモジュールを構築することとした。センサ類についても、防水容器の大きさの変更や、バッテリー、変圧器の追加変更が容易な外付けモジュールに接続することとした。水中ロボット本体と外付けモジュールとの接続は、元は陸上から延びていた通信ケーブルを短く切断し、それを介して通信を行うこととした。

外付けモジュールへの給電のため、バッテリーをモジュールに組込むこととした。ロボットとモジュール間の配線を操作信号線のみにして、接続を単純化できるので、電源容量の

管理を水中ロボット本体と切り分けることができ、センサの追加の際の設計も容易となる。

4.3.2 無索化の検討

ここでは、水中ロボットの無索化について検討する。

(1)有線型ロボット（ROV等）のメリット・デメリット

有線型ロボットの利点は、リアルタイムに機体や、周囲の状況を把握できることや、その状況に合わせ、操作を実施できること、陸上からの給電をすることで作業時間を延ばせることなどが挙げられる。一方、ケーブルによるデメリットも挙げられる。以下にデメリットをまとめる。

a)ケーブルの引っ掛かり

ROVは航行中、ケーブルを引っ張りながら進むが、移動方向を変えながら構造物近傍を移動する場合や、流れが作用してケーブルが弧を描く場合には、図4.7のようにケーブルが構造物に引っかかり、その後、移動ができなくなることがある^{例え4)}。水中ロボットのケーブルは一般的にポリウレタンなどの素材でできている。海中の構造物は表面に貝類が付着しており、それがケーブルのシースに食い込むため、操作機器側から、もしくはROVがケーブル方向にケーブルを引っ張ったとしても、引っ掛かりが外れない場合もある。そのため、ROVの運用時には潜水士が待機し、引っ掛かった場合には、作業を中断し潜水士が水中でケーブルを構造物から外す必要がある。

表面付着だけでなく、港湾構造物の場合、鋼材の腐食防止のための犠牲陽極などの突起物が設置されており、ケーブルが引っ掛かりやすい形状をしている。加えて、海水の濁りで、構造物の形状や位置関係の詳細な把握が困難で、建設時の図面と形状が違う施設もあり、運用で対応することが難しい。



図4.7 水中ロボットのケーブルの港湾構造物へのひっかかりの状況

出典:参考文献⁵⁾

b)流れや機体の移動によりケーブルに作用する抗力

港湾では潮汐や河川の流入、風等により流れが生じる。流れ環境下では、ROVには機体だけでなく、ケーブルにも流れの影響が及ぶ。このため、機体が潜航中や、操作者から離れた位置にある場合、運動性能が低下する。ここで、ROVのケーブルによる運動性能の低下について検討した。ただし、検討対象の仕様は、市販の水中ドローン BlueROV2（Blue Robotics社）の仕様⁶⁾を参考に表4.2とした。

一様流れ中にある物体に働く抗力 D は、一般に次の式で示される。

表 4.2 検討対象とした ROV の仕様

Items	Specification
Maximum Forward Speed	1.5 m/s
Forward Bollard Thrust $D_{\max}$	88.2 N (9kgf)
Diameter of cable d	7.6 mm

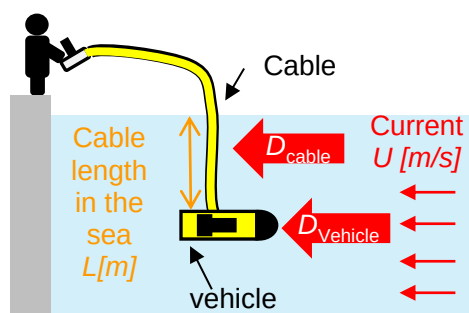


図 4.8 ケーブルに作用する潮流などによる引張力

$$D = \frac{1}{2} C_D \rho U^2 S \quad (4.14)$$

ここで、 C_D : 抗力係数、 ρ : 流体の密度、 U : 流速、 S : 投影面積である。本研究では海水中を想定し、 $\rho = 1,030 \text{ kg/m}^3$ として計算した。

計算を簡易にするため図 4.8 のように、機体から鉛直にケーブルが伸びている状態で機体前方から流れを受ける状況を想定した。実際の運用では、機体が移動する余裕を持たせるよう、ケーブルを長めに水中に出しておくため、ケーブルは複雑な形状となる。

ケーブルと機体、それぞれに作用する抗力 D_{cable} 、 D_{vehicle} について検討した。ケーブルについて、流れ方向での投影面積は流れが作用する長さ（水中にあるケーブルの長さ） L 、ケーブルの直径 d とすると $S_{\text{cable}} = L \times d$ である。ケーブルを円筒とみなしたとき、 $C_D = 1.2$ となる。

以上からケーブルに作用する抗力は、式(4.15)となる。また、機体については、 C_D が不明であるため、推定する必要がある。表 4.2 に示した最大前進速度が、ケーブルがほとんど水中に入っていない状態で機体のみ抗力が作用した場合の速力と仮定した。それらを式(4.14)に代入することで、 $C_D \rho S$ の積が推定できる。機体に作用する抗力は、式(4.16)となる。なお、抗力係数 C_D は流れの状況を示すレイノルズ数により変化する可能性があり、流速 U で変化することも考えられるが、今回は定数と仮定して計算を行った。

$$D_{\text{cable}} = 4.67L U^2 \quad (4.15)$$

$$D_{\text{vehicle}} = 39.2 U^2 \quad (4.16)$$

以上から、図 4.8 の状態で、ROV が流されずに定点にとどまることができる、もしくは任意の方向に移動ができる流速は、海中にあるケーブルの長さで図 4.9 の様に変化する。例えば、水中にあるケーブルの長さ $L = 10\text{m}$ の時、この ROV は $U = 1.0 \text{ m/s}$ より速い流れで位置を保つことができない。このように流れのある作業環境下では、ケーブルが流れを受けることで ROV の運動性能が低下する可能性があることがわかる。ただし、ここで示した流速は、定点にとどまることができる限界の流速であり、任意の方向を向いて構造物を撮影するといった作業を行うことができる限界の流速はこれよりも小さい。

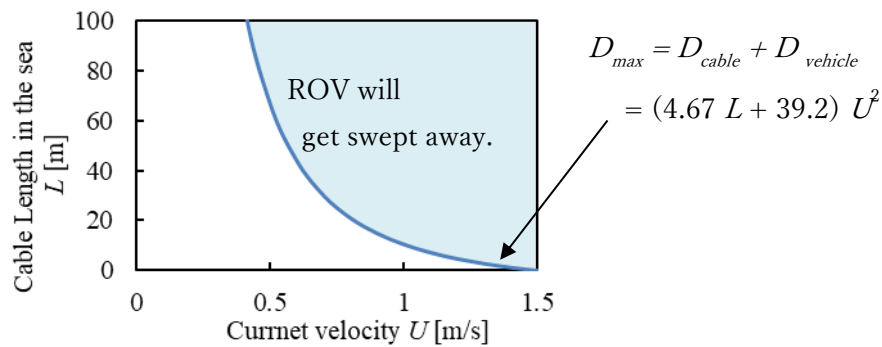


図 4.9 ケーブル長さ与作用する引張力の関係

さらに ROV が航行している場合も、同様にケーブルに抗力が作用するため、水中に入っているケーブルが長いほど移動速度、作業効率が低下する。

他方、機体が小さい程、機体に作用する抗力に対してケーブルに作用する抗力の割合が大きくなる。式(4.14)よりケーブルに作用する力はケーブルの直径に比例する。ケーブルの太さは様々な要素で決定されるが、その代表的な要素の 1 つである引張強度がある。ケーブルのもつ引張強度は断面積、つまり直径の 2 乗に比例する。一方、ケーブルに必要な引張強度は、主に機体の大きさ（質量）に比例する形で決定される。ことから、ケーブルに作用する抗力は、機体の質量の 1/2 乗に比例する。一方、機体に作用する抗力は、機体の大きさの変化によるレイノルズ数、抗力係数の変化を無視すると式(4.14)より、機体の 1 辺の長さの 2 乗に比例する。機体の質量は 1 辺の長さの 3 乗に比例するため、流れにより機体が受ける力は、機体の質量の 2/3 乗に比例する。よって、機体が小さいほど、流れによりケーブルに作用する力の割合が、流れにより機体に作用する力に比べて大きくなる。

c) 作業人員の増加

ケーブルありの水中ロボットの場合、ケーブルを出す、もしくは巻き取る作業を実施する作業者が 1 名以上必要となる。水中ロボットが陸上局から離れた場合には、陸上でケーブルを取り回すためにさらに作業員が必要になる場合もある。

(2)無索型ロボット（AUV 等）のメリット・デメリット

無索型ロボットのメリットは、ケーブルがないため、可動範囲が広いこと、ケーブルが引っ掛かることがないことなどが挙げられる。一方、ケーブルがないため、通信手段が限られるなど、次のような課題がある。

a)リアルタイムに状況が確認できない

ロボットが水中にある場合には通信手段が限られる。一般に音響通信^{例えば7)}が用いられるが、構造物の付近では反射や、構造物の影での遮蔽により、今回の用途では通信が確保できない。仮に通信が確立できても、通信速度は他の一般的な手法に比べ遅く、一般に流通している製品の通信速度は数十 kbps 程度である⁸⁾。そのため、水中映像などを送信することはできない。伝搬速度自体も遅いため、通信にタイムラグが生じ、完全な遠隔操縦を行うことは困難である。近年、光無線通信が開発されているが、製造業者へのヒアリングによれば、濁った海域では通信距離が制限され、2021 年時点では、漁港で行った実験では通信距離は 5m 程度が限界であったという事例があるとのことであった。

そのため、水中では、自律航行を行う必要がある。自律航行を行うには、構造物の形状が正確に把握できていないことを前提に、構造物との相対位置関係を計測する必要がある。

b)喪失する危険性

命綱等がないため、海中で想定外の動作をしたり、故障したり、他の物体に引っ掛かったりした場合に、回収が困難になる。通常、外洋で使用される AUV は喪失した場合には、音響信号もしくはタイマーでバラストを切り離し海面まで浮上し、GNSS で計測した位置座標を衛星通信で送信することで回収する方法が用いられる。港湾では、AUV が浮遊していると、航行中の船舶等に衝突する危険性がある。そのため、航路付近や、稼働中の施設で使用する場合には、喪失時には AUV が沈むように設計する必要がある。回収することを考えると、音響のビーコンも搭載する必要がある。

今回の検討では、構造物近傍の数十 cm のところを航行する可能性があるため、ケーブルの引っ掛かりがより大きなリスクとなるものと考えられる。そこで、本研究では、4.1.1 項に記載したように、ロボットを無索化するものとした。

4.4 ソフトウェア構成の検討

ソフトウェアについてもハードウェアと同様に、ベースマシンの操作用ソフトウェアは変更しないこととし、別途、自律航行用のプログラムを作成することとした。これは、ハードウェアの更新にあわせて、水中ロボットのファームウェアも更新される場合があるためである。操作ソフトウェア自体を変更し自律航行機能を作成した場合は、ハードウェアのバージョンごとにそれも変更する作業が生じる。加えてこれらの変更を実施するには、ロボットのハードウェアの変更を適切に把握する必要があるが、変更の仕様は必ずしも全て公開されないため、変更後のハードウェアを入手し確認する必要がある。故障した時にその確認から行うのでは作業再開までに時間がかかり、ハードウェアが更新されるごとに事前に入手し確認することは、現実的でない。

別途用意する自律航行ソフトウェアは、前進、旋回といったジョイスティックの信号を作成し、水中ロボットメーカーが提供するベースマシンの操縦ソフトウェアに入力するものとした。これは、ジョイスティックの基本操作については変更されることは少ないからである。そのため、水中ロボット自体のハードウェア改造や、専用ソフトウェアの作成に比べ、バージョン更新に対する汎用性が高い。しかも、出力内容自体が単純で、ロボットのハードウェアについての知識がなくても、ソフトウェアを変更しやすいためである。

4.5 センサの選定

図 4.2 に示した経路を自律航行するにあたり必要な計測項目を選定する。自律航行するうえで必要となるのは構造物との相対位置と方位である。

4.5.1 水平位置計測手法の検討

相対水平位置については、DVL (Doppler Velocity Logger, ドップラー式対地速度計) と距離計によって計測、推定することとした。

DVL は、海底に音波を照射しその反射波を取得する際、機体の移動によりドップラー効果が生じ、音波の周波数が変化することを利用して対地速度を計測するセンサである (図 4.10)。その計測データと AHRS の計測データとをカルマンフィルタによって組み合わせることで、移動距離を推定することができる。DVL の計測速度を AHRS の角度情報で座標変換し、それを積分することで移動距離が計算できる。現実的には、この方法だけでは精度が出ないので、カルマンフィルタを用い、移動距離を推定する事例が多い^{例え 9),10)}。カルマンフィルタとは、状態推定手法の一つで、センサなどから得られる誤差を含む「観測値」から状態を推定する手法である。



図 4.10 DVL の一例 (Water Linked 社 A-50)

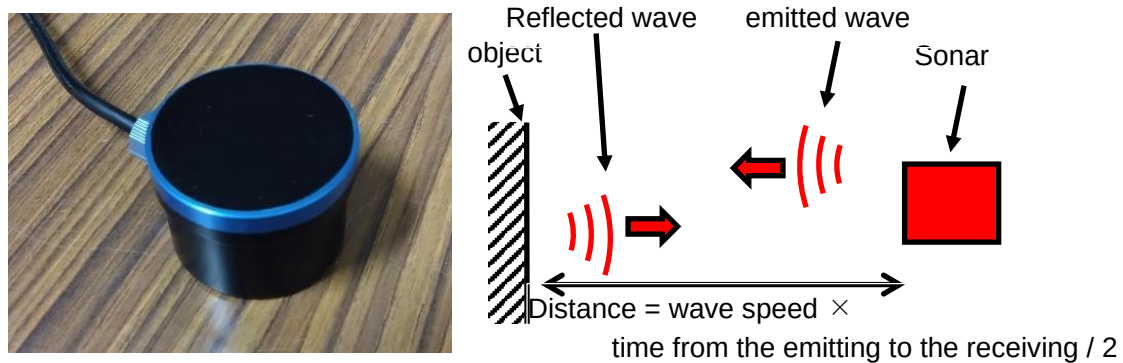


図 4.11 音波方式の距離計の例 (Blue Robotics 社 Ping Sonar) (左) と測定イメージ (右)

距離計では、構造物の方に向け、構造物との距離を計測することで、位置計測を実施する。濁った海域での使用を想定し、音波方式による製品を採用することとした(図 4.11)。他にレーザ方式の距離計もあるが、一般に水の濁りに弱いため採用しなかった。

計測理論は、音波方式の場合、time-of-flight 方式が一般的である。センサから対象物に音波を照射してから、反射波がセンサに到達するまでの時間を計測し、音速を掛けることで、距離を計算する。他に三角測量方式が考えられるが、音波方式の製品は調査したが発見できなかった。三角測量方式は、レーザ方式の場合、照射するレーザの光軸と、受光素子の光軸にオフセット角を設けて、受光素子で観測した反射光の角度とオフセット角から三角測量の要領で距離を計測する方法である。

一般的な水平位置の計測手法としては、GNSS が考えられるが、海中での使用は困難である。衛星からの電波が海水で減衰するためである。

他に、水中での水平位置計測手法として、音響測位装置が用いられることが多いが、この手法も港湾特有の課題から導入が難しい。音響測位装置は既知の点に固定局を設置し、機体側に移動局を設置する。固定局は、それ自体が複数設置されるか、複数の受波素子を搭載した装置が用いられる。計測時は、一般に移動局から音波を発射し、固定局で受信する。受波素子毎で受信する時間もしくは位相が異なるため、そこから距離、もしくは角度を計算し三角測量を実施する。

港湾での課題では、構造物が多く、センサ同士が影となる位置関係になり位置が計測できなくなることが知られている(例えば 11)。さらに、水深が浅いため、海底や海面からのマルチパスが発生しやすく計測可能な範囲が限られることも知られている(例えば 12)。

4.5.2 垂直位置計測手法の検討

鉛直位置の計測手法として、水圧計、高度計の二種類を採用した。

水圧計は計測した水圧から、水深を計算することが可能である。ただし、水深は、潮汐により変化するため、構造物との相対位置として取り扱うには、時間ごとの潮位による補正が必要である。さらに海面付近では、波による圧力変動の影響を受けることが知られている^{例えば 13)}、ため、使用に注意が必要である。加えて、これ単独では埋没や洗掘で海底地形が変化している場合に海底に衝突する危険性がある。水圧計については DVL の位置推定により代替可能である。一般に、精度が水圧計の方が高いことと、比較的安価なため、これを採用することとした。

高度計は音波式の距離計を海底に向けるものである。海底地形が変化している場合にそれを別途計測しなければ、このセンサ単独で構造物との相対位置関係を推定することはできない。一方で、点検時の海底の状態にあわせ、海底付近まで接近する際の状況を把握するのに有用であるため採用した。

4.5.3 方位計測手法の検討

方位計については AHRS 等で角速度を計測する方法を採用した。方位の計測方法は、地磁気方位計で計測する方法と、角速度を計測し、それを積分する方法がある。港湾構造物には鋼管杭、鋼矢板など鋼材が使われていることが多く、それらの磁気で地磁気方位計だけでは、正確に方位を計測できない。一方、角速度を積分する方法では、計測から時間が経つにつれ誤差が蓄積する。今回は、運用中の任意のタイミングで、機体が水面の目視可能な時に方位をリセットすることとし、角速度を積分する方法を採用した。

4.6 まとめ

本章では、港湾構造物水中部の目視点検を行う水中ロボットの開発にあたり、次の要件を設定した。

- ・対象とする構造物は水中部に直立壁面を有するものと、杭式のものとした。
- ・図 4.2 に示す経路を自律航行する無索自律型水中ロボットを開発することとした。
- ・水面では無線 LAN による通信を介し遠隔操作を行い、自律航行の開始位置まで移動させる。
- ・自律航行開始後、機体は水中を上下に移動する。この間、機体方位は構造物の方向に、水平位置は構造物から一定距離、機体左右方向位置は保持するように制御を行うものとした。
- ・岸壁上から手で投入できる大きさ、重さを検討した。
- ・機体の重さと大きさは、図 4.4 に示したような関係性に収まるものとした。
- ・市販の水中ロボットに、外付けモジュールを取り付ける改造を行うこととした。
- ・追加のセンサは外付けモジュールに組み込むこととした。
- ・センサは DVL、水圧計、AHRS、超音波距離計を設置することとした。
- ・ソフトウェアについては、新たに自律航行用ソフトウェアを作成し、市販ロボットの操縦ソフトウェアにジョイスティック信号を疑似的に出力することで機体の操縦を行うこととした。

参考文献

- 1) 田中 廣治, 増原 稔之: 合成繊維ロープの繰り返し特性実験, 五洋建設技術年報, vol.30, 2000.
- 2) 城内 博: 腰痛発生のメカニズムと腰痛予防, 労働衛生, Vol.40, No3, 1999.
- 3) 厚生労働省: 令和元年国民健康・栄養調査報告, 2019.
- 4) 労働安全衛生総合研究所: 作業現場における地耐力確認の方法—移動式クレーンを含め

- た建設機械等の転倒防止対策一，労働安全衛生総合研究所技術資料，No.3,2015.
- 5) 野上周嗣，加藤絵万：水中ドローンを利用した港湾構造物の調査に関する検討，港湾空港技術研究所資料，NO.1380，2020.
- 6)Blue Robotics 社：BlueROV2 Datasheet，
<http://www.info.shonan-it.ac.jp/lecture/ControlEng/controleng-1.pdf>, 2022-5-30 参照.
- 7)樹田 行弘，出口 充康，志村 拓也：水中音響通信技術の紹介，通信ソサイエティマガジン，15 巻，4 号，pp. 271-283，2022.
- 8)Sandra Sendra, Jaime Lloret, Jose Miguel Jimenez, Lorena Parra, “Underwater Acoustic Modems”, IEEE Sensors Journal, Vol.16, No.11, pp.4063-4071, 2015.
- 9) 熊谷 秀夫, 沼島 徹, 杉本 末雄，：自立型水中航走体における高精度複合航法システム, 電気学会論文誌C（電子・情報・システム部門誌）, 123 巻, 4 号, p. 777-785, 2003.
- 10) M. Blain, S. Lemieux, R. Houde, Implementation of a ROV navigation system using acoustic/Doppler sensors and Kalman filtering, Oceans 2003, vol3, pp.1255-1260, 2003.
- 11) 浦 環，巻 俊宏：栈橋式構造物水中支持部の全自動点検手法，（財）港湾空港建設技術サービスセンター研究開発助成報告書，2009.
- 12) 平林丈嗣ら，水中建設機械を対象とした作業情報呈示システムの適応検討，第 18 回建設ロボットシンポジウム，2018.
- 13) 喜多 司，平林 丈嗣，高尾 俊輔，吉江 宗生：水中バックホウを対象としたマシンガイダンスシステムの構築と精度検証，港湾空港技術研究所 資料，No.1390，2021.

5 水中ロボットの製作

5.1 ベースマシンの選定

ベースマシンとして BlueROV2 を選定した。ベースマシンは市販の小型水中ロボットとした。研究開始時点（2020 年）に販売されていたもので、国内で流通があり入手性が高いと考えられたものを図 5.1 に示す¹⁾⁻⁵⁾。

この中で、ロボットの機体情報を引き出せるものを検討した結果、製造元の WEB サイトから得られた情報では、BlueROV2⁶⁾と OpenROV⁷⁾であった。両方とも、ソフトウェアのソースコードが公開されていた。このうち、Open ROV は 2018 年頃まで存在した公式 HP (<https://openrov.com/>) がアクセスできなくなっていたなど、サポート体制が不明確となっていたため、候補から外した。



(1)BlueROV2（米国 Blue Robotics 社製）
写真の出典: 参考文献¹⁾



(2) Open ROV（米国 Open ROV 社製）
写真の出典: 参考文献²⁾



(3) CHAISING M2
（中国 Chasing-Innovation Technology 社製）
写真の出典: 参考文献³⁾



(4)FIFISH V6（中国 QYSEA 社製）
写真の出典: 参考文献⁴⁾



(5)Power Ray（中国 Power Vision 社製）
写真の出典: 参考文献⁵⁾

図 5.1 検討の対象とした水中ドローン

残りの候補の BlueROV2 自体の重量は 11kg 程度であり、大きさも 44cm×33cm×28cm と、4.1.3 項で述べた要件を満足している。さらに、スラスタが 6 つ搭載され、前後、左右、上下と旋回の 4 自由度の運動が可能なホバリング型の機体である。

通信は、ロボット内部のコンパニオン PC と陸上局の間がケーブルで接続され、Home Plug AV と呼ばれる 2 線式の通信規格、最大速度 80Mbps の通信が行われている。陸上側、機体側それぞれで、それを LAN ケーブルによるイーサネットに変換する装置が設置されており、ロボットのファームウェアと陸上局の操作ソフトウェアが UDP プロトコルによる通信を行っている。

機体に搭載されるセンサなどの情報は取得可能である。通常の使用の際に、先ほどの通信の中でセンサデータは陸上局に送信されている。その通信プロトコルは公表されており、UAV などでも主に使われている Mavlink プロトコルが採用されている。通信に使われている UDP ポートのポート番号は任意に変更が可能である。そこで、陸上局上で稼働するデータ中継プログラムを作成することとした。このプログラムは、ファームウェアが送信するデータを受信し、別の複数の UDP ポートからループバック出力することで、機体のセンサ情報を既存の操作プログラムと新たに作成する自律航行用プログラムの両方で取得することができる。

逆に、操作ソフトウェアからもコマンド等をループバック出力し、データ中継プログラムで取得してからファームウェアに出力することも可能である。加えて UDP 通信であるため、無索化する際も、無線 LAN を活用することができ、機器の入手性が良く、選択肢も多い。ただし、その通信速度は cat5 程度である。そのため、高画質な映像のリアルタイムの通信は困難である。

以上を踏まえ、ベースマシンとして BlueROV2 を選定した。

その仕様を表 5.1 に示す。

表 5.1 ベースマシン（BlueROV2）の仕様表

Category and Item	Value
Physical spec	
Dimension	457mm×338mm×H:254mm
Weight (measured)	11kg (in the air)
Construction	HDPE frame, aluminum flanges/end cap, and acrylic tube
Performance	
Maximum Rated Depth	100 m
Maximum Forward Speed	1.5 m/s
Thruster Configuration	6 Thrusters (4 Vectored Thruster and 2 Vertical Thruster)
Forward Bollard Thrust	88 N (9 kgf)
Lateral Bollard Thrust	88 N (9 kgf)
Vertical Bollard Thrust	69 N (7 kgf)
Camera	
Resolution	1080×1920 (1080p)
Field of View	110 degrees horizontally
Tilt Range	+/- 90 degree camera tilt
Sensors (standard)	3-DOF Gyroscope, 3-DOF Accelerometer, 3-DOF Magnetometer, Internal barometer, Pressure/Depth and Temperature Sensor, Current and Voltage Sensing, Leak Detection
Battery	
Type	Litium-ion battery 14.8V-15.6Ah
Battery Life (Normal Use)	2 hours (catalog spec)

5.2 ハードウェアの構築

5.2.1 コンピュータの選定

外付けモジュールに設置するコンピュータについては、今回は Latte Panda4GB/64GB を選定した。BlueROV2 の操作ソフトウェア QGroundControl 動作コンピュータの推奨スペックは 8GB, SSD, グラフィックボード搭載, CPU が Intel core i5 相当以上である⁸⁾。

コンピュータを収める防水容器は BlueROV2 本体と同じシリーズを使用する予定であったため、幅が 10.1cm(4inch)以下のコンピュータの選定を試みた。これらの要件を満たす市販のシングルボードコンピュータを調査した結果、2022 年当時に確認されたのは図 5.2 に示す 2 つであった^{9),10)}。



(1) MIO-5271Z2-4GS9A1E
(ADVANTECH 社) [102 mm]



(2) IB919
(iBase 社) [102mm]

図 5.2 推奨スペックを満たすシングルボードコンピュータの例 ([]内は短辺の長さ)

写真の出典：(1)参考文献⁹⁾, (2)参考文献¹⁰⁾

いずれも、幅が 102mm で、想定する防水容器に入る可能性がある大きさではあったが、USB ポートなどが長辺側についており、防水容器内で配線ができない形状であった。

その他に UMPC (Ultra-Mobile PC, 超小型ノート PC) についても調査したが、推奨性能を満たし想定する防水容器に入るものはなかった^(例えば 11)。

そこで、推奨スペックを満たさない、図 5.3 に示す防水容器内で配線可能な大きさ、配置のシングルボードコンピュータを 2 種類用意し、操作ソフトウェアの動作試験を実施した^{12),13)}。



(1) Raspberry Pi 4 MODEL B 8GB
(OS: Ubuntu or Raspberry pi OS) [56mm]



(2) Latte Panda 4GB/64GB
(OS: Windows 10 Pro) (DFRobot 社) [70mm]

図 5.3 容器内で配線可能なシングルボードコンピュータの例 ([]内は短辺の長さ)

Raspberry pi については、操作用ソフトウェアのインストールができなかった。CPU が ARM Cortex-A72 で、RISC アーキテクチャのものであった。QGroundControl のインストールパッケージが CISC アーキテクチャの Intel や AMD 製の CPU に対応したもので、2020 年当時は RISC アーキテクチャには対応していなかった。一部のバージョンでは、Raspberry pi で導入できたとする情報¹⁴⁾が 1 件あったが、具体的な方法は示されておらず、詳細が不明であった。逆に、筆者と同様に Raspberry pi に操作用ソフトウェアをインストールできないとする報告が複数件あがっていた。ソフトウェア自体のソースファイルは公表されていたため、筆者はそれらからビルドを試みたが、一部のライブラリのソースファイルが公表されていなかったことや、ライセンスの問題から実施できなかった。

Latte Panda については、操作用ソフトウェアの導入が可能であった。改造前の BlueROV2 に接続し動作させた結果、問題なく、使用が可能であった。2020 年当時、本品は通販サイトなどから購入可能で、流通在庫が存在しており、代替品の入手も容易であった。そこで本件では、Latte Panda を採用した。その仕様を表 5.2 に示す。

表 5.2 搭載したコンピュータ (Latte Panda) の仕様表

Category and Item	Value
Construction	
CPU	Intel Cherry Trail Z8350
Memory	4 GB
Storage	64 GB
Physical spec	
Dimensions	88mm x 70mm
Weight	55 g
Electrical spec	
Power consumption	5V - 10W
OS	Windows 10 Pro

5.2.2 センサの選定

(1) DVL

取り付けるベースマシンの大きさを考慮し、小型のものを選定することとした。全体の重量の制約から質量 1kg 以下のものを選定するものとした。性能要求としては、多くの港湾構造物近傍の最大水深が 20m 程度であることから耐圧性と計測可能な高度が 20m 以上のものを選定することとした。計測精度については、6.1.3 項で性能試験を行い使用の可否を検討した。その結果、2020 年当時、質量の条件にあてはまるものが Water Linked 社製の DVL A50¹⁵⁾のみであった。なお、取扱業者にヒアリングをしたところ、本品は国内に在庫がある場合があるが、常にあるとは限らないという旨の回答を得た。その写真を図 5.4 に、その仕様を表 5.3 に示す。



図 5.4 DVL A50 (Water Linked 社)

表 5.3 DVL (A50) の仕様表

Category and Item	Value
Acoustic performance	
Transducer frequency	1 MHz
Transducer Setup	4-beam convex Janus array
Transducer beam angle	22.5 degrees
Sampling rate	4-15 Hz (adaptive to altitude)
Minimum altitude	0.05 m
Maximum altitude	35 to 50 m (it is dependent on seabed condition etc.)
Max velocity	3.75 m/s
Velocity resolution	0.1 mm/s
Long term accuracy	±1.01 %
Physical spec	
Dimensions	Diameter: 66 mm × Height: 5 mm
Weight	170 g
Depth rating	300m
Material	PEEK (housing), Stainless Steel 316
Operating temperature	-5 to 55°C
Electrical spec	
Voltage	10 to 30V
Power consumption	3W (15W at power-on surge)
Communication	Ethernet & Serial (UART)
Protocol	Water Linked API

(2)距離計

構造物に向けて設置し、構造物との距離を計測し、相対位置として利用する。

DVLと同様に小型で質量1kg（処理部を含む）のものを選定した。その結果、図5.5に示す3社の製品が条件に該当した¹⁶⁾⁻¹⁸⁾。ここで、図中[]内はカタログに表記された質量である。このうち、最も軽量であったBlue Robotics社製 Ping Sonarを本研究では採用することとした。2020年当時、本品は、日本国内でも複数社が国内に在庫を保有していた。その仕様を表5.4に示す。



(1) Echo Logger 社製製品
(写真は EU400) [270g]



(2) Micron Echosounder
(Tritech 社製) [200g]



(3) Ping Sonar
(Blue Robotics 社製) [133g]

図 5.5 質量 1kg 以下の音波方式の距離計

写真の出典：(1)参考文献¹⁶⁾，(2)参考文献¹⁷⁾，(3)筆者が撮影

(3)水圧計

深度計測のための水圧計はベースマシンに搭載されていた。その仕様を表5.5に示す¹⁹⁾。なお、精度検証は6.1.2項に示すように水槽で実施した。

表 5.4 距離計(Ping Sonar)の仕様表

Category and Item	Value
Acoustic performance	
Transducer frequency	115 kHz
Beam width	30 degrees
Transducer beam angle	22.5 deg
Ping rate	Unknown
Minimum altitude	0.5 m
Maximum altitude	50 m (it is dependent on condition.)
Resolution	0.5% of range
Physical spec	
Dimensions	Diameter: 48 mm × Height: 35 mm
Weight	133 g
Depth rating	300 m
Operating temperature	0 to 30°C
Electrical spec	
Voltage	4.5 to 5.5 V
Power consumption	0.5 W
Communication	Serial (UART)
Protocol	Ping Protocol

表 5.5 水圧計（ベースマシン搭載，Bar30（Blue Robotics 製））の仕様表

Category and Item	Value
Performance	
Maximum altitude	3.0 MPa (30 bar, 300m in water depth)
Resolution	20 Pa (0.2 mbar, 0.2mm in water depth)
Physical spec	
Depth rating	500 m
Operating temperature	2 to 40°C (in water)
Electrical spec	
Voltage	2.5 to 5.5 V
Power consumption	6 mW (at peak)
Communication	I ² C

(4)高度計

DVLにより計測される高度の値を採用することとした。

(5)方位計

DVLに搭載された AHRS(Attitude Heading Reference System)の値を採用することとした。

角速度を計測できる AHRS はベースマシンと，DVL に搭載されていたため，新たに追加はしなかった。これの精度検証は 6.1.1 に示すように水槽で実施した。

(6)点検用カメラ

点検写真を撮影するための水中カメラは，ベースマシンのものとは別に用意することとした。ベースマシンの水中カメラ自体の画素数が 1920×1080 である。ベースマシンのカメラでは，その内部に動画を記録できない。カメラが撮影している映像はリアルタイムに UDP 通信で操作ソフトウェアに送信され，操作ソフトウェアに表示されるが，通信の容量の制限や変換処理により，ノイズが発生する，一時的に更新されなくなる等，劣化しているが，その映像を記録することしかできない。

新たに用意する水中カメラについては、通信の影響を受けないよう、独立したものを設置することとした。他の水中ロボットでも使用実績が多い GoPro 社製 GoPro シリーズから、GoPro MAX を採用することとした。その仕様を表 5.6 に示す²⁰⁾。カメラのバッテリーもベースマシン、外付けモジュールから独立させることとした。稼働時間は 108 分²¹⁾程度とベースマシンの稼働時間 2 時間と同程度である。

表 5.6 点検用カメラ(GoPro MAX)の仕様表

Category and Item	Value
Performance	
Resolution	2560×1440 (1440p, front camera), 1920×1080(1080p, rear camera)
Frame rate	60 / 30 / 24 fps
Battery Life	108 minutes ²¹⁾
Physical spec	
Dimensions	64 mm×69 mm×25 mm
Weight	154 g
Depth rating	5 m (45 m in housing)
Operating temperature	10 to 35℃

(7)無線 LAN アンテナ

無線 LAN のアンテナおよびレシーバ全体については、外付けモジュールの外部に設置することとした。機体が水面にあるとき、波浪の影響を受けないよう高い位置に設置する必要があったためである。

他の方法に、アンテナのみを外部に出す方法がある。この方法の方が、新たに防水を施す部分が少ないため、加工は容易である。この場合、アンテナに防水コネクタを通す必要があり、アンテナ自体を加工する必要がある。国内で電波機器を使用する場合、電波法や関係法令等の定める技術基準に適合している無線機であることの承認を受ける必要がある。すでに承認を受けた製品であったとしても、レシーバ、アンテナ、その間をつなぐケーブルの組み合わせを変更した場合には新たに承認を取得する必要がある。そのため、これらを加工したものを使用することが困難であった。そこで、レシーバ、アンテナ全てを 1 つの防水ケースの中に入れ、外付けモジュールの外に出し、レシーバとコンピュータをつなぐケーブルに防水コネクタを通すこととした。

無線 LAN アンテナを入れるケースを小型にするため、フィルムケースの使用可否を検討した。対象としたのは長さ $L = 51\text{mm}$ 、外径 32mm 、円筒部の厚さ $t = 1\text{mm}$ 、ポリプロピレン製のものである。

円筒殻の座屈応力の計算式²²⁾に準じてフィルムケースの座屈応力 σ_c の計算を行った。

$$\sigma_c = k \left\{ \frac{\pi^2 E}{12(1 - \nu^2)} \right\} \left(\frac{t}{L} \right)^2 \quad (5.1)$$

$$k = \frac{(1 + \beta^2)^2}{\delta + \beta^2} + \frac{12z^2}{\pi^4(\delta + \beta^2)(1 + \beta^2)^2} \quad (5.2)$$

$$z = \frac{\sqrt{(1 - \nu^2)}L^2}{Rt} \quad (5.3)$$

$$\beta = \frac{Ln}{\pi R} \quad (5.4)$$

ここで、 k : 座屈係数、 E : ヤング率、 ν : ポアソン比、 β : 座屈長係数、 z : 形状係数、 R : 外側半径、 n : 座屈モード（自然数）である。

参考文献²³⁾によれば、 $E = 1.1 \sim 1.6 \text{ GPa}$ であったため、安全側をとって、 $E = 1.1 \text{ GPa}$ とした。 ν は不明であったため、東レプラスチック精工製 TPS-PP を参考に $\nu = 0.4$ とした²⁴⁾。

また、長さ方向応力は、底面部に作用する圧力を断面積で除することで次式のようになる。

$$\sigma_c = \alpha \frac{Rp_c}{2t} \quad (5.5)$$

ここで、 α : 安全率、 p_c : 座屈が発生する外圧（と内圧との差）である。以上の式を計算すると、 $n=3$ で p_c は最少となる。樹脂材料について経験的に用いられる安全率 $\alpha=3.0$ を採用した場合、 $p_c = 0.24 \text{ MPa}$ となる。本検討で想定される、係船施設付近の水深は最大で 20m 程度であることと、加工時に後述するように樹脂を注入するため、 L がこの計算よりも小さくなることから、フィルムケースの耐圧性は十分であると考えられる。これより、フィルムケースをアンテナの防水容器として採用した。

無線 LAN アンテナについては、検討したフィルムケースに入る大きさのものを検討した結果、USB 接続 Wi-Fi アダプタ Buffalo 製 WI-U2-433DMS が大きさ $33\text{mm} \times 8\text{mm} \times 18\text{mm}$ であったため、これを採用した。

フィルムケースの蓋部分、ケーブルを差し込んだ穴の防水処理については、フィルムケース内に硬化樹脂を流し込む方法とした。アダプタの内部に樹脂が流入すると、動作に問題が発生する可能性があるため、フィルムケースの蓋付近、と穴付近のみに樹脂を充てんするように加工した。樹脂は、耐水性があり、隙間ができないように硬化時に収縮が小さいものを使用した。加工後の状況を図 5.6 に、加工工程のイメージを図 5.7 に示す。

加工では、まず、蓋の中心にケーブルの太さと同じ太さのドリルで穴をあけた。表面処理として、蓋、容器側の内面を紙やすり（目の粗さ： $\#800$ ）で研磨した。次に、ケーブルを蓋の穴に通し、USB コネクタを接合し、無線 LAN アダプタを接続し、容器の中に入れた。その後、蓋の穴の隙間から樹脂の溶液を入れたシリンジの針を差し込み、容器を少し傾けた状態で溶液を注入した。容器の内側に高さ 1cm 程度注入した後シリンジを抜き、穴付近、蓋と容器の隙間を自己融着テープで養生した後、1 日間、硬化のために静置した。



図 5.6 フィルムケースに入れた無線 LAN アンテナの状況

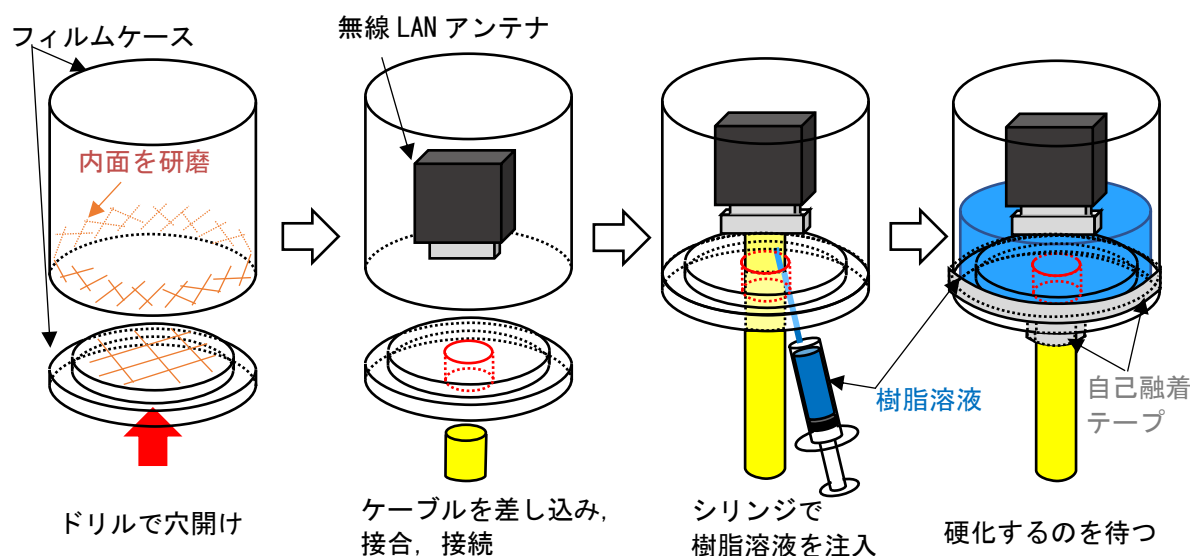


図 5.7 フィルムケースの防水加工方法

(8)信号変換器

ベースマシンとの通信のため、Home Plug AV 方式の通信と LAN ケーブルによるイーサネット通信の変換器を設置した。動作電圧は 5V もしくは 7~28V で、消費電力は最大 2.5 W である²⁵⁾。

DVL、距離計との通信のため、UART-USB 変換器として秋月電子通商製 AE-FT234X を組み込んだ。なお、センサと変換器の組み合わせによって、通信に不具合が発生する場合がある。組み込み前に接続、1 時間の通信試験を行い、その間、滞りなく通信し、今回の組み合わせでは問題なくデータが取得できることを確認した。AF-FT234X の消費電力は 40mW 程度である²⁶⁾。

(9)電源設計

電源の電圧は、これまでの装置の中で動作電圧が最も高い DVL に合わせ、10V 以上のものを選定し、他の機器については降圧し使用することとした。他に、低圧の装置に合わせた電圧のバッテリーを搭載し昇圧する方法があったが、バッテリーに流れる電流量が大きくなりノイズ等の原因となりうるため採用しなかった。複数の電圧のバッテリーを導入する方法は、充電の手間が増え、ヒューマンエラーの原因になりうるため採用しなかった。電力容量などを考慮し、リチウムイオン蓄電池を採用し、3 セルを直列につないだ定格電圧 11.1V (3S) のものとした。

距離計の動作電力 5V-0.1A は USB バスパワで給電することとした。この方法で給電可能かを確認するため、動作試験を実施した。UART-USB 変換器 1 つ当たりの給電容量は 5V-0.35A で²⁶⁾、距離計の消費電力を十分に供給できる。しかし、コンピュータのバスパワの電源容量の記載がなかったため、コンピュータからの USB バスパワの電源容量は十分か不明であった。不十分だった場合、センサデータが取得できない可能性がある。安全側に考え、組み込み前に距離計を 3 つと無線 LAN アダプタを、USB ハブを介すなどしてコンピュータに同時に接続し、バスパワ給電による動作を確認した。その結果、バスパワ給電で複数の距離計が同時に動作することを確認した。なお、他の給電方法として電源から距離計に電源線を配線する方法があった。仮にバスパワ給電の電気容量が不十分だった場合にも機器を動作させられる方法であるが、配線が複雑になるため採用しなかった。

降圧 DC/DC コンバータについては、スイッチング方式の Blue Robotics 社製 Power Supply

を採用した．距離計など 5V で動作する機器は，すべてコンピュータから USB パスワフ給電させて動作させられることを確認したため，DC/DC コンバータはコンピュータのみに給電すればよい．コンピュータの定格電流は 2A であった．それに合わせ 2 次側電流の許容量が 2A 以上のもので，小型の製品を調査した．その結果，本製品が 2 次側の電圧，電流が 5V-6A で条件を満たし，かつ，大きさが 37mm×18mm×6mm と小型であった²⁷⁾．なお，変換効率は不明である．全体の電源容量の計算のため，以後，参考文献²⁸⁾，²⁹⁾を参考に変換効率 80%として計算した．

電源の容量は 58WA (11.1V-5.2Ah)とした．これまでに示した装置の消費電力を合わせると，外付けモジュール全体の消費電力は 18W となる．外付けモジュールの稼働時間は，ベースマシンの稼働時間 2 時間に加え，陸上での調整，作業後のデータの引き出しで 1 時間と想定し，3 時間とした．その場合，バッテリーの容量は 54Wh，4.9Ah 程度必要となる．そこで，バッテリーは 2 セルを並列に接続し，11.1V-5.2Ah (3S2P)のリチウムイオン電池とすることとした．

(10)その他

電源管理のため，スイッチを設置した．スイッチは外部から操作できる必要がある．防水容器に対応したスイッチが市販されていたため，それ (Blue Robotics 社製 Switch) を採用した．なお，DVL は長時間，気中で運用すると，オーバーヒートする．そのため気中での調整時の安全確保のために DVL 用にも別途スイッチを設置した．

5.2.3 実装

防水容器の中に先の装置を実装した．使用した機材を表 5.7 に，外付けモジュールの写真を図 5.8 に，配電図を図 5.9 に，通信系統図を図 5.10 にそれぞれに示す．外付けモジュールは取り回しの問題から，機体の上部に設置した．

本研究の途中で DVL のファームウェアが更新されたため，構成を変更した．DVL A50 は LAN もしくは UART による通信を行っている．実験開始時のファームウェアでは，水平位置計測値や角度のリセットのコマンドが LAN 通信からしか使用できなかった．その後，ファームウェアの更新で，その操作が UART 通信からも利用可能となった．つまり，DVL とコンピュータ間の LAN 通信を使用する必要がなくなった．そこで，消費電力を抑制するため，LAN ハブなどを廃止する構成変更を行った．変更後の配電図を図 5.11 に，通信系統図を図 5.12 に示す．

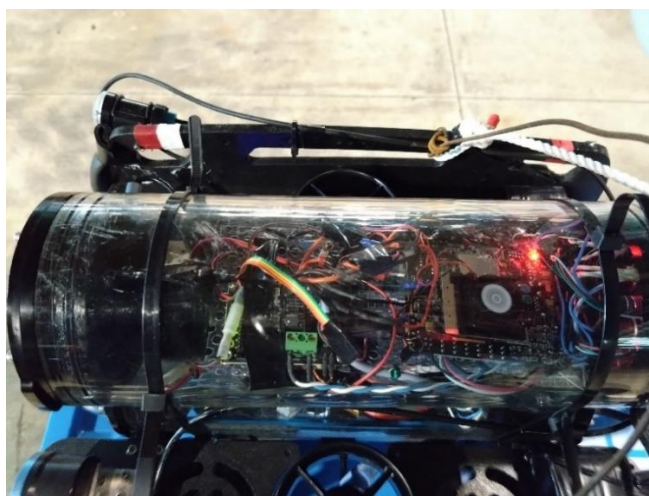


図 5.8 外付けモジュール

表 5.7 ベースマシン (BlueROV2) の仕様表

Category and Item	Value	Qty	Availability
Base machine	BlueROV2 (Blue Robotics)	1	※1
External module			
Enclosure	Watertight Enclosure (Blue Robotics)	1	○
Computer	Latte Panda 4GB/64GB (DFRobot)	1	○
Sensors			
DVL	A50 (Water Linked)	1	※2
Distance meter	Ping SONAR (Blue Robotics)	2	○
Communication equipment			
Wireless LAN adaptor	WI-U2-433DMS (Buffalo)	1	○
Signal converter (Home Plug - LAN)	Fathom-X Tether Interface Board (Blue Robotics)	1	○
Signal converter (USB - UART)	AE-FT234X (AKIZUKI DENSHI TSUSHO)	3	○
USB hub	M4B-FE1.1S (aitendo)	1	○
Erectorical equipment			
DC/DC convertor	Power supply (Blue Robotics)	1	○
Switch	Switch (Blue Robotics)	2	○
Battery	Litium-ion battery (11.1V-5.2Ah, 3P2S)	1	※3

※○ in the "Availability" column indicate that the product is in stock in Japan.

※1 : Although there are stock of parts, it is unknown whether the assembly has been completed. It takes about one day to assemble.

※2 : There are times when there is no stock in Japan.

※3 : Although there are stock of parts, it takes one day to assemble.

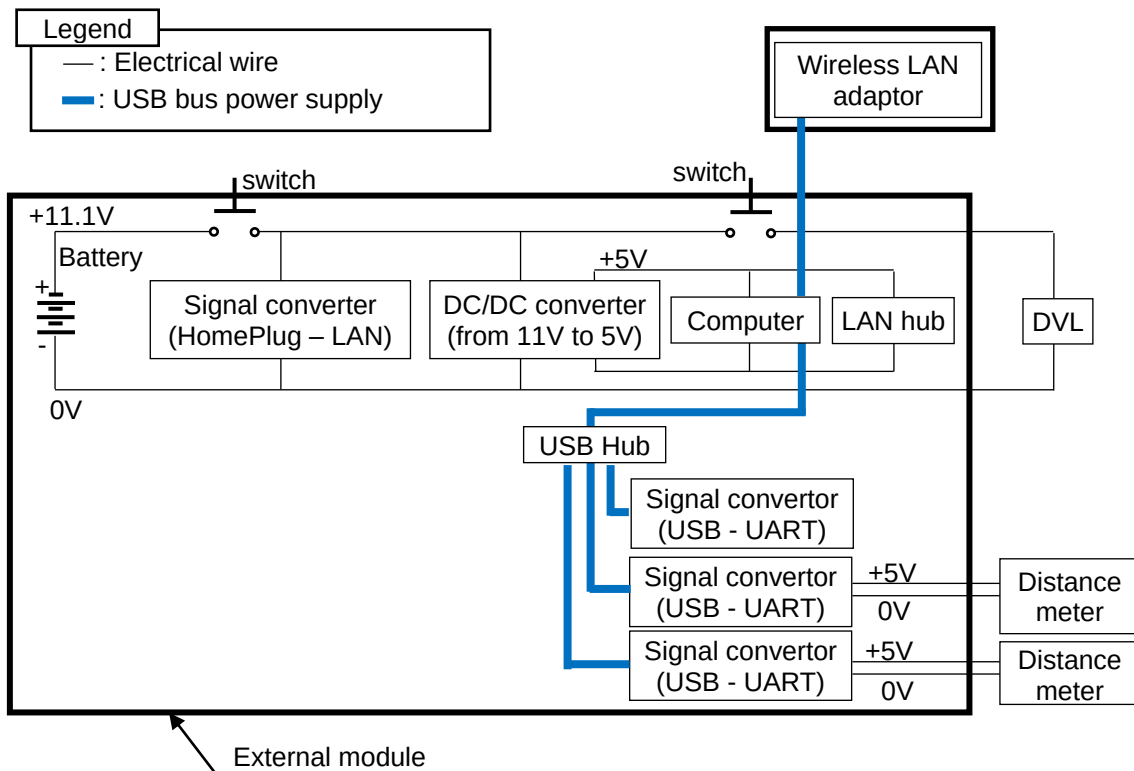


図 5.9 研究初期の外付けモジュールの配電図

Ethernet over wireless LAN,
which only works when the vehicle is on the sea surface.

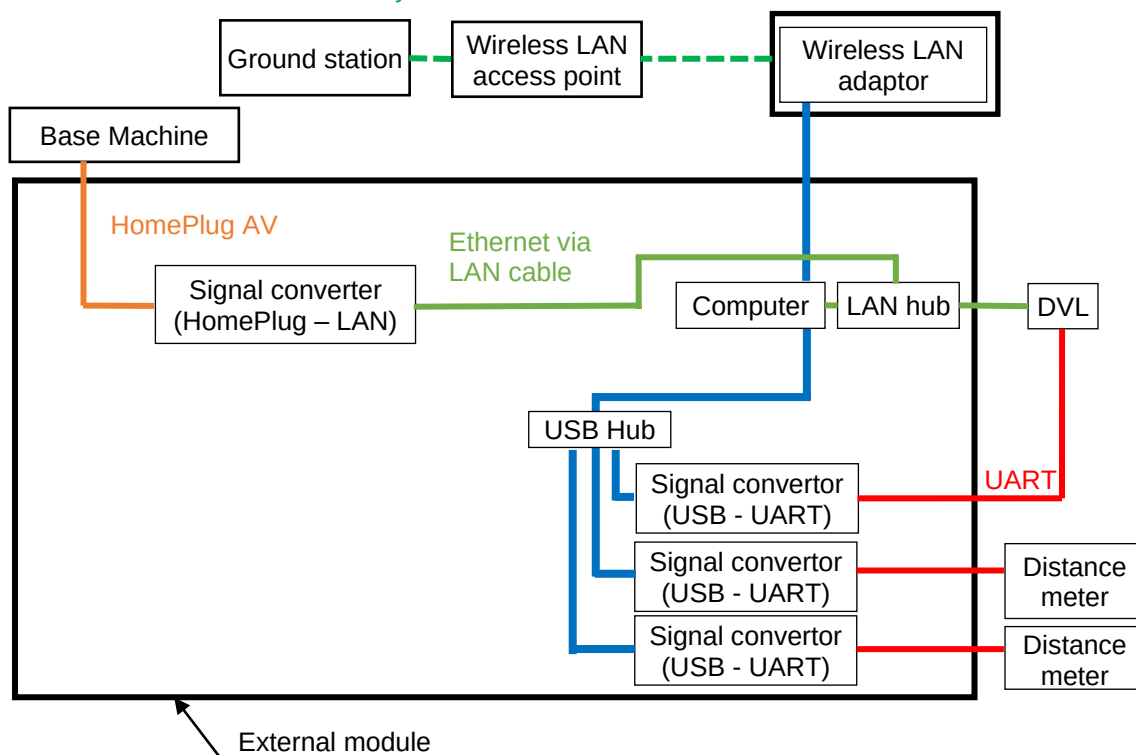


図 5.10 研究初期の外付けモジュールの通信系統図

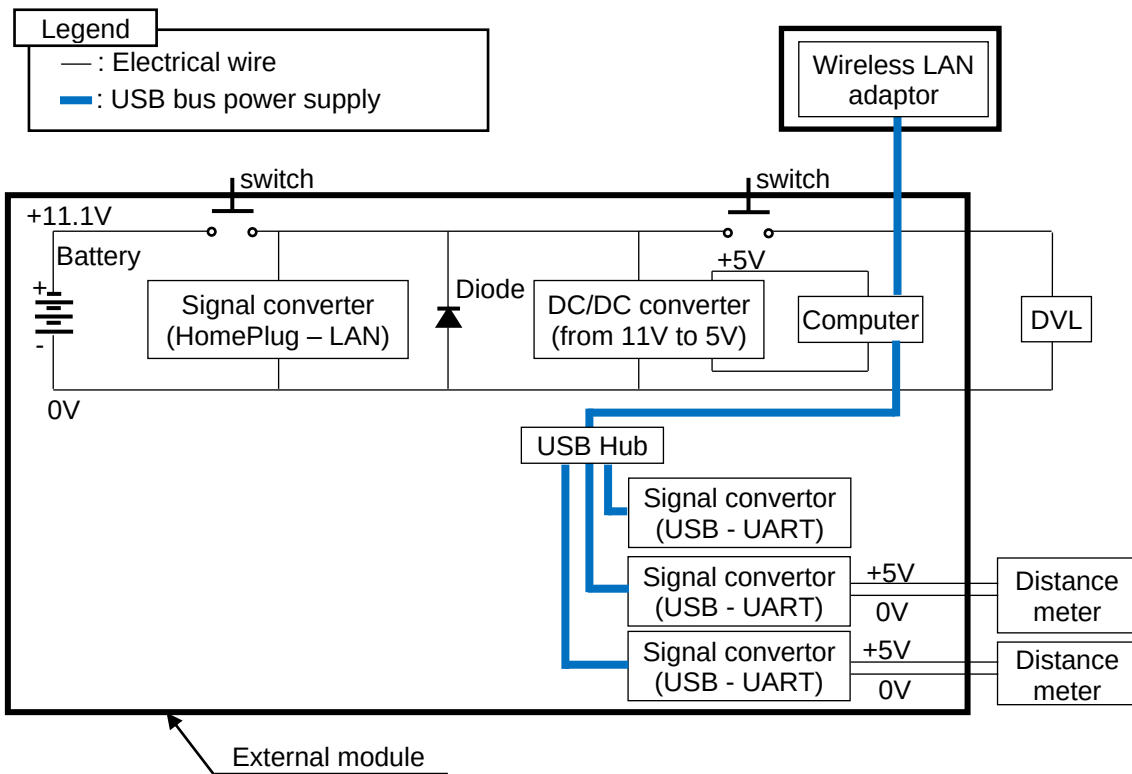


図 5.11 外付けモジュールの配電図

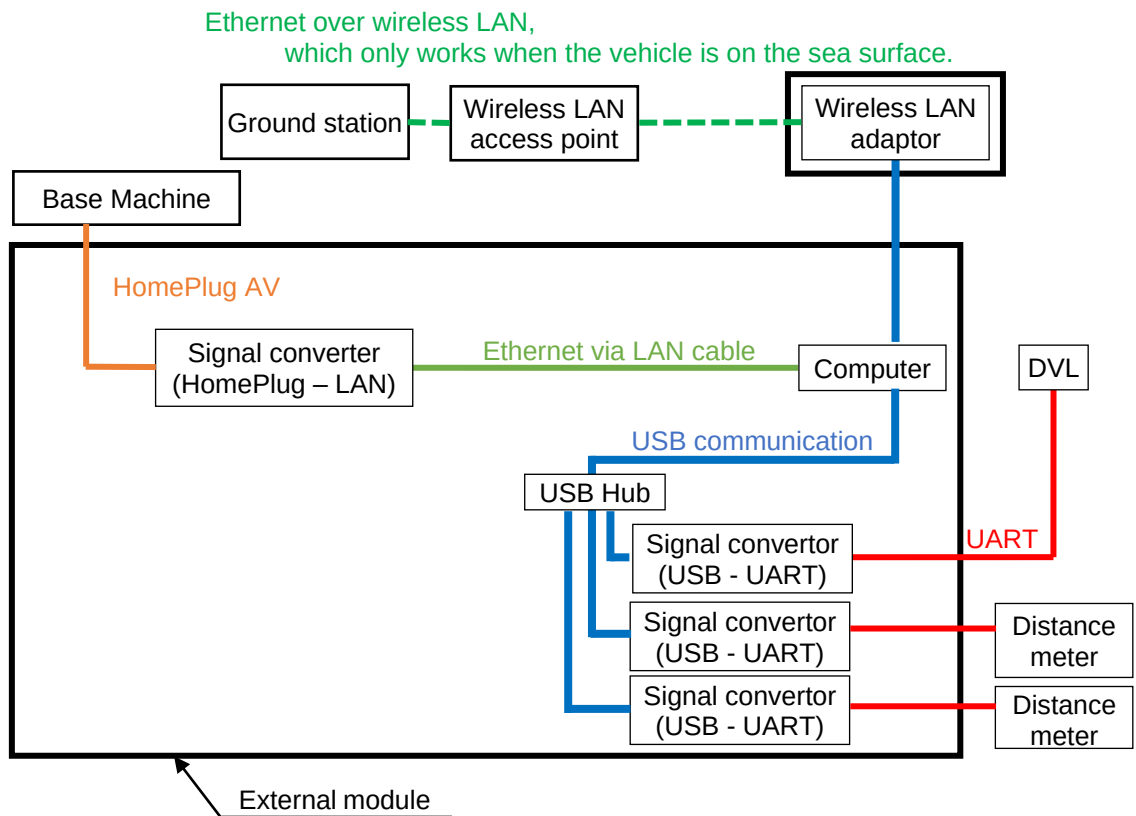


図 5.12 外付けモジュールの通信系統図

5.3 ソフトウェアの構築

自律航行用ソフトウェアについては、大まかに5段階に分けて作成した。機体に設置されたセンサからデータを取得する部分と、その他のセンサからデータを取得する部分、取得したデータから制御値を決定する部分、それをジョイスティック信号として元々の操作ソフトウェアに入力する部分、および、自律航行の開始などの指示を与えるユーザインターフェイス部分である。構成は図 5.13 に示す。

機体に設置されたセンサからのデータは UDP 通信を介し、コンピュータに送られ、元々の操作ソフトウェアが取得している。そこで自律航行用ソフトウェアでは、機体からデータを送信してくるポートからデータを受信することとした。そのままでは、元々の操作ソフトウェアにデータが送られなくなり、通常の操作ができなくなる。そこで、自律航行ソフトウェアは、受信したデータを複製し、他の UDP ポートにループバック出力させた。元々の操作ソフトウェアはそのポートからデータを取ることで、通常の操作が行えるよう設計した。

自律航行ソフトウェアから元々の操作ソフトウェアへの出力は、既存の仮想ジョイスティックデバイス vJoy(著作権者 Shaul Eizikovich)³⁰⁾を利用することとした。これは、MIT License に基づいたソフトウェアである。自律航行ソフトウェアにこのソフトウェアを組み込むことで、計算した操縦量に合わせたジョイスティック信号を出力できるように設計した。

ユーザインターフェイス部分については、CUI 形式とした。キーボードのみで操作できるようにするためである。

制御値の決定については、出力するジョイスティックの 4 軸（前後進、左右移動、上下移動、旋回運動）それぞれについてフィードバック制御を行った。この制御部分については構造物の形状などに合わせ調整する必要がある。

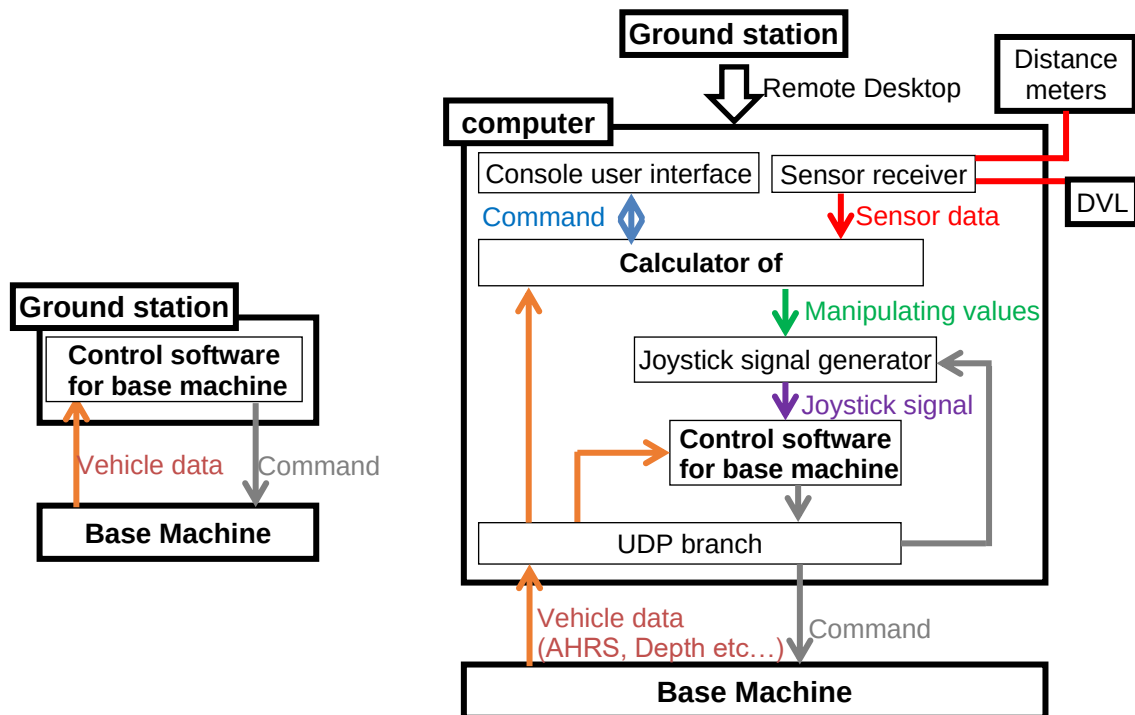


図 5.13 ソフトウェアの構成図（左：ベースマシン改造前、右：改造後）

5.3.1 直立壁面型構造物の点検を想定した距離計を用いた自律航行制御

作業のイメージを図 5.14、経路のイメージを図 5.15 に示す。この作業で水中ロボットは、主に 3 種類の移動を行う。まず図 5.15 中①として示したように潜行する。海底付近まで沈んだのちに、図 5.15 中②として示したように浮上する。海面に浮上した後、図 5.15 中③の様に横に移動する。このとき、方位は壁が機体の（カメラの）正面になる向きとした。ここで、壁からの距離は、水の透明度で決定される。

横の移動量は、違う測線同士で撮影された構造物の範囲が重なるように決定する。

潜行と浮上で同一経路を移動する。これは、喪失防止のためである。潜行時に機体の下側に障害物があれば、機体がそれに載る形になるが、機体下面にはケーブルなどは出しておらず、引っ掛かる可能性は比較的低い。一方、浮上中に上方に障害物があった場合には機体上面が障害物にぶつかる。上面は無線 LAN アダプタやケーブルなどがあり、引っ掛かる可能性が高い。そこで浮上の経路は既に潜行時に通過し、固定された障害物がないことが確認された経路をとることとした。

前後方向の制御量は、距離計の計測値から決定した。他の計測方法に DVL の水平位置の推定があるが、これは、時間が経過するごとに誤差が蓄積する。そのため、長時間の作業では構造物との位置関係を正常に計測できずに衝突する可能性がある。距離計で比較的正確に構造物との距離を計測することで、構造物に衝突することなく、構造物の近傍での移動を実施する。

港湾で多く用いられる鋼矢板による構造物の壁面は図 5.14 の様に凹凸形状を繰り返している。壁面から遠いと、濁りにより、撮影画像からでは点検できないため、鋼矢板近傍を航行したい。ところが、機体中心からの前方 1 点のみの距離計測では、壁面の形状変化への追従が遅れる可能性があるため、距離計は前方に向けて機体の左右に 2 つ取り付けることとした。壁面との距離は、これら 2 つの距離計の計測値のうち、短い方を採用するものとした。

機体の左右方向の制御量については、DVL の水平位置の推定値から決定した。他に計測手段がないことと、衝突の危険には関係しないため前後方向に比べ精度が不要であるためである。

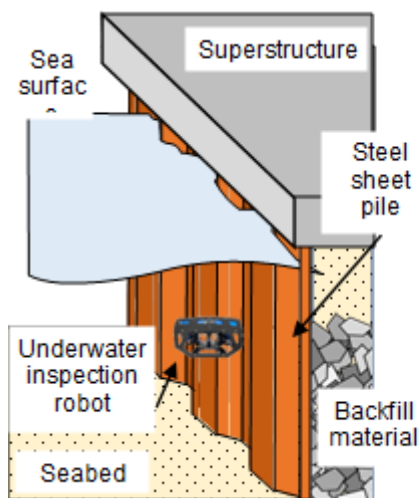


図 5.14 作業のイメージ

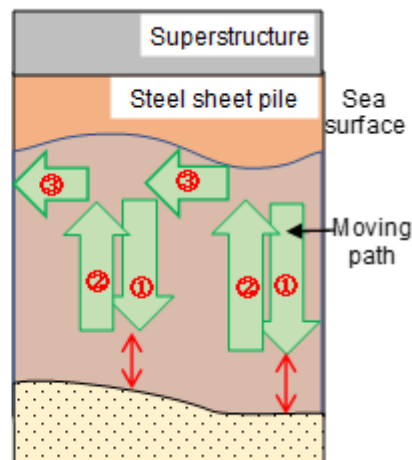


図 5.15 経路のイメージ

上下方向の制御量については、DVL の上下方向の速度の計測値から決定した。他に、DVL による位置推定、高度計測を用いる方法が考えられるが、位置推定については、精度が出にくいと、高度計測については、港湾の場合、設計断面の形状変化で、海底の高さが一定でない場合があること、災害時などには流出物があり海底が計測できない可能性があることから、採用しなかった。

②の潜行を終了し浮上を開始するタイミングの判定には DVL の高度計の値を用いた。海底から一定距離以下となった時、浮上を開始する。水圧計による方法もあったが、海底深度が設計値から変動している場合にも衝突せずに対応できるため、この方法を採用した。

③の浮上を終了し、横移動を開始するタイミングは、水圧計の計測深度が一定値以下になったときとした。

方位については、DVL の推定値を採用した。他に水中ロボットの AHRS があったが、水平位置の推定で、DVL の計測値を使用しているため、そちらを採用した。

自律航行プログラムの構成イメージを図 5.16、各移動時の指示値を図 5.17 に示す。

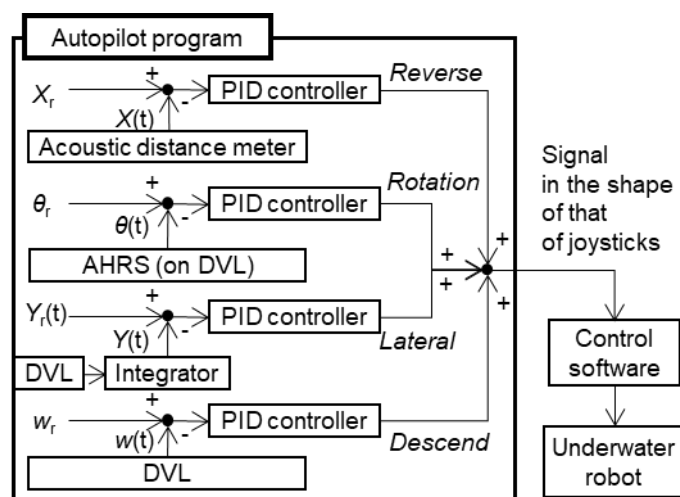


図 5.16 自律航行プログラムの構成イメージ

	Moving path		
	①	②	③
Reference Values	X_r	X_c	
	θ_r	θ_c	
	Y_r	$n Y_c$	$(n+1) Y_c$
	w_r	w_c	$-w_c$
		$-w_c$	0

Conditions when direction change...

- From ① to ② : $Z(t) > z_{c1}$
- From ② to ③ : $Z(t) < z_{c2}$
- From ③ to ① : $Y(t) > Y_r(t)$

図 5.17 各移動経路での指示値

ただし、図中 L_r : 構造物との指示値(reference value), θ_r : 機体方位の指示値, Y_r : 機体左右方向の水平位置の指示値, w_r : 機体上下方向の速度の指示値, L : acoustic distance meter で計測された壁との距離のうち短い方, θ : AHRS で計測された方位, Y : DVL で計測された機体左右方向の水平位置, w : DVL で計測された機体上下方向の速度, *Forward* : 機体を前進させるジョイスティックの入力の大きさ, *Yaw* : 機体を右旋回させる入力, *Lateral* : 機体を右に移動させる入力, *Descend* : 機体を沈める入力である。

L_r , θ_r は常に一定値を指示値とした。カメラと構造物の距離が一定であれば、その後の変状検査が容易となる。潜航時については上下に一定速度 w_c で移動し、横には移動しない。機体の鉛直方向位置 $z(t)$ が計画範囲の最深部 z_{c1} に達した後、浮上を開始する。浮上時は、一定速度 $-w_c$ で移動し、横には移動しない。 $z(t)$ が計画範囲の最浅部 z_{c2} に達した後、横に移動する。次の計測範囲に移動するときは、上下は移動せず横に一定距離 L_c を横移動する。横方向距離は DVL で計測される速度を積分し算出した。横移動開始 t_0 から後の移動距離 $y(t) - y(t_0)$ が、計画する測線間隔 y_c に近づいた後、一連のサイクルを最初から繰り返す。

5.3.2 直立壁面型構造物の点検を想定した車輪を用いた自律航行制御

スラスタの出力を調整することで、構造物と一定の距離を保つのではなく、5.3.1 に示したように幾何学形状的に構造物とロボットの距離を保つ方法を検討した。作業のイメージを図 5.18 に示す。

水中ロボットの左右にガイドアームを設置し、スラスタで壁の向きに推力を発生させることで、アームを壁面に押し付け、壁面との距離を一定に保つようにした。構造物壁面の不陸に引っかかり、移動できない可能性を考慮し、アームの先端に車輪を設けた。車輪については詳細を 6.3.3 で記述するが、複数の種類を取り付け検討した。車輪を取り付けた水中ロボットの 1 例を図 5.19 に示す。

車輪方式では、構造物に車輪を押し付けた状態で潜行し、高度計の計測高度が一定以下になると、構造物に車輪を押し付けるのをやめて浮上することとした。横移動については、機体が水面にある状態で操作者の目視による遠隔操作によって行うことを想定している。

この方法では、ベースマシンのセンサのみで自律航行を実施することを目標に検討した。安価に装置を準備したいという要望のための検討である。

前後方向の制御量は、一定値とした。作業開始前に水面での遠隔操作で、車輪を壁面に押し付けた状態を保つことができる出力を設定することとした。

機体の左右方向の位置の保持については、車輪の横方向の摩擦で保持するものとした。超音波距離計を用いた制御と違い、スラスタによる制御は行わないことを想定している。上下方向の制御量については、水圧計の計測値から上下方向の速度を算出し決定した。なお、潜行を終了し浮上を開始するタイミングの判定については、高度計を用いた。

方位の保持については、壁に押し当てた車輪により、方位が変わらないようにした。超音波距離計を用いた制御と違い、スラスタによる制御は行わない。制御の構成イメージを図 5.20 に示す。

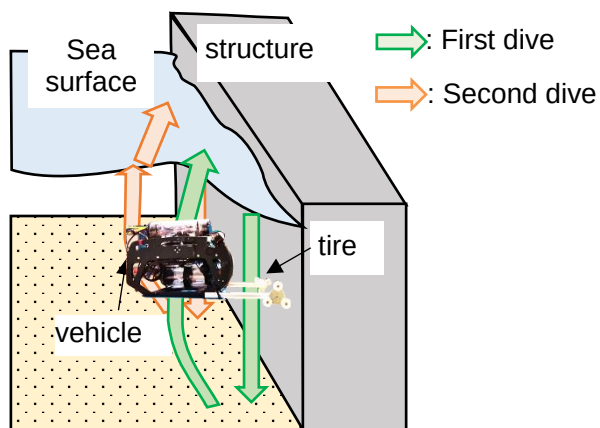


図 5.18 車輪式の作業のイメージ

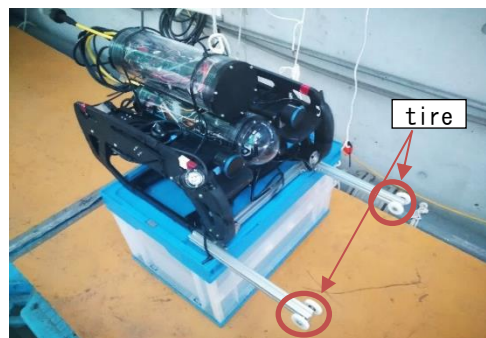


図 5.19 車輪を取り付けた水中ロボットの例

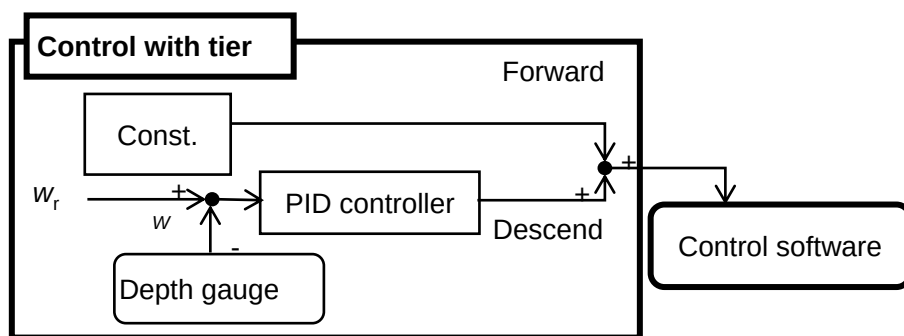


図 5.20 車輪式の制御の構成イメージ

5.3.3 杭型構造物の点検

自律航行で水中ロボットが移動する経路を図 5.21 のように設定した。ただし、本検討では開始地点までの誘導は水面で遠隔操作を行い、その後、自律航行を開始するものとした。図中、 L : 事前に設定する杭とカメラまでの撮影距離、 h_b : 事前に設定する撮影範囲下限の海底からの高さ、 X : 開始時の水中ロボットの前後方向の位置（原点は杭の中心）、 Y : 開始時の水中ロボットの左右方向の位置（原点は杭の中心）、 Z : ロボットの鉛直方向位置（原点は水槽では水面）である。

杭状の構造物では、前後方向、左右方向の推力の制御に DVL で計測した水平位置を用いることとした。5.3.1 などの方式と比べ、計測誤差が影響する可能性が大きいため、可能な限り構造物との距離をとる必要がある。上下方向の出力、旋回方向の出力の制御については、5.3.1 と同様である。制御のダイアグラムを図 5.22 に、各タイミングの指示値を図 5.23 示す。

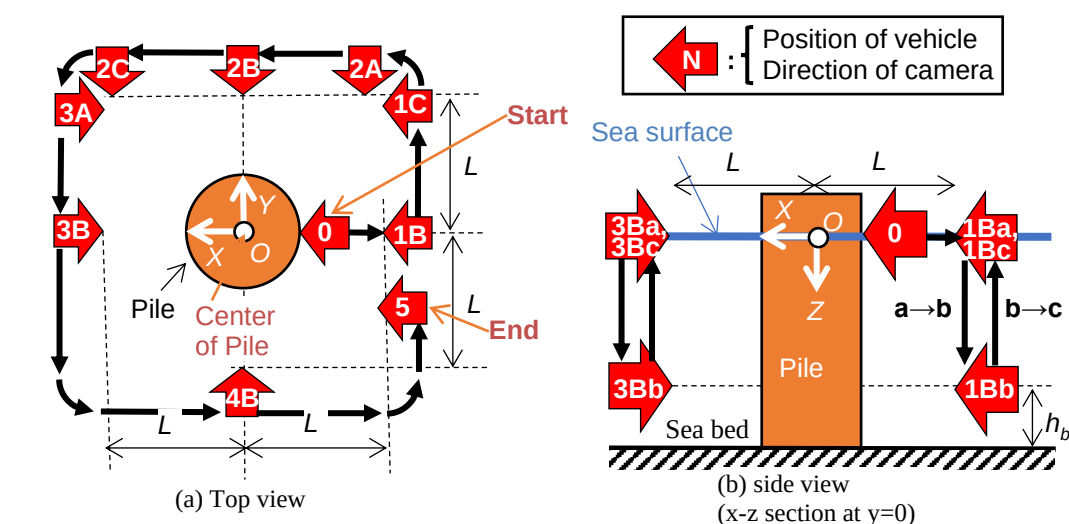


図 5.21 杭状構造物の点検経路のイメージ

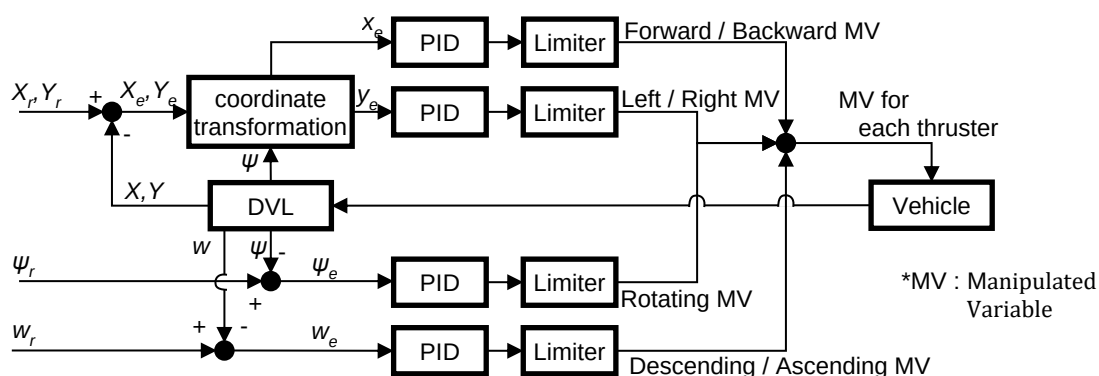


図 5.22 杭状構造物の制御ダイアグラム

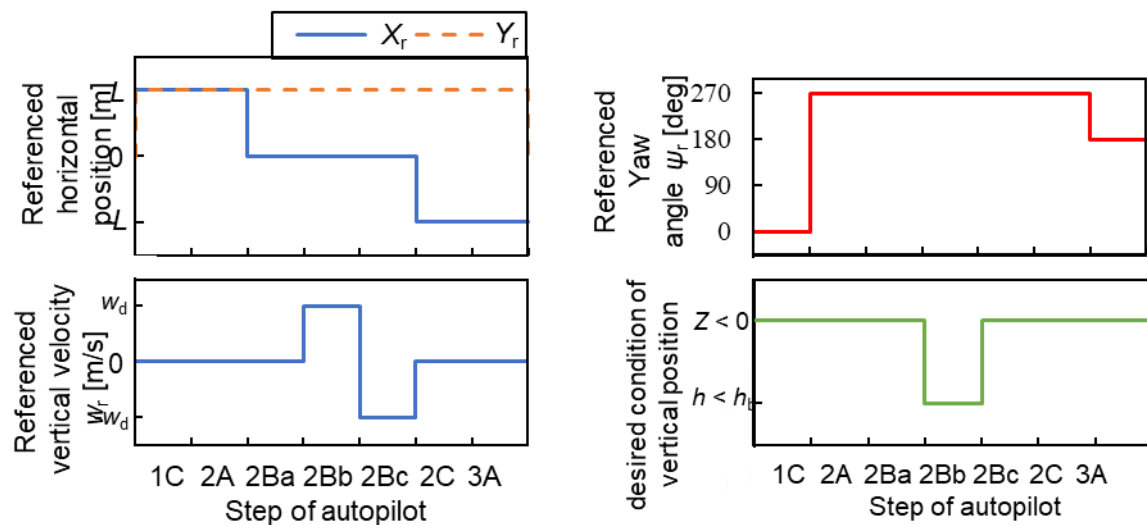


図 5.23 杭状構造物を対象とした制御の指示値

5.4 まとめ

本章では，市販の小型 ROV をベースマシンとして，自律型水中ロボットを構築した．まず，ベースマシンの交換性を高め，故障時等の作業中断を短縮するため，ベースマシン，センサを選定し，それらハードウェアの構成を実施した．詳細を以下に列記する．

- ・ベースマシンとして BlueROV2（Blue Robotics 社）を選定した．
- ・ベースマシン内部は改造せず，外付けモジュールに自律航行に関するシステムを組み込んだ．
- ・外付けモジュール内の自動制御用コンピュータとして Latte Panda 4GB/64GB（DFRobot 社）を選定した．
- ・水平位置推定のために搭載する DVL として，A50（Water Linked 社）を選定した．
- ・構造物との相対位置の計測手段として，音波方式の距離計 Ping sonar（Blue Robotics 社）を選定した．
- ・ロボットの上下方向位置の計測のための水圧計はベースマシン搭載の Bar30（Blue Robotics 社）を使用した．
- ・方位推定のための AHRS は DVL A50 組込みのものを使用した．
- ・選定した機器を実装した．

その後，自律航行用のプログラムを作成した．自律航行プログラムの構成は次の通りである．

- ・ベースマシンのバージョンへの対応性を高めるため，元々の操作用ソフトウェアは変更せず，それにジョイスティック信号を入力する機能をもつ自律航行プログラムを作成した．
- ・ジョイスティック信号の出力を含め，主な機能は 5 つである．
- ・機体に設置されたセンサからデータを取得する機能を作成した．
- ・その他のセンサからデータを取得する機能を作成した．
- ・自律航行の開始などの指示を与えるユーザインターフェイスを作成した．
- ・取得したデータからスラスト出力の制御値を決定する機能について，直立壁型構造物を対象とし超音波距離計と DVL を利用したもの，直立壁型構造物を対象とし車輪を利

用したもの、杭型構造物の目視点検作業を対象にそれぞれ作成した。

参考文献

- 1)Blue Robotics 社 HP , <https://bluerobotics.com/store/rov/BlueROV2/>, 2022-10-28 参照.
- 2) SEKIDO HP, https://sekido-rc.com/blog/technical/faq_171110_002/, 2022-10-28 参照.
- 3)Chasing-Innovation Technology 社製,Chasing 社 HP, <https://chasing.jp/product/chasing-m2/>, 2022-10-28 参照.
- 4) QYSEA 社 HP, <https://www.qysea.com/products/fifish-v6/>, 2022-10-28 参照.
- 5)Power Vision 社 HP, <https://www.powervision.me/jp/product/powerray/>, 2022-10-28 参照.
- 6)Github HP, <https://github.com/bluerobotics>, 2022-10-28 参照.
- 7) Github HP , <https://github.com/OpenROV/>, 2022-10-28 参照.
- 8)QGroundControl ドキュメント, https://docs.qgroundcontrol.com/master/en/getting_started/download_and_install.html, 2022-10-28 参照.
- 9)ADVANTECH 社 HP, <https://buy.advantech.co.jp/Embedded-IoT-Products/MIO/model-MIO-5271Z2-4GS9A1E.htm>, 2022-11-01 参照.
- 10)iBase 社 HP, https://www.ibase.com.tw/jp/product/category/Embedded_Computing/Single_Board_Computer/3_5_Single_Board_Computer/IB919, 2022-11-01 参照.
- 11)デイリーガジェットHP , <https://daily-gadget.net/2020/01/07/post-10013/>, 2022-10-28 参照.
- 12)rasberry pi HP, <https://datasheets.raspberrypi.com/rpi4/raspberry-pi-4-datasheet.pdf>, 2022-10-28 参照.
- 13)latte panda HP, <https://www.lattepanda.com/lattepanda-v1>, , 2022-10-28 参照
- 14)px4 HP, <https://discuss.px4.io/t/qgc-on-raspberry-pi/17270/9>, 2022-10-28 参照.
- 15)Water Linked 社 HP, <https://www.waterlinked.com/dvl/dvl-a50>, 2022-10-28 参照.
- 16)Eco Logger 社 HP,<https://www.echologger.com/products/single-frequency-echosounder-shallow>, , 2022-10-28 参照.
- 17)Tritech 社 HP, <https://www.tritech.co.uk/product/tritech-micron-echo-sounder-ultra-compact-altimeter>, 2022-10-28 参照.
- 18)Blue Robotics 社 HP, <https://bluerobotics.com/store/sensors-sonars-cameras/sonar/ping-sonar-r2-rp/>, 2022-10-28 参照.
- 19) Blue Robotics 社 HP,<https://bluerobotics.com/store/sensors-sonars-cameras/sensors/bar30-sensor-r1/>, 2022-11-03 参照.
- 20)GoPro 社 HP, <https://gopro.com/ja/jp/shop/cameras/max/CHDZH-202-master.html>, 2022-11-03 参照.
- 21) タジマモーターコーポレーション HP, <https://www.tajima-motor.com/gopro/faqs/ans/max/10006.html>, 2022-11-03 参照.
- 22)日本機械工学会：機械工学便覧 基礎編 α3 材料力学, 2007.
- 23) 大阪市立工業研究所:プラスチック読本 (改訂第2 2 版) ,2019.
- 24)東レプラスチック精工 HP, <https://www.toplaseiko.com/oshidashi/data/>, 2022-10-28 参照.
- 25)Blue Robotics 社 HP, <https://bluerobotics.com/store/comm-control-power/tether-interface/fathom-x-tether-interface-board-set-copy/>, 2022-11-03 参照.
- 26) 秋月電子通商, AE-FT234X 説明書
- 27) Blue Robotics 社 HP,<https://bluerobotics.com/store/comm-control-power/control/bec-5v6a-r1/>, 2022-11-03 参照.
- 28) TDK HP, <https://www.tdk.com/ja/tech-mag/power/003>, 2022-11-03 参照.
- 29) ローム, アプリケーションノート スイッチングレギュレータ IC シリーズ 降圧コ

ンバータの効率,
https://fscdn.rohm.com/jp/products/databook/applinote/ic/power/switching_regulator/buck_converter_efficiency_app-j.pdf, 2022-11-03 参照.
30)Github HP, <https://github.com/shauleiz/vJoy>, 2022-11-08 参照.

6 水槽試験の実施

6.1 性能確認試験の実施

選定，もしくは検討の対象としたセンサについて性能確認試験を実施した．以下では，方位計測のためのセンサの精度確認，選定，水圧計，DVL の精度確認を実施した．

6.1.1 方位計測のためのセンサの性能確認

方位計測のためのセンサの精度確認試験を実施した．結果として，AHRS の計測した角速度を積分し，方位を推定する方法を選定した．他に，地磁気方位計で磁北を計測する方法を検討した．水中ロボットに搭載した状態で，それぞれの方法で方位を同時に計測し，その特性を比較する試験を実施した．ただし，地磁気方位計の分解能は 1 度であった．

(1) 水槽水面での静置・スラスト停止状態での試験

機体を室内の水槽水面に配置し，ロープで機体の位置，姿勢を固定し，静置した状態で計測を行った．このとき，水面は静穏であった．その状態で 10 分間，サンプリングレートは 0.1 秒間隔，3 回の計測を実施した．この間，水中ロボットはスラストを動作させていない．水槽中には鋼製の構造物が配置されているが，それらからはそれぞれ 2m 以上離れた位置に配置した．その時の実験の状況を図 6.1，試験結果を図 6.2 に示す．AHRS は初期角度を計測する方法はないが，今回は比較のため，初期角度は地磁気方位計の計測開始時の値を採用し，グラフに表示している．

2 回目，3 回目では，静置状態で，かつ，スラストが停止している状態では，2 つのセンサに精度の優劣は見られなかった．

スラストの磁気や，鋼構造物の影響を受けない今回の場合，地磁気方位計の計測値は，非常に安定していた．計測値は一定，もしくは分解能と同じ範囲で変動したのみであった．

AHRS については，時間変動が見られたものの，変位は全て 0.5 度未満であった．地磁気方位計の分解能の半分以下であり，この変動は，地磁気方位計に計測精度の面で劣るものではない．ドリフトの傾向はそれぞれ 0.008 度/分，0.012 度/分であった．これは，切片を計測開始時角度として，最小二乗法で線形近似した時の傾きである．

1 回目については，地磁気方位計，AHRS とともに他の実験ケースと比べ値の変動が大きかった．地磁気方位計では ± 1 度の間で変動が，計測を終了した 600 秒まで継続して確認された．AHRS ではドリフトの傾向が 0.044 度/分となった．基盤やセンサ，防水容器内の温度の影響もしくは，静定時間内の誤差と考えられる．基盤温度の時間変化を図 6.3 に示す．なお，この時，水温は 17.7℃程度であった．1 回目は，水中ロボット稼働開始から比較的時間が短く，基盤の温度が上昇している途中であった．一方，2，3 回目は温度が安定していた．



図 6.1 静置・スラスト静止状態での方位計測実験

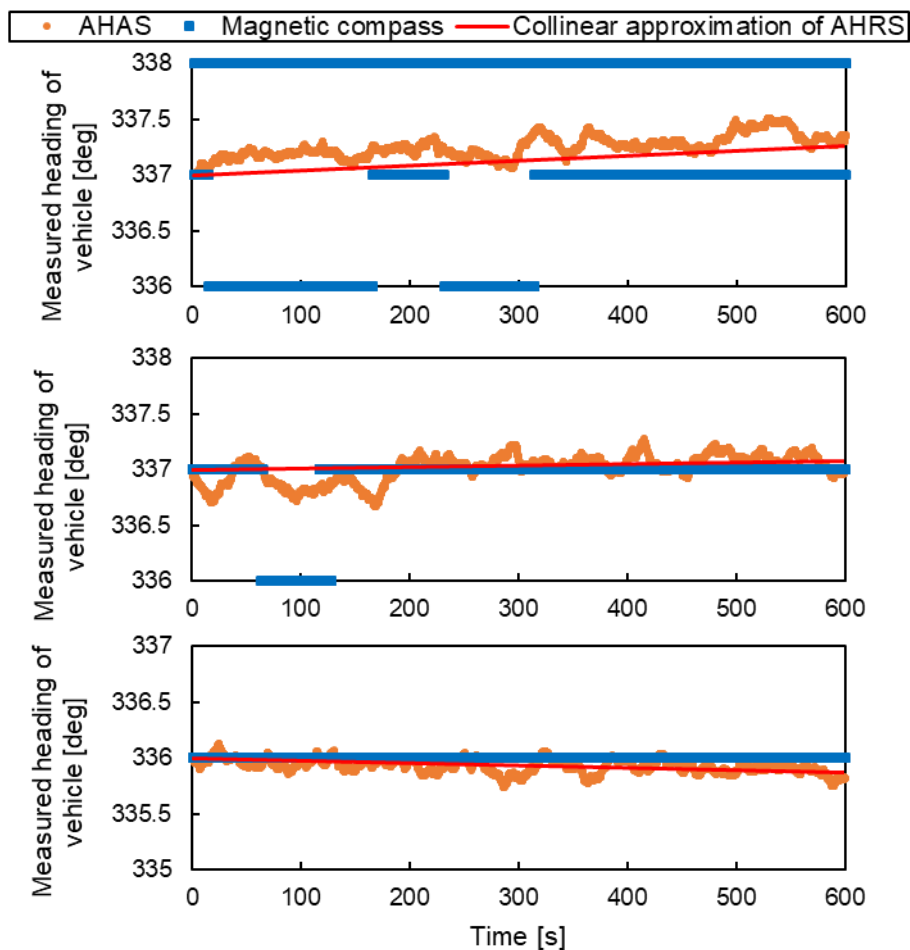


図 6.2 静置・スラスト静止状態での計測方位の比較. (上から 1 回目, 2 回目, 3 回目)

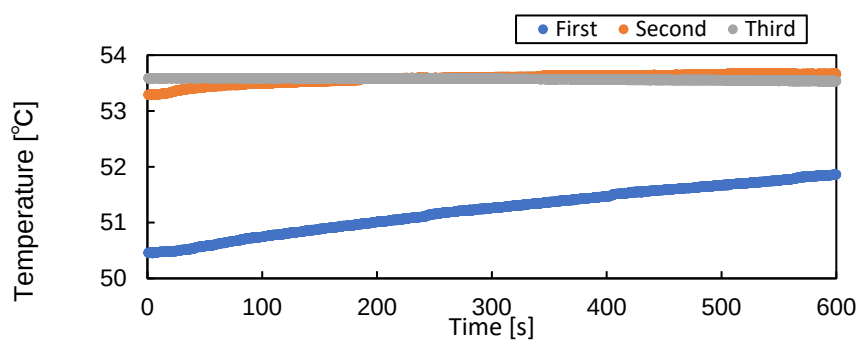


図 6.3 基盤の温度の変化

結果として, 本試験から, 両センサによる計測精度の優劣は判断できなかった. ただし, 電子機器の稼働による温度変化でセンサの計測値が影響を受け, 計測が安定するまでに時間を要することが示された. センサの起動直後は計測値が比較的安定していないが, 本試験ではその偏差は最大 ± 1 度で, この程度であれば運用上の問題になるとは考えていない.

(2)陸上での静置・スラスト静止状態での起動直後の計測試験

起動後からどの程度の時間経過で、方位計測の値が運用上問題なくなるのかを検討するため、起動後からの時系列での、自律制御用コンピュータ基盤の温度変化、方位の計測値の記録を実施した。機体を陸上に静置した状態で計測を行った。具体的には、鉄筋コンクリート床の上にプラスチック製の箱を重ね、地上高さ 1m のところに機体を設置した。これは、他に周囲 1m に鋼構造物がない状態を作るためである。計測時間は 90 分、1 回実施した。実験は、室内で直射日光は当たらない環境である。実験時の室内気温は、16.6℃であった。その状況を図 6.4 に、その結果を図 6.5 に示す。

その後、基盤温度が比較的高い状態で、バッテリーを切断、1 分後に再接続し 30 分間計測を実施した。その結果を図 6.6 に示す。



図 6.4 起動直後のセンサの計測試験の実施状況

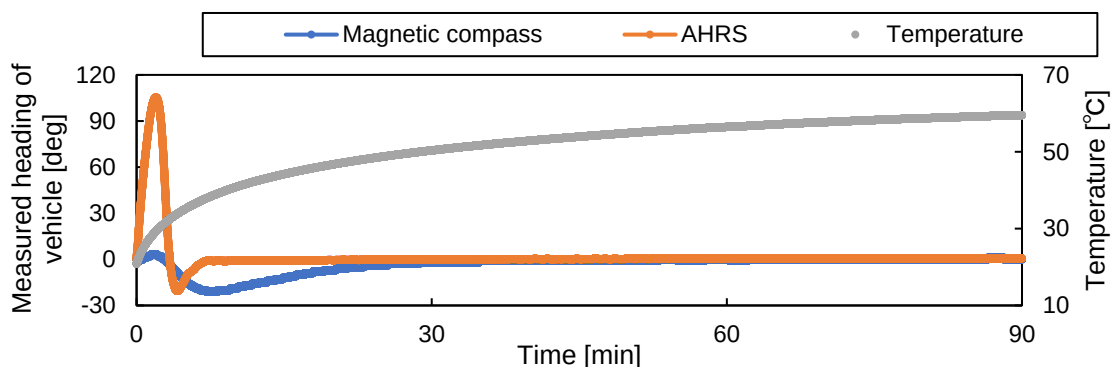


図 6.5 起動直後のセンサの計測試験の実施状況

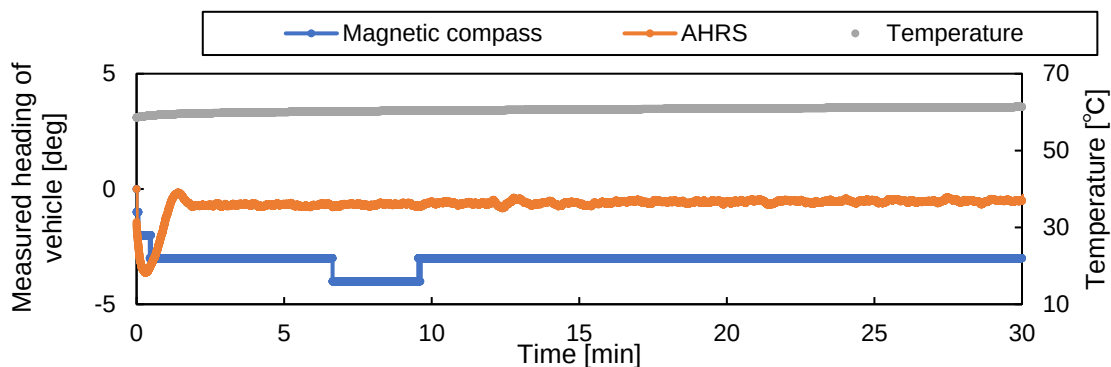


図 6.6 再起動直後のセンサの計測試験の実施状況

再起動後の試験結果である図 6.6 から、温度によらないセンサの静定時間は AHRS で 2 分程度、地磁気方位計は 1 分未満であった。このロボットは、バッテリー駆動で、バッテリーの接続から、接続確認、海中への投入、その後、作業開始までに、経験上、5 分以上の時間を必要とする。したがって、海中への投入時には、双方のセンサとも問題なく作動している状況であると考えられる。なお、安定後の地磁気方位計と AHRS の値が違うが、これは AHRS が機体の角度変化という相対値を計測しているため初期値を設定する必要があるが、その初期値と磁北に違いがあったためである。実際の運用では、機体を既知の方位に向けた状態で AHRS の値を初期化する必要等の注意必要である。

一方、基盤が高温になっていない状態からの起動後の状態を示す図 6.5 では、両方のセンサとも、静定までに長い時間が必要であった。AHRS で 7 分程度、地磁気方位計は 30 分程度であった。実際の使用状況を鑑みると、地磁気方位計では、運用開始後しばらくは誤差が生じる可能性が示された。以上の結果から、方位の計測には AHRS を用いることとした。

6.1.2 水圧計の精度確認

水圧計の精度確認を水槽で実施した。まず、気中で 30 秒間大気圧の計測を実施し、計測値のばらつきを確認した。次に機体を水槽に投入した。水面から水底にスラストで移動させた後、10 秒間着底させ、その間の水深を計測した。なお、実際の水深は 4.50m であった。水圧計の設置位置が、ロボット底面から 0.17m のため、計測値の真の値は 4.33m である。ただし、サンプリングレートは 0.1 秒/回である。これを 5 回繰り返した。ただし、この試験は、水中ロボットが有線の状態で行った。計測結果を表 6.1 に示す。その平均は水深換算で 4.3705m となり誤差は +1% であった。潜行ごとに計測値の 10 秒平均値のバラツキは、5 回の標準偏差は水深換算で 4.1mm であった。平均誤差が 0 となるように、水圧計の計測電圧から水深に変換するための係数を修正することとした。バラツキは水中ロボットの制御の際のオーバーシュート量よりも非常に小さい値であるため、制御に影響を及ぼさないと推測された。よって水圧計は、ベースマシンに搭載されていたものを使用することで問題はないと判断した。

表 6.1 水圧計計測試験の結果

Case	Average		Deviation
	Measured pressure [kPa]	Estimated water depth [m]	Estimated water depth [mm]
In air	103.979	0	2.379
1	147.622	4.3643	5.744
2	147.657	4.3678	5.505
3	147.694	4.3715	4.034
4	147.704	4.3725	5.024
5	147.742	4.3763	4.659
Total	147.684	4.3705	6.495

6.1.3 DVL の精度確認

DVL (Doppler Velocity Logger : ドップラー式対地速度計) の精度確認については、その位置推定の機能について、精度確認を 2 種類実施した。

(1) 水平移動距離の計測精度

移動距離の精度の確認のため、遠隔操作にて、水面で、水中ロボットを一定の直線区間を遠隔操作で航行させた際の DVL の計測結果から移動距離を推定し、実際の移動距離と比較した。移動距離は、水槽の幅方向で壁面から反対の壁面まで 10m の間を移動させた。ただし開始時、終了時ともロボットの前面を壁面に押し付ける状態としたため、ロボット前端からセンサまでの距離 0.35m の 2 倍の長さだけ移動距離が小さくなるため、真値は 9.30m となる。計測は 5 回実施した。

結果を表 6.2 に示す。推定結果は真値 9.30m に対し、平均 9.61m、標準偏差 0.048m であった。真値より、推定移動距離が大きく計測される傾向で計測誤差は+3.3%であった

直立壁面を対象とした場合の自律航行では移動距離を用いるのは、横方向となる。横方向の移動距離に誤差が生じると撮影写真の横方向のオーバーラップに影響するが、これは、計測線ごとの横方向の間隔を調整することで、対処が可能である。

表 6.2 DVL による水平移動距離の計測精度

Case	1	2	3	4	5	Average	Deviation
Length[m]	9.64	9.53	9.67	9.62	9.59	9.61	0.05

(2) 模擬作業試験での精度検証試験

精度検証の 2 つ目は、AHRS のドリフトによる位置推定の誤差を確認するため、構造物がないところで作業模擬と同様の経路で自律航行させる精度検証を行った。その際、自律航行の前に、水中ロボットを壁面の特定の箇所に押し当て、DVL の計測結果から水平位置を推定した。その状態から、遠隔操作で 180 度回頭、1m 前進させた後、作業模擬と同様の経路で自律航行させた。自律航行後、最初に水平位置を計測した箇所に水中ロボットを遠隔操作で移動し、位置計測を行った。その時の DVL の計測した軌跡を図 6.7 に示す。最初の計測から、終了後の計測までの時間は 190.8 秒であった。最初の水平位置の推定値から終了後の推定値の誤差は、X 方向は -0.17 m、Y 方向は -0.20m であった。

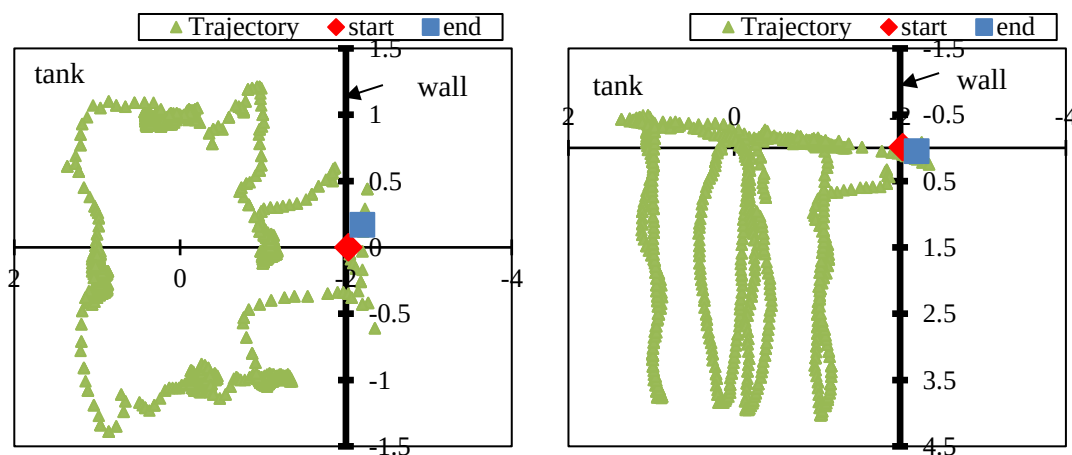


図 6.7 DVL の水平位置推定精度確認試験 (左 : 上面図, 右 : 側面図)

6.2 パラメータチューニング

6.2.1 概要

PID 制御器の係数調整のため、水槽で限界感度法によりチューニングを実施した。

PID 制御器では、制御量 $u(t)$ は次の式で決定される。ここで、 k_p, k_i, k_d はそれぞれ、PID コントローラの比例、積分、微分項の係数、 $r(t)$ は深度など、それぞれの指示値、 $y(t)$ はそれぞれの計測値である。

$$u(t) = k_p(r(t) - y(t)) + k_i \int (r(t) - y(t)) dt + k_d \frac{d(r(t) - y(t))}{dt}$$

限界感度法は、PID 制御器の係数をチューニングする方法で、手順は次のように実施される。

- ・ P 制御のみ (k_p は任意、 $k_i = 0$ 、 $k_d = 0$) で、常用範囲にある一定の目標値をステップ入力として与え、機体を制御する。
- ・ k_p を大きくしながら、制御を繰り返す。
- ・ k_p が小さいうちは、計測値 $y(t)$ は最初にオーバーシュートが発生する場合があるが、その後、一定値に収束する。
- ・ k_p がある値より大きくなった後、計測値 $y(t)$ は収束せず、持続的に振動するようになる。
- ・ 振動が持続する中で、 k_p が最も小さい状態を安定限界という。
- ・ 限界感度法では、経験則により、安定限界の時の P 制御の係数 k_{pc} と振動周期 T_c を用い、PID 制御器の係数を表 6.3 のように決定する。

表 6.3 限界感度法による PID 係数のパラメータ調整¹⁾

	k_p	$T_i = k_p / k_i$	$T_d = k_d / k_p$
P controller	$0.5 k_{pc}$	0	0
PI controller	$0.45 k_{pc}$	$0.83 T_c$	0
PID controller	$0.6 k_{pc}$	$0.5 T_c$	$0.125 T_c$

なお、限界感度法によるチューニングは簡易的な方法として有効だが、その後、補正が必要となる場合がある。

チューニングを制御軸ごとに実施した。はじめに深度方向の位置制御について、パラメータチューニングを行った。水面での運動と水中のそれとは抵抗が変化することから、他の軸のチューニングを、機体を水中に沈めた状態で実施するためである。

次に、方位制御について実施した。2 番目に実施したのは、方位の操作時に連成して生じる他の制御量（前後・左右水平位置）の変位が、比較的小さいためである。なお、深度制御（目標値水深 1m）を有効にして安定した後に開始した。目標値は初期状態より上から見て時計回りに 90 度とした。

3 番目に、前後方向位置制御について実施した。横方向水平位置操作に比べて、他の制御量への連成が小さいためである。なお、深度、方位制御を有効にして安定した後にチューニングを開始した。目標値は、初期状態から 1 m 前方とした。

最後に左右方向位置制御について実施した。なお、深度、方位、前後方向位置制御を有効にして安定した後に開始した。初期状態から 1 m 横を目標とした。

6.2.2 結果

(1) 深度方向の位置制御のチューニング

k_p を変更しながら P 制御した際の深度の時系列データを図 6.8 に示す．なお，目標値は 0.5m として実施した．

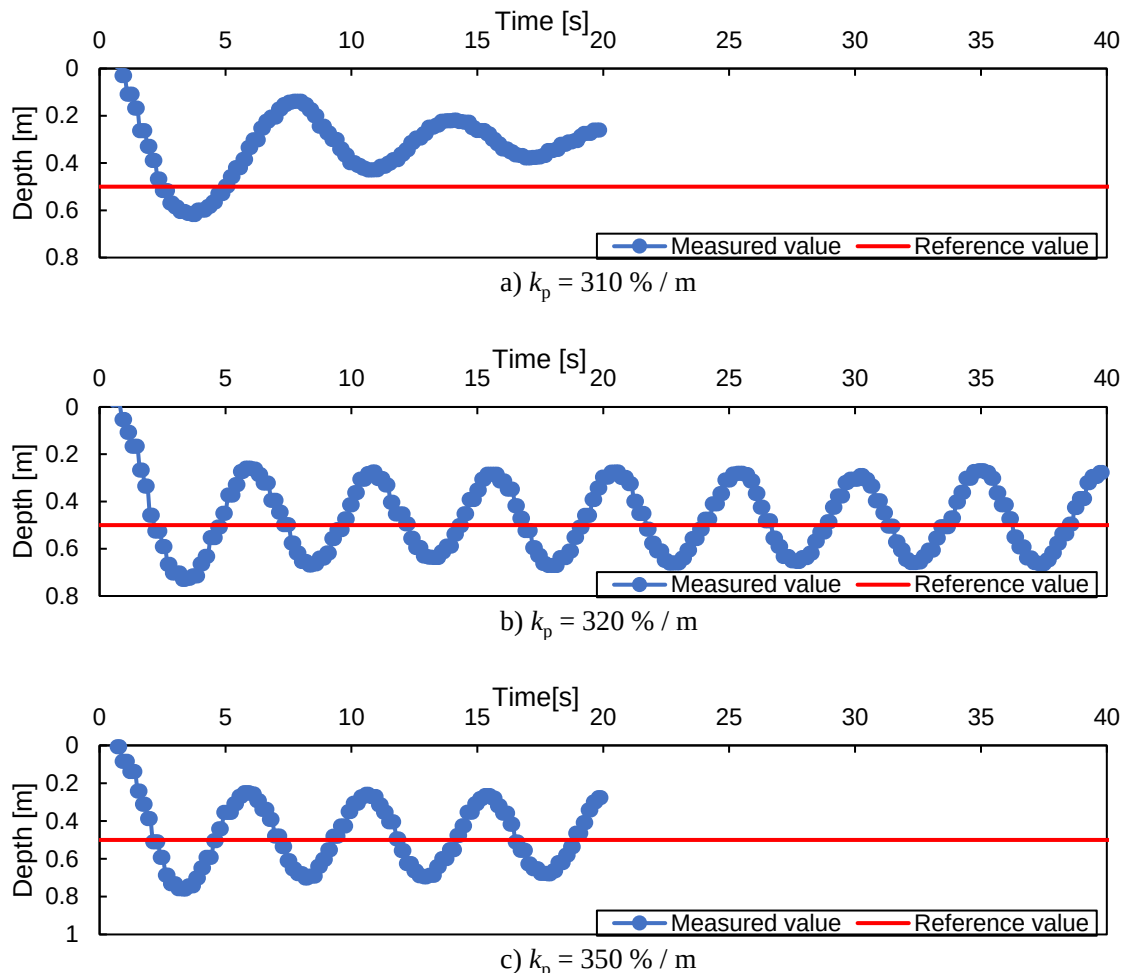


図 6.8 上下方向位置制御の限界感度法によるチューニング時の状況

a)のように， $k_p = 310\% / \text{m}$ では，振幅に減衰が見られたが，b)の $k_p = 320 \% / \text{m}$ では，振幅が一定となった．c)のようにさらに k_p を大きくしても同様に振動が見られた．なお， k_p の単位については，例えば目標値と計測値の偏差が 0.1m のとき，ジョイスティックの浮上・潜行の入力値を $320 \% / \text{m} \times 0.1\text{m} = 32\%$ とすることを意味している．

限界感度法の結果は， $k_c = 320\% / \text{m}$ ， $T_c = 5.0\text{s}$ であった．PID 制御器のパラメータを $k_p = 190 \% / \text{m}$ ， $k_i = 76 \% / \text{m} / \text{s}$ ， $k_d = 120\% / \text{m} \times \text{s}$ とした．このパラメータで水面から水深 0.5m の位置に深度制御を行った結果を図 6.9 に示す．オーバーシュートが 31.9cm と大きかったため，パラメータを修正し， $k_p = 190 \% / \text{m}$ ， $k_i = 152\% / \text{m} / \text{s}$ ， $k_d = 240\% / \text{m} \times \text{s}$ とした．この結果オーバーシュートは 24.3cm に抑制できた．その結果も図 6.9 に示す．

チューニング後のパラメータで，機体が水面にある状態から目標値 3m として深度の PID 制御を行った時のロボットの深度変化の状況を図 6.10 に示す．

最初，0.2m 程度のオーバーシュートが生じたものの，目標深度到着後 10 秒後以降は目標深度 $\pm 3\text{cm}$ 程度の範囲にとどまった．ただし，現場条件次第で，海底近傍での作業を実施す

る場合には、さらにオーバーシュートを抑制するよう、パラメータを調整する必要がある。

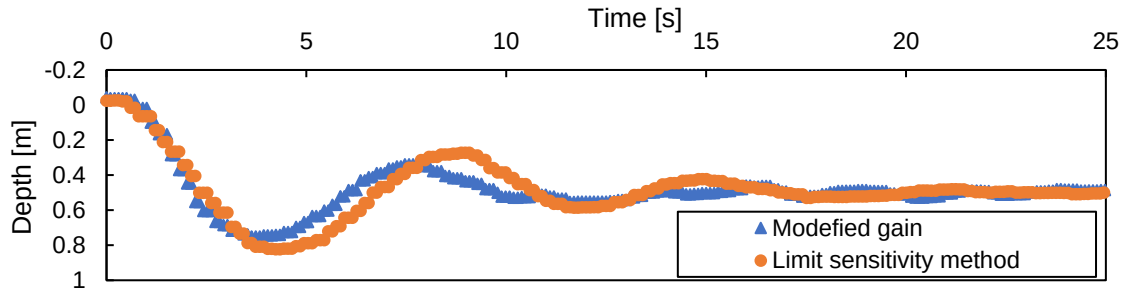


図 6.9 限界感度法によるチューニングとその補正後の制御状況の比較

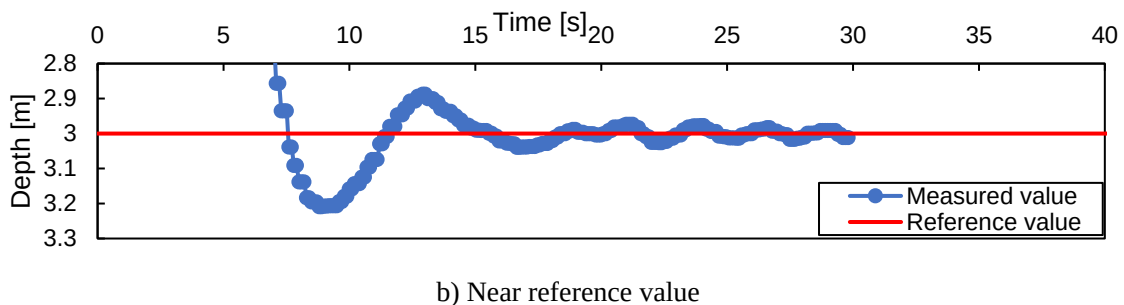
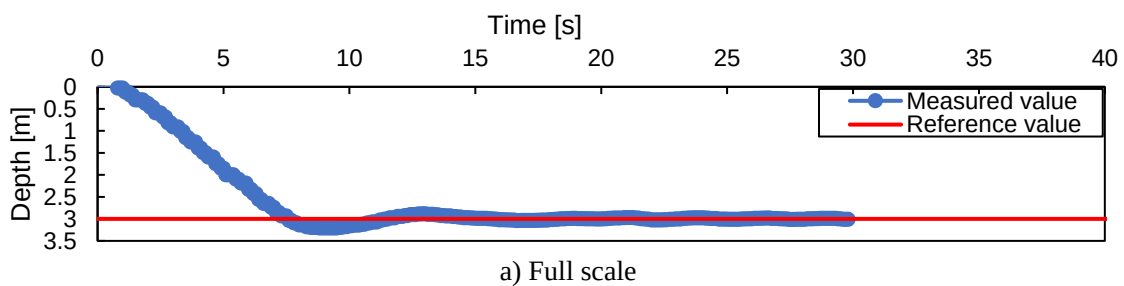


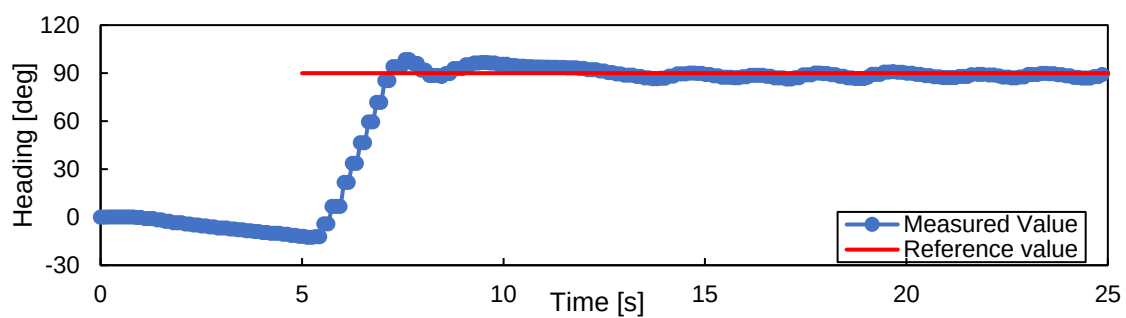
図 6.10 チューニング後の上下方向位置制御時の状況（上：全体図，下：拡大図）

(2) 方位制御のチューニング

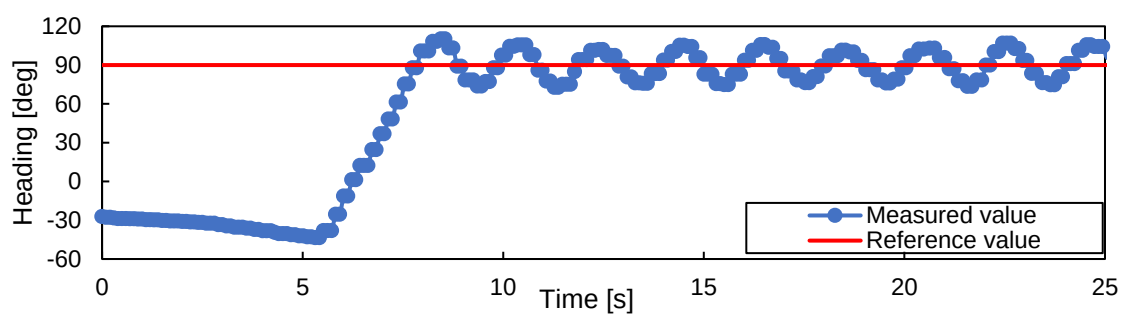
k_p を変更しながら P 制御した際の方位の時系列データを図 6.11 に示す。水深 1m を目標とした深度制御を開始した後、5 秒後から方位の P 制御を開始した。このときの目標方位は 90° として実施した。a) のように、 $k_p = 100\% / \text{rad}$ では、振幅に減衰が見られたが、b) の $k_p = 110\% / \text{rad}$ では、振幅が一定となった。c, d) のようにさらに k_p を大きくしても同様に振動が見られた。

限界感度法の結果は、 $k_{pc} = 110\% / \text{rad}$, $T_c = 2.0\text{ s}$ であった。PID 制御器のパラメータを $k_p = 66\% / \text{rad}$, $k_i = 66\% / \text{rad} / \text{s}$, $k_d = 16.5\% / \text{rad} \times \text{s}$ とした。

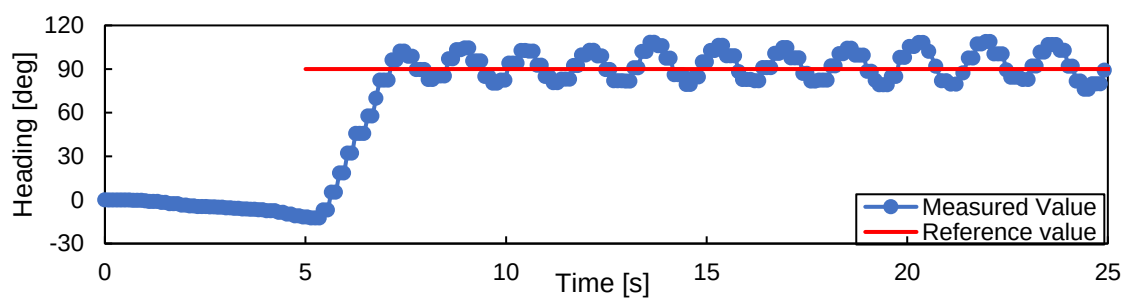
その状態で深度制御，方位制御を実施したときの，計測情報を図 6.12 に示す。最初，オーバーシュートが 30° 程度生じたが，その後は目標値 $\pm 10^\circ$ 以内に安定していた。オーバーシュート後も角度が変化し続けているのは，安全用のロープのねじれによるものと推定される。



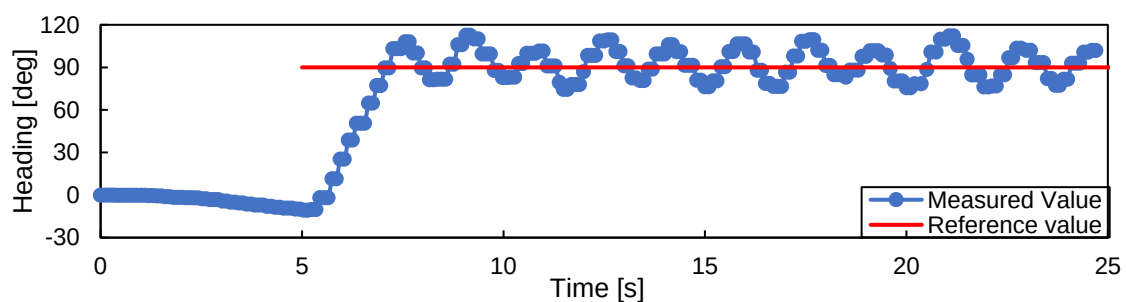
a) $k_p = 100 \% / \text{rad}$



b) $k_p = 110 \% / \text{rad}$



c) $k_p = 120 \% / \text{rad}$



d) $k_p = 150 \% / \text{rad}$

図 6.11 方位制御の限界感度法によるチューニングの状況

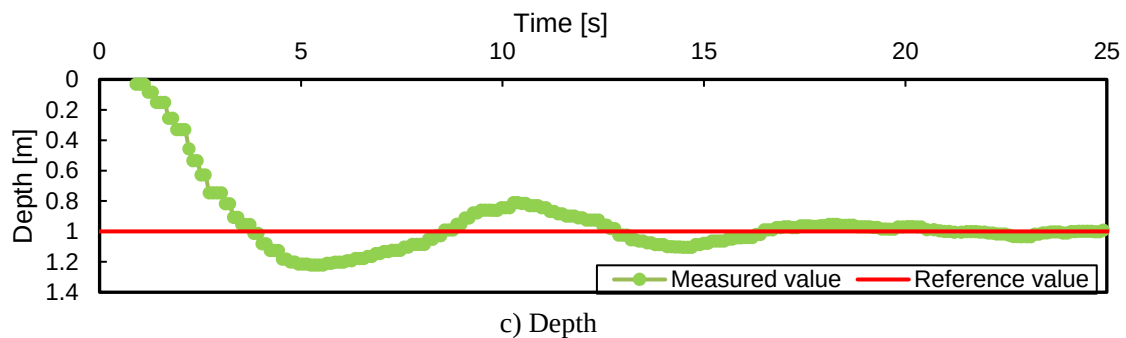
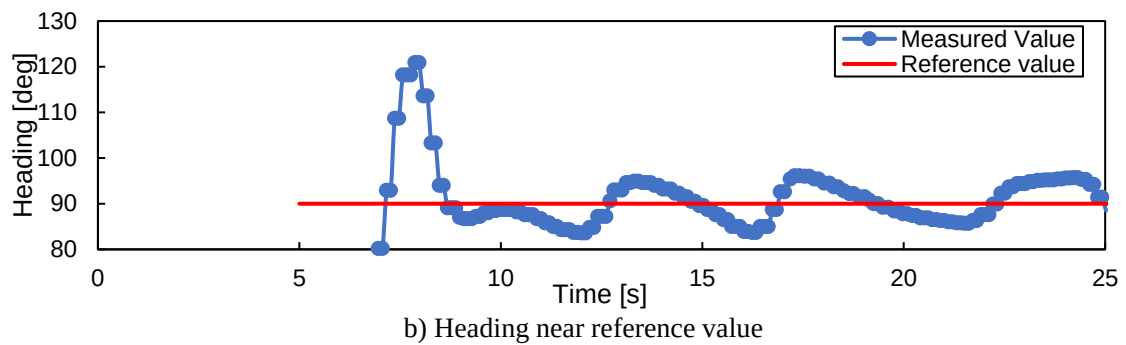
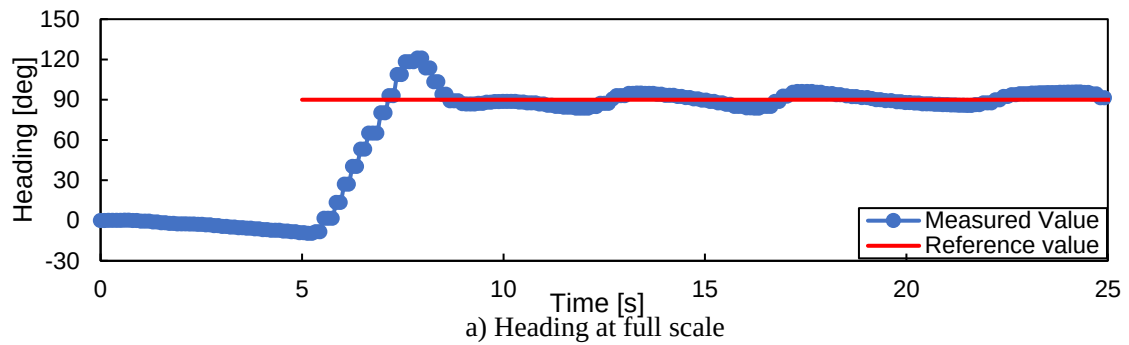


図 6.12 チューニング後の方位制御の状況

(3)前後方向位置制御のチューニング

k_p を変更しながら前後位置を P 制御した際の前後方向位置の時系列データを図 6.13 に示す. 水深 1m を目標した深度制御, 方位を保持する制御を開始した後, 5 秒後から前後方向位置の P 制御を開始した. 前後方向位置は DVL による推定値を使用した. a, b) のように, $k_p = 300, 400 \text{ \% / m}$ では, 振幅に減衰が見られたが, c) の $k_p = 500 \text{ \% / m}$ では, 振幅が一定となった. d) のようにさらに k_p を大きくしても同様に振動が見られた. 限界感度法の結果は, $k_c = 500 \text{ \% / m}$, $T_c = 3.0 \text{ s}$ であった. PID 制御器のパラメータを $k_p = 300 \text{ \% / m}$, $k_i = 20 \text{ \% / m / s}$, $k_d = 11.3 \text{ \% / m} \times \text{s}$ とした. この係数での制御の状況を図 6.14 に示す.

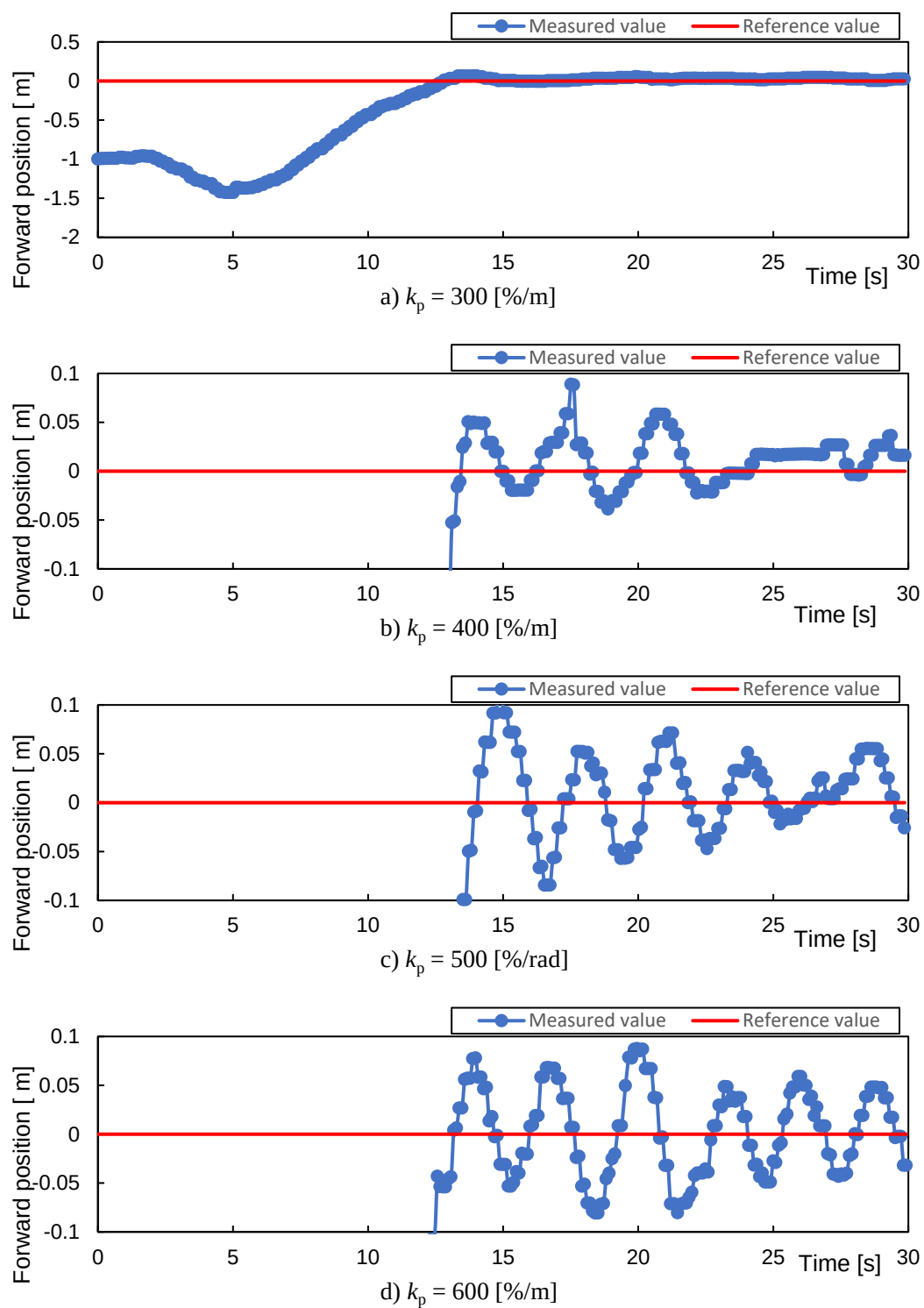


図 6.13 前後方向位置制御の限界感度法によるチューニングの状況

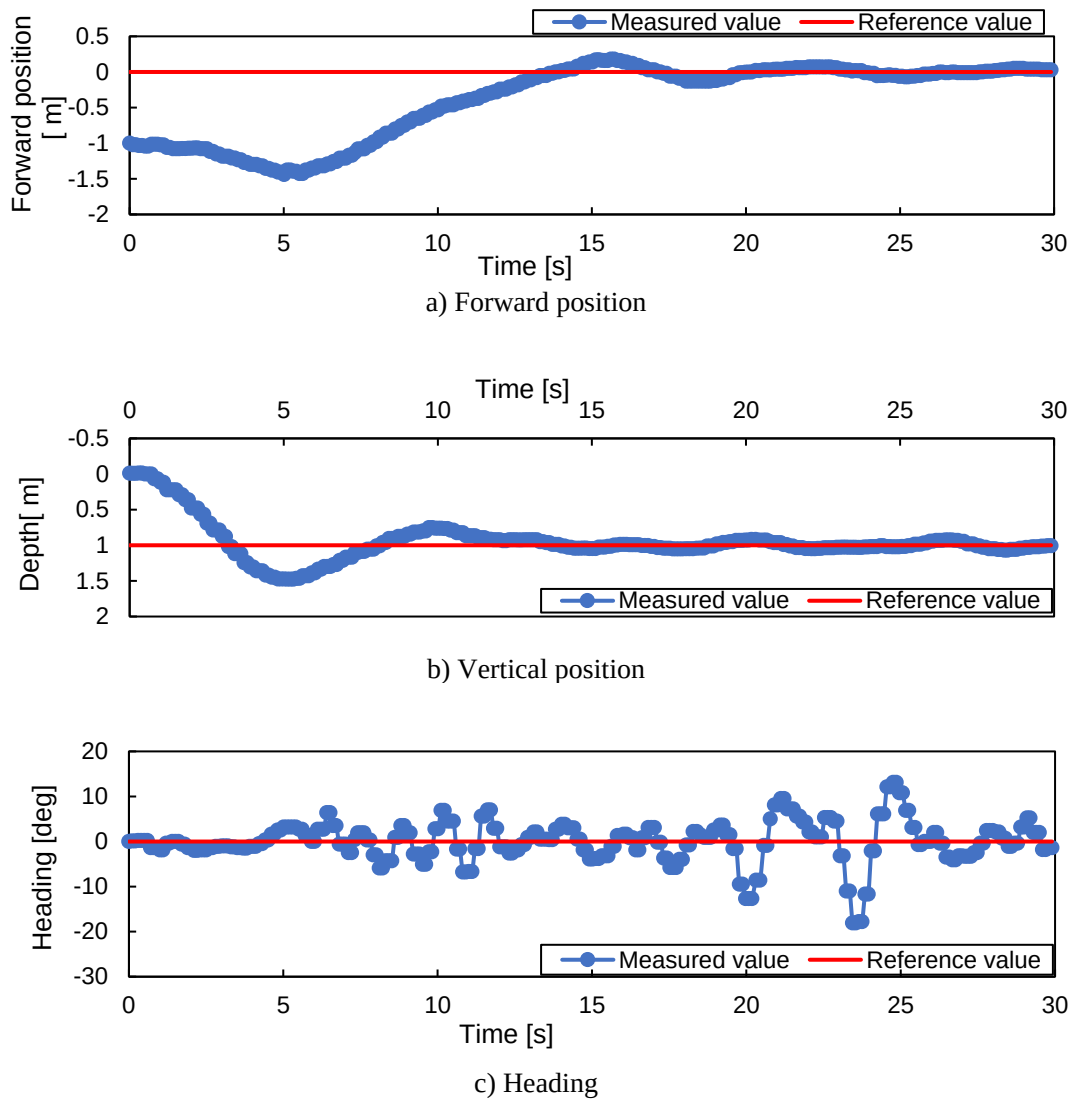


図 6.14 前後方向位置制御のチューニング後の制御の状況

(4) 左右方向位置制御のチューニング

k_p を変更しながら左右位置を P 制御した際の左右方向位置の時系列データを図 6.15 に示す。水深 1m を目標とした深度制御，方位を保持する制御，前後方向の位置を保持する制御を開始した後，5 秒後から左右方向位置の P 制御を開始した。目標位置は開始時の位置から前方に 1m とした。左右方向位置は DVL による推定値を使用した。a) のように， $k_p = 400 \text{ \% / m}$ では，振幅に減衰が見られたが，b) の $k_p = 500 \text{ \% / m}$ では，振幅が一定となった。c) のようにさらに k_p を大きくしても同様に振動が見られた。限界感度法の結果は， $k_c = 500 \text{ \% / m}$ ， $T_c = 3.0 \text{ s}$ であった。PID 制御器のパラメータを $k_p = 300 \text{ \% / m}$ ， $k_i = 20 \text{ \% / m / s}$ ， $k_d = 11.3 \text{ \% / m} \times \text{s}$ とした。この係数での制御の状況を図 6.16 に示す。

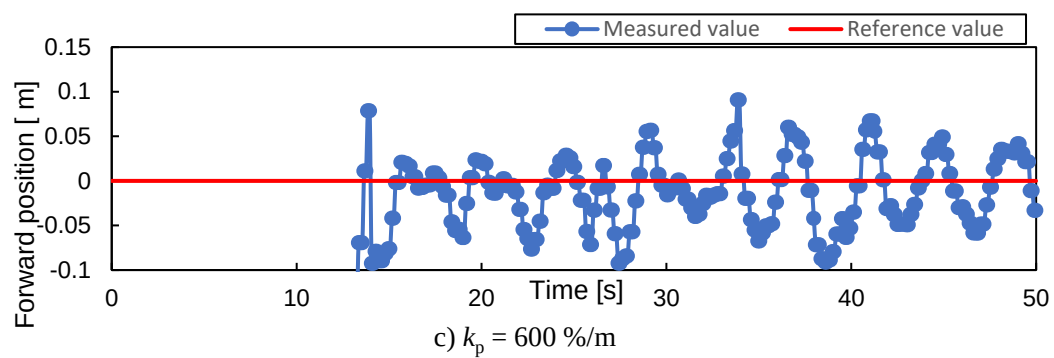
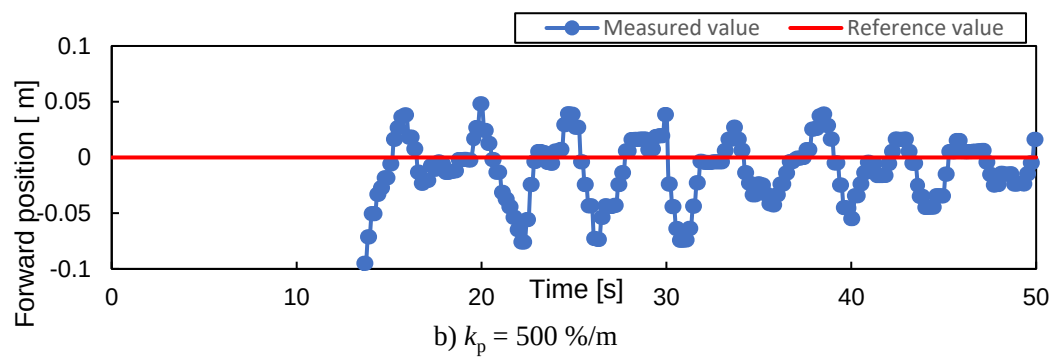
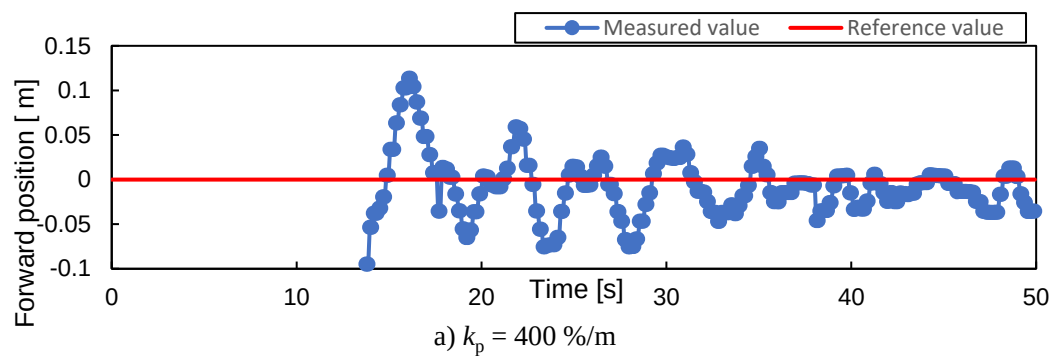
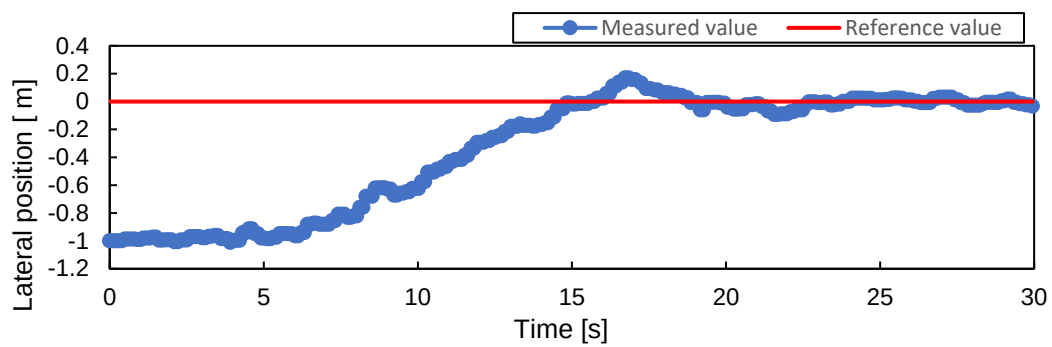
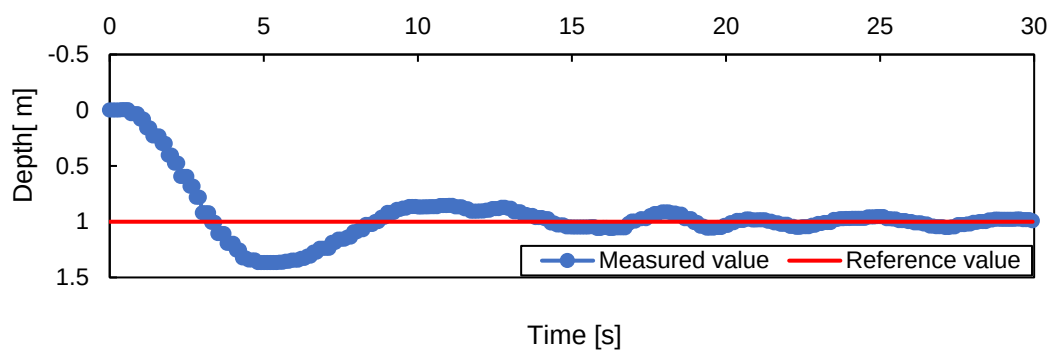


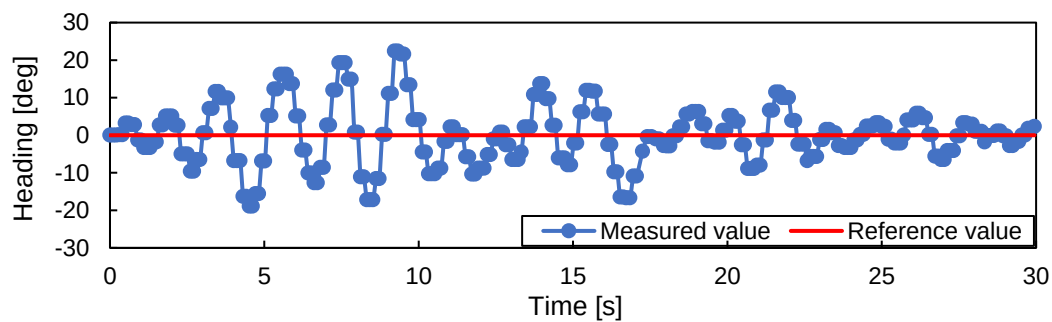
図 6.15 左右方向位置制御の限界感度法によるチューニングの状況



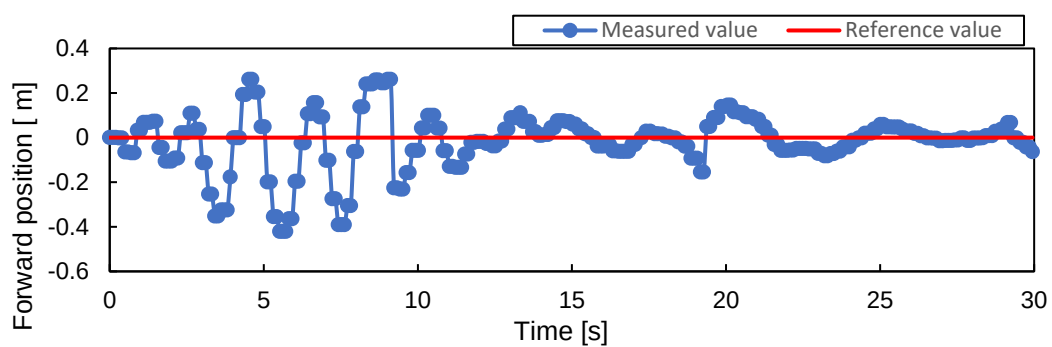
a) Lateral position



b) Vertical position



c) Heading



d) Forward position

図 6.16 全ての制御軸のチューニング後の位置制御の状況

6.3 水槽試験

水槽の構造物を作業対象として、開発した水中ロボットによる目視調査の模擬作業として自律航行の試験を実施した。水槽は港湾空港技術研究所所有の 30m×10m×水深 4.5m の鉄筋コンクリート製である。水槽の水は清水である。開発した水中ロボットには、安全確保のためにロープを取り付けて、試験を実施した。

6.3.1 対地速度計と超音波距離計を用いた直立壁型構造物を対象とした自律航行試験

水槽の直立壁面を対象に自律航行の試験を実施した。壁面はおおよそ平らである。一部、照明などの設備やそのケーブルが設置されており、それらへの衝突防止のため、機体から壁面までの目標距離は 0.7m とした。水中ロボットの底面が水底から 0.5m のところまでを移動範囲として設定した。作業範囲は幅 3m とし、6 回の潜行を実施した。図 6.17 は定点から撮影したビデオから切り出した写真に写った水中ロボットを切り出し、1 枚に貼り合わせたものである。

このときの水中ロボットの軌跡を図 6.18 に示す。この場合の、水深 1m 以深での計画経路と、計測された軌跡の誤差を表 6.4 にまとめた。図、表から、水中ロボットが、特に壁との距離方向、すなわち、ロボットの前後方向に蛇行が生じていることが確認できた。

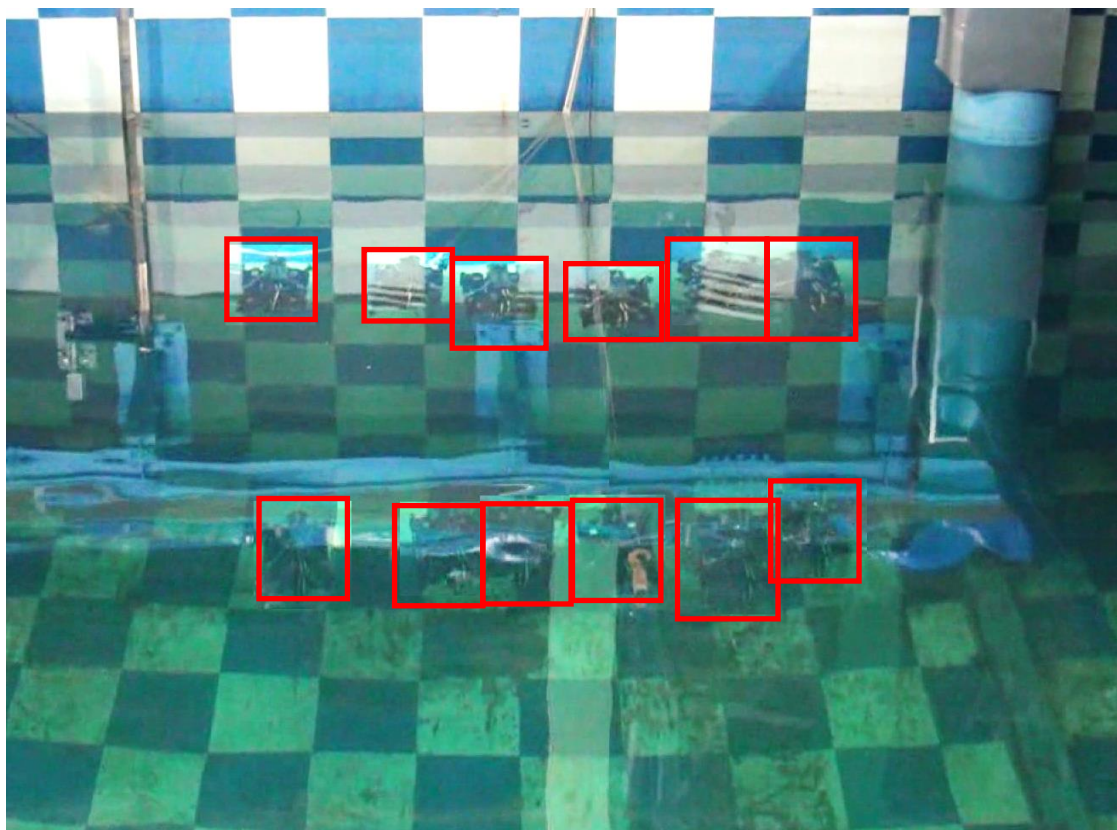


図 6.17 直立壁面を対象とした自律航行の実施状況

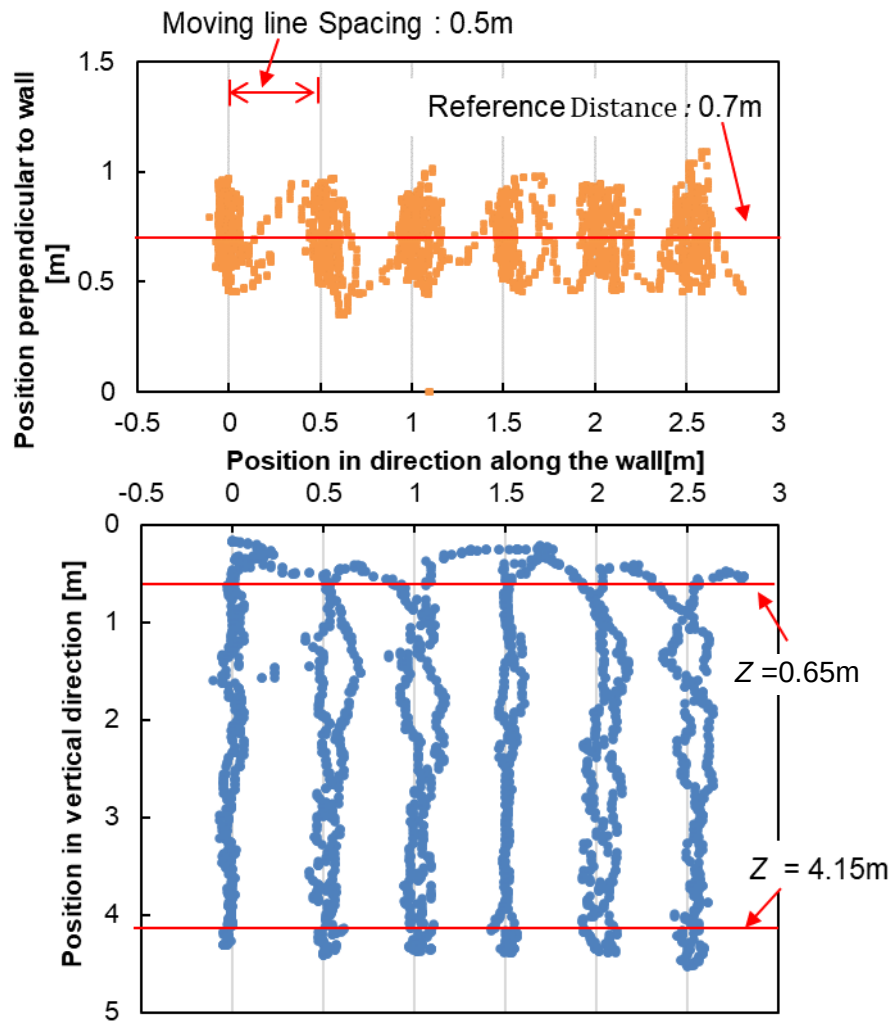


図 6.18 直立壁面を対象とした自律航行の軌跡（上：上面図，下：正面図）

表 6.4 直立壁面を対象とした自律航行の軌跡の目標経路からの誤差

Item		Average	Deviation
Position perpendicular to wall	[m]	0.709	0.14
Position along wall	[m]	0.019	0.06
Pitch	[deg]	1.966	6.76
Roll	[deg]	0.098	4.05
Yaw	[deg]	0.749	5.85

これは、水中ロボットのピッチ傾斜によるものと考えられる。初回の潜行での水中ロボットの姿勢角の変化を図 6.19 に示す。機体の状況の参考として、上に水中ロボットの鉛直方向位置を示している。標準偏差などは表 6.4 の下部に示している。潜行の際、機体が大きく機首を上げる形でピッチし、その後、ほぼ水平まで戻るといった現象を繰り返している

ことが確認された。原因はベースマシンが移動の際に、機体傾斜を生じる傾向があったためであると推定される。そのため、図 6.20 のような現象が生じたと考えられる。潜行に伴い、機体の形状特性で機首上げのピッチ傾斜が生じ、それにより、機体の上下スラストが下向きに推力を発生させた際、同時に機体前向きの推力が生じ、構造物に接近する。次に機体が構造物から離れる向きに水平スラストを回転させるが、これらは機体下部に設置しているため、機体の機首を下げるモーメントが生じる。これにより、機体姿勢が変化していたと推測される。図 6.21 に、潜行時の前後方向のスラスト出力指令値の時系列データと、その時の機体のピッチ傾斜の変化を示した。前後のスラスト出力にあわせ、機体のピッチ傾斜が変動していることが確認できた。

浮上中にヨウ角や、ロール角が生じているのは、今回、機体上面に取り付けた外付けモジュールから出るケーブル等のバランスが悪く、流体抵抗力が左右で異なったためと考えられる。

前後方向の蛇行については、以下の2つの理由から抑制することが望ましい。1つは、構造物に接近するため、構造物に突起などがあった場合に、機体が引っ掛かるリスクが高まることである。もう1つは、撮影する点検写真の均質さである。写真ごとに構造物との距離が変わり、さらに濁りによる画像の劣化の程度も変わってくるため、写真上で点検することが難しくなる可能性が考えられる。なお、今回はロボットの経路を縦方向に設定しているため、ピッチ角が大きく変化しても、撮影を行えない箇所は生じない。制御に問題がなければ、作業実施の可否には影響しない。

ただし、カメラから構造物までの距離が50cm以上とれる透明度であれば、構造物までの距離は、蛇行の標準偏差の3倍以上の余裕があり、構造物に衝突するなど、作業継続が不可能になる事態には陥ることは少ないと考える。

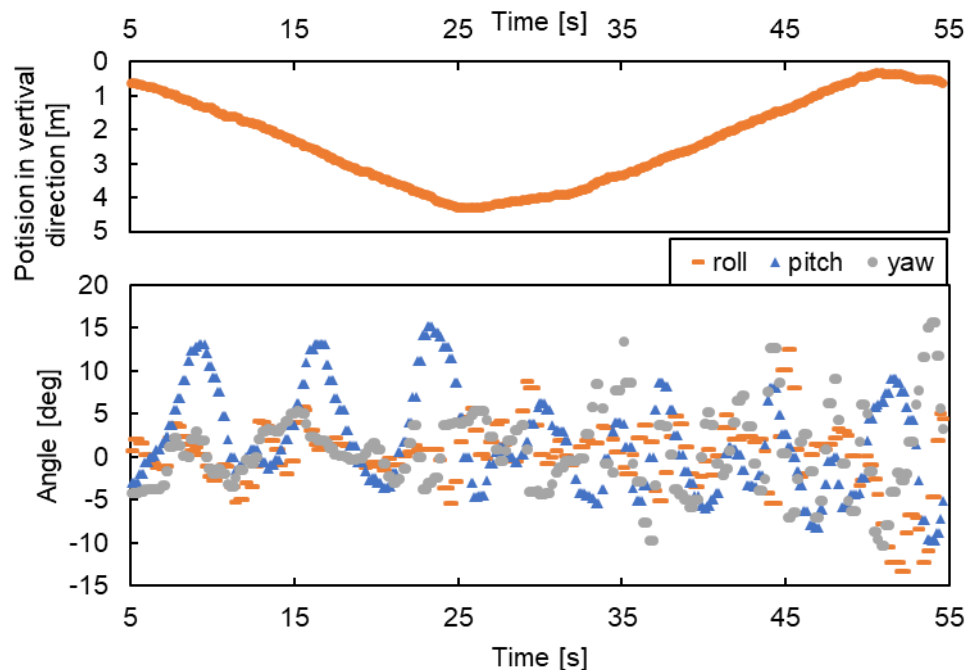


図 6.19 潜行・浮上時の水中ロボットの姿勢角の時間変化

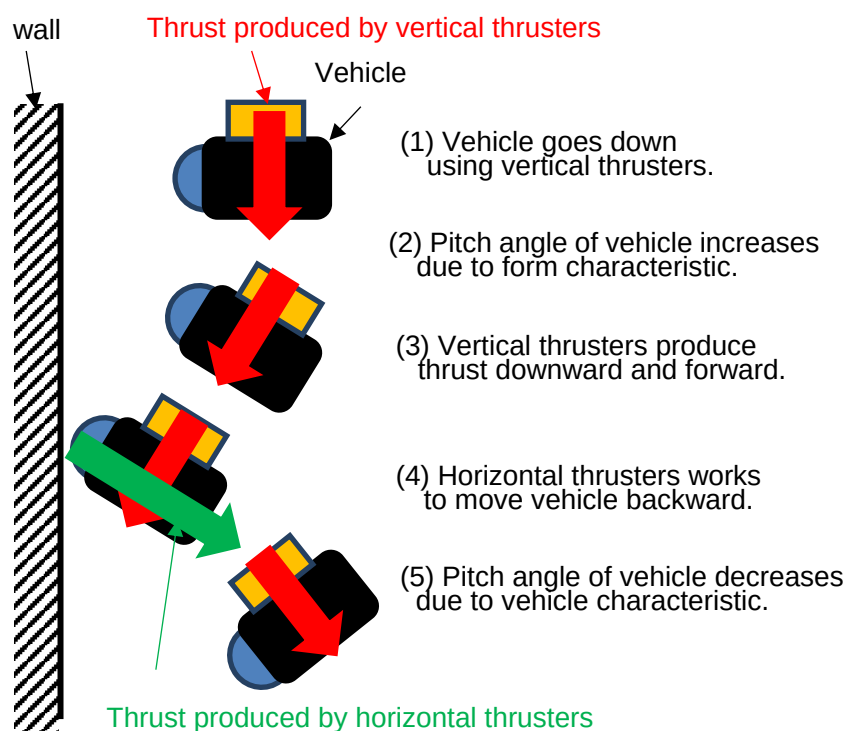


図 6.20 機体傾斜と前後の蛇行が生じた機体の動きのイメージ

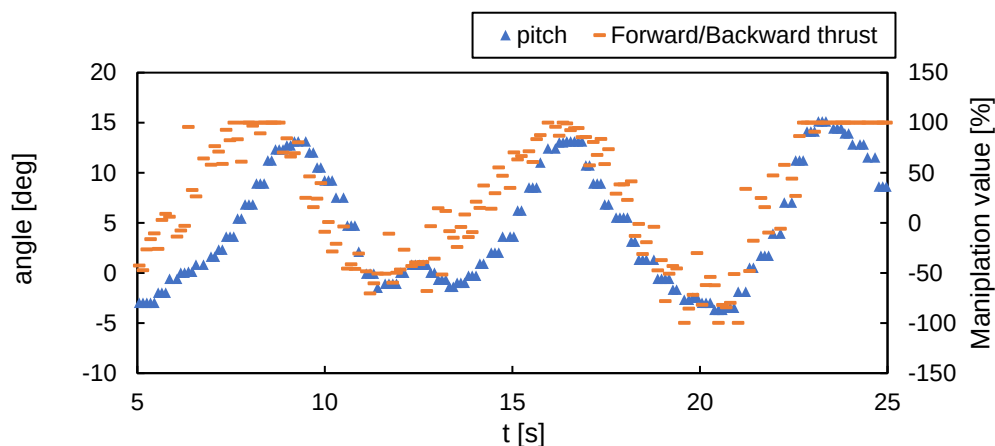


図 6.21 潜行時の前後方向スラスト出力値と機体のピッチ傾斜の時系列変化

前後の蛇行を抑制する方法として考えられる方法は以下の2つである。1つは、スラストを増設し、アクティブに姿勢角を制御する方法である。スラストを1つ以上増設すれば、ピッチ角も制御可能となる。自動で水平を維持する機能を付与すれば、機体の傾斜と、それに伴う前後の蛇行を抑えられることが期待される。ベースマシンの拡張部品として、すでにそれらの装備が市販されている。しかし今回は、投入揚収にかかわる機体の大きさや重量の制限と、バッテリーの消耗が早まり作業時間が短縮する可能性から導入しなかった。

もう1つの対策として、機体側面に安定翼を取り付け、姿勢変化を抑制することが考えられた。しかし、これも、投入揚収時の大きさ制限から、導入を見送った。

本検討では、機体の傾斜とそれによる前後移動は生じるものとし、構造物に衝突しないように安全な距離を設定することで、作業することとした。

作業効率について考えると、一回の潜行の計測時間が 50 秒程度であり、範囲は高さ方向が 4.5m、幅方向は現場の海水の透明度で決定される潜行する距離の間隔によるが、今回実験的に設定した 0.5m とすると、 2.25m^2 となる。これより、1 時間当たり 144m^2 との検査が可能である。1 日の作業時間を 6 時間とすると、作業能力は 1 日当たり 864m^2 となる。

潜水士による従来の手法による同種の調査の 1 日当たりの作業能力は 1200m^2 とされている¹⁾。また、市販の水中ドローンを用いた有線遠隔操作では、 2160m^2 という実験結果がある²⁾。これらと比べる 1 パーティあたりの作業能力は低いですが、本件は、自律航行であるため、運用人数が少ないという面でコストメリットがある。各種方法の作業人数の想定を表 6.5 に示す。さらに、作業人数を増やさずに多数のロボットを同時に運用できる可能性がある。同時に 2 台運用すれば、従来作業よりも作業効率を上げることができると考えられる。

表 6.5 各手法の水中部目視（ケレンなし）の作業能力と必要な人員・資機材

		従来作業 ²⁾ 潜水士による作業	市販水中ドローン ³⁾ (有線・遠隔操作)	今回の 試験結果
作業能力		$1200\text{m}^2/\text{日}$	$2160\text{m}^2/\text{日} ※$	$864\text{m}^2/\text{日} ※$
必要 な 人 員 ・ 資 機 材	項目			
	交通車 (ライトバン 2L)	1	1	1
	技師 (測量)		1	1
	技師補 (測量)	1	1	
	助手 (測量)	1		
	ダイバー	2		
	ダイバー補助員	2		
	上廻り員	2	1 ※ ※	1 ※ ※
	船外機 運転 (15PS)	1		
	水中ドローン		1	1
	雑材料	1		

※：写真による点検を行うため、現場作業以外の作業が増加する可能性がある。

※※：ケーブルの引っ掛かり対策等の要否に応じて普通作業員を潜水士に変えることができる。

6.3.2 車輪を用いた直立壁型構造物を対象とした自律航行試験

(1) 計画経路に対する自律航行の誤差の確認試験

車輪方式での距離制御を用いた水中ロボットによる目視点検の模擬作業も 6.3.1 と同じ水槽で自律航行試験を実施した。作業範囲は 1 回の潜航で撮影可能な、幅 0.5m、高さ 4.5m とした。制御の目標値は、上下方向移動速度を $w_r = 0.3 \text{ m/s}$ とした。ここで、方位角 ψ は、水

中ロボットが壁面に正対する向きを 0 deg とした。車輪方式では壁面との目標距離は 30 cm (アームの長さ) とした。ただし、実験時は、安全確保のため、水中ロボットにロープを結び付けた。機体は計測の結果、重力に比べ、浮力が 2 N 大きい状態であった。ここで、浮力は機体に計測用のおもりを追加して、機体が沈み始める重量を調べることで計測した。

実験の状況として定点から撮影した連続写真を図 6.22 に、実験の結果として計測データから算出した水中ロボットの移動の軌跡を図 6.23 に示す。それぞれの位置は、DVL の計測結果から推定された位置である。

車輪方式は、超音波距離計方式に比べ、前後方向、左右方向とも軌跡が安定し、目標との誤差は最大 3 cm であった。この時の機体の姿勢の変化を図 6.24 に示した。作業状況の参考として下段に、機体の深度方向位置を示した。どの姿勢角も、潜行中は非常に安定していた。

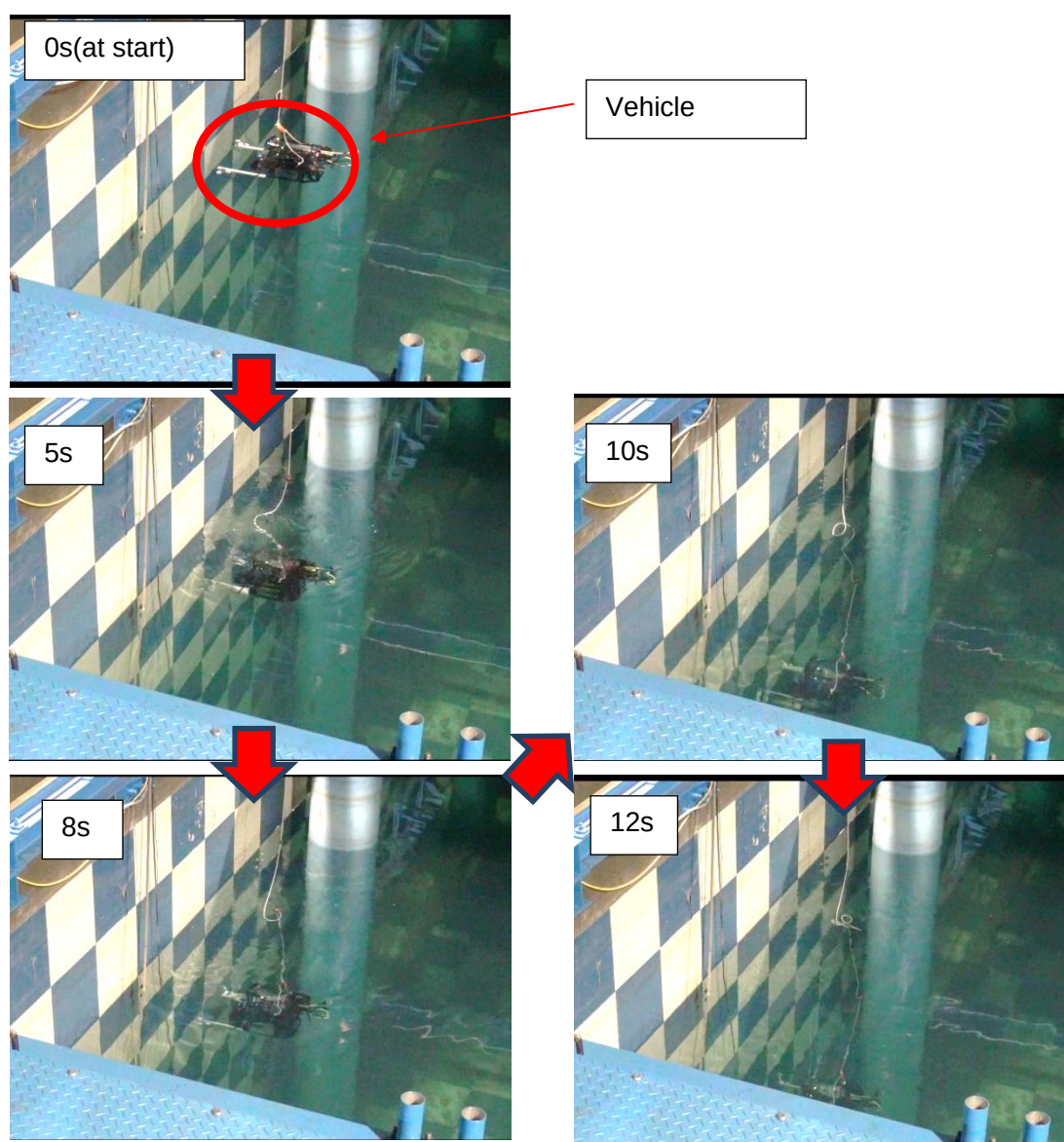


図 6.22 車輪を用いた自律航行試験の実施状況

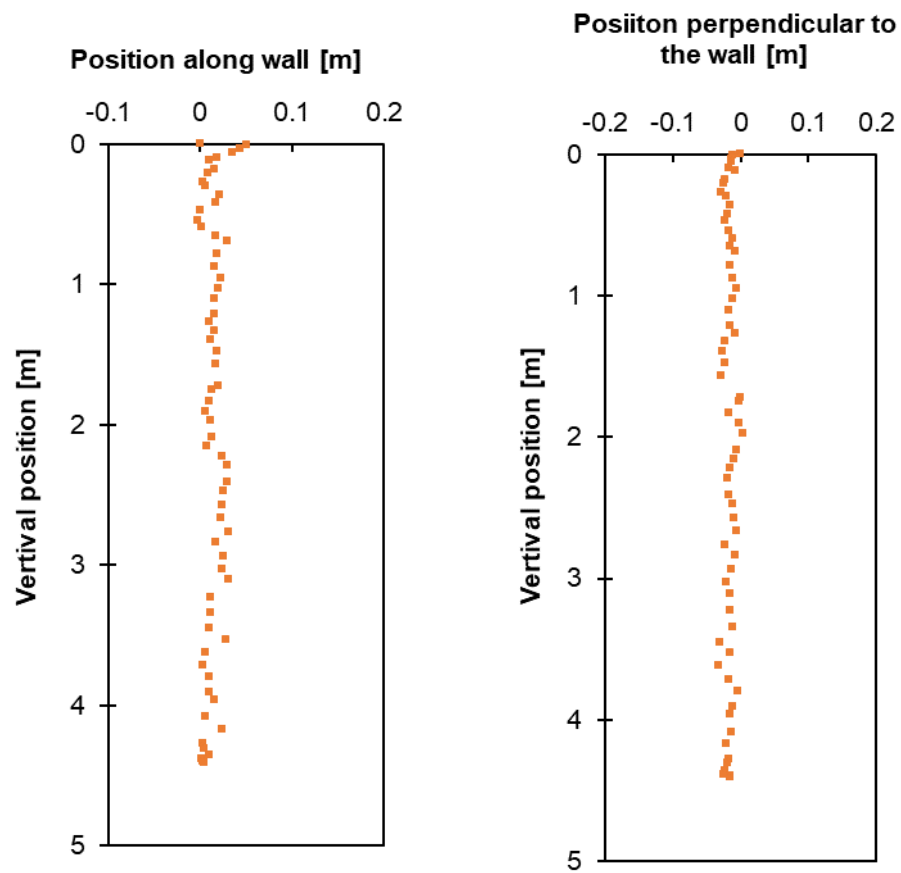


図 6.23 車輪を用いた自律航行試験時の機体の軌跡

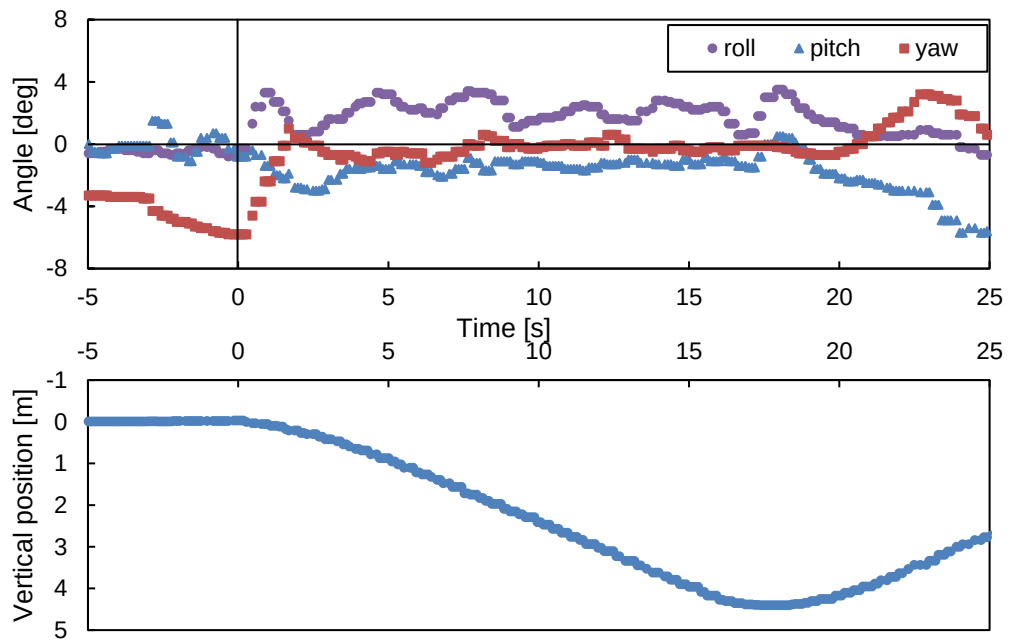


図 6.24 車輪を用いた自律航行試験時の機体の姿勢

(2)流れが作用した状況での航行能力の試験

横から流れが作用した状況を想定し、水槽で流れを発生させて、車輪方式の移動手法で試験を実施した。流れは、大型スラストによる潮流発生装置を一定速度で回転させることで発生させたが、装置を水槽壁面付近に設置するため、流れは複雑で、流速では評価できない。流れを“なし”，“弱”，“強”の3種類で、車輪方式、超音波距離計方式と、流れ条件下での評価のために潜行動作のみを行い、横方向については制御を行わなかったものの3種類で試験した。

その時の機体の流れ方向の軌跡を図 6.25 に示す。この結果、車輪方式はスラストによる横方向の制御を行っていないが、スラストによる横方向制御を行う超音波距離計方式と同程度の流され方であった。車輪を用いない単なる潜行動作に比べ、横方向からの流れに対して、位置を保持する能力が高いことが示された。

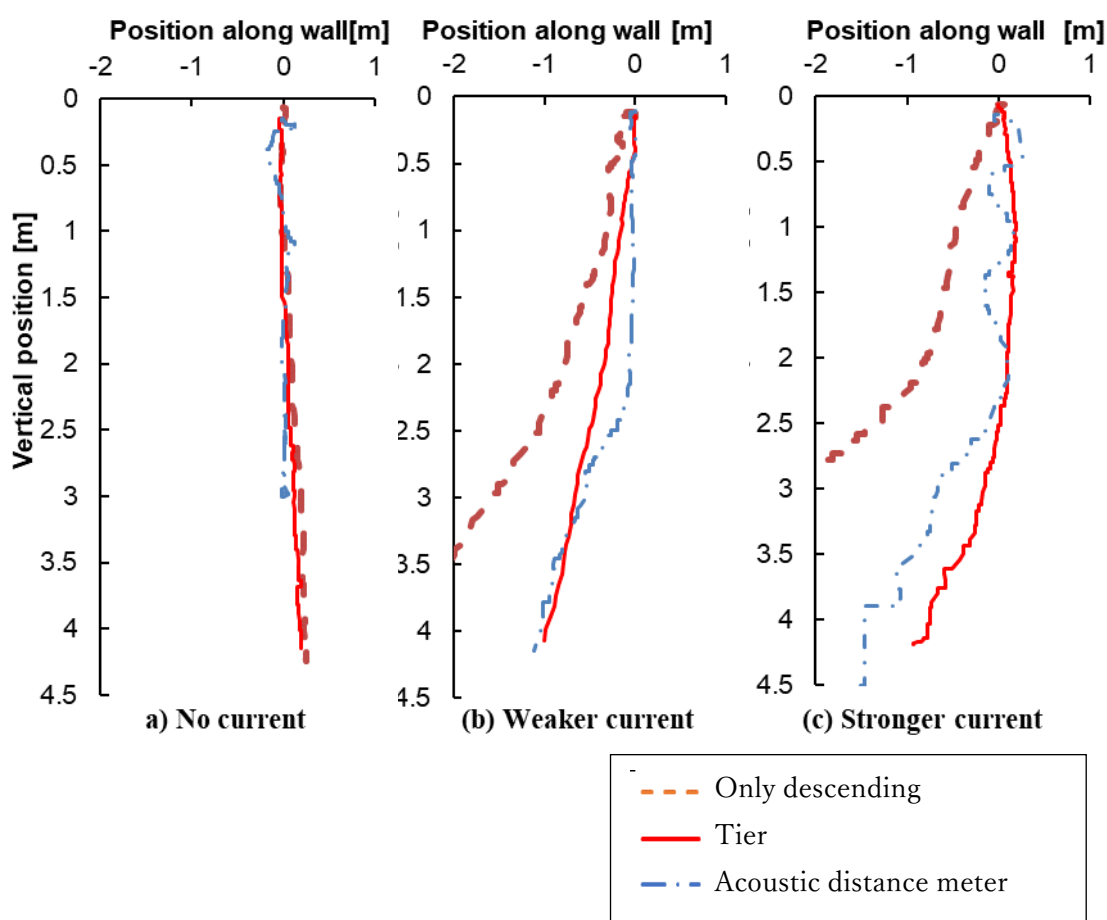


図 6.25 流れが作用した状況での自律航行の軌跡

(3)車輪方式の不陸乗り越え能力の検討

車輪方式での不陸の乗り越え方法の検討のため、壁面に段差を設置した。段差は、深さ方向 2 cm、壁法直方向 2cm の矩形状段差、直径 1cm 程度の円形状のケーブルの2種類とした。目立った凹凸のないウレタン塗装したコンクリート平面の壁面でも実験を行った。車輪については左右に 1 本ずつ取り付けた。大きさや取付け方法を 4 種類変更し、性能比較と運用方法の検討を行った。車輪の形状は図 6.26 に示す。試験の状況を図 6.27 に示す。

矩形状段差については、すべての車輪で乗り越えられず、図 6.27(c)のように傾斜を生じ

た．ケーブルについては図 6.26 の(a),(b),(c)では，アームもしくは車輪が引っ掛かり，潜行不能となった．一方，図 6.26 (d)ではケーブルを乗り越える際，傾斜が生じなかった．ウレタン塗装面では，図 6.26(a)は壁面に引っかかり，機体に大きなピッチ傾斜が生じた．その他では，それぞれ，5 回，壁面に沿って潜行を行ったが，機体が大きく傾斜することはなく，車輪を取り付けることに一定の効果があった．

本検討では，車輪の直径が 15 cm で段差 2 cm に対して十分に大きい場合にも，段差を乗り越えることができなかった．なお，一般的に受動車輪が乗り越え可能な矩形形状段差の高さは車輪の直径の 1/3 とされている^{例えば 4)}．ただし，これらの検討は，本体が転倒しない場合を想定しており，今回は本体が転倒状態になり，乗り越えができなかったと推定される．

実際の港湾では，壁面に貝などの生物が付着しており，壁面には不陸が大量に存在する．本方式は，ベースマシンに新たなセンサを追加することなく，自律航行が可能であるという点，軌跡が安定する点で超音波距離計方式より利点があったが，段差での転倒対策が取れなかったため，本研究では，超音波距離計方式を採用することとした．

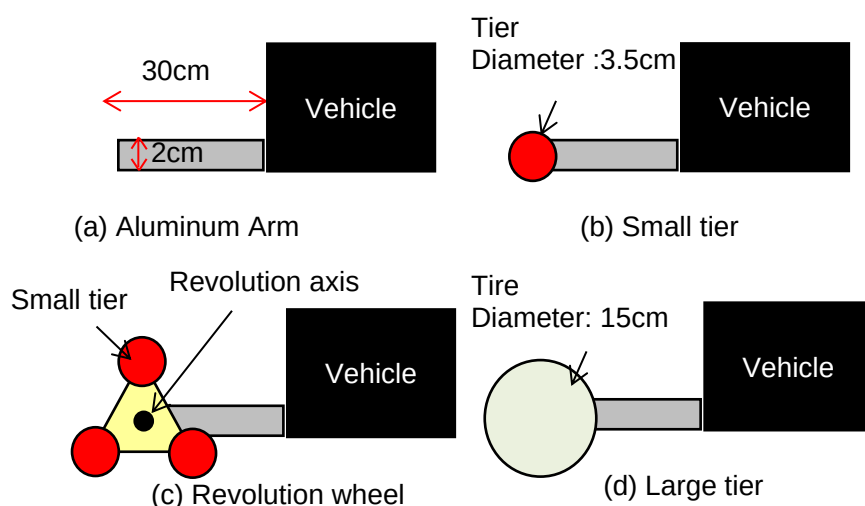


図 6.26 実験で使用した車輪

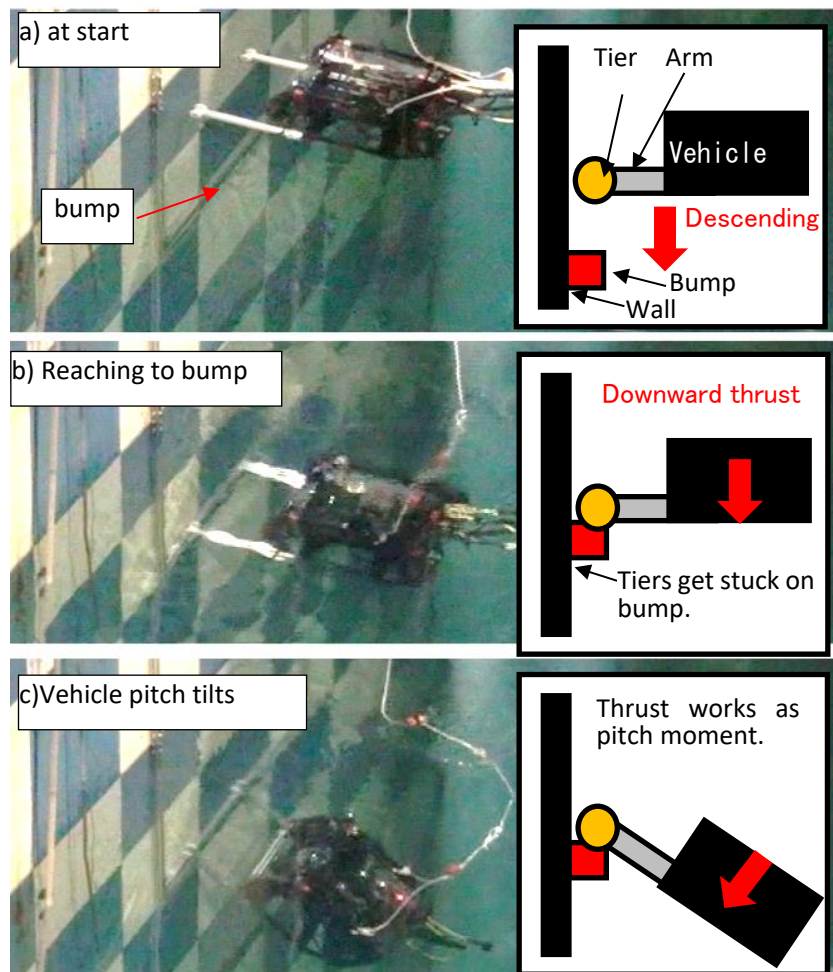


図 6.27 段差到達時の機体が傾斜していく状況

6.3.3 杭型構造物を対象とした自律航行試験

6.3.1 と同じ水槽で、直径 50cm の鋼管杭模型を対象に自律航行試験を水槽で実施した。実験時の連続写真を図 6.28、機体の軌跡を図 6.29 に示す。図中赤線は計画経路である。図 6.29 の表示の明確化のため、軌跡の前半をオレンジ、後半を青色で表示したが、図に示したものは、1 回の自律航行の一連の軌跡である。水槽試験を通し、水中ロボットが構造物に衝突することなく自律航行ができることを確認した。精度試験で示したように DVL での水平位置推定では時間経過で誤差が蓄積していくため、図 5.21 で示した経路のように、対象とする鋼管杭ごとに、遠隔操作で接触し相対位置を補正し誤差の蓄積の影響を抑えることで、不意に衝突することなく自律航行できる可能性が示された。

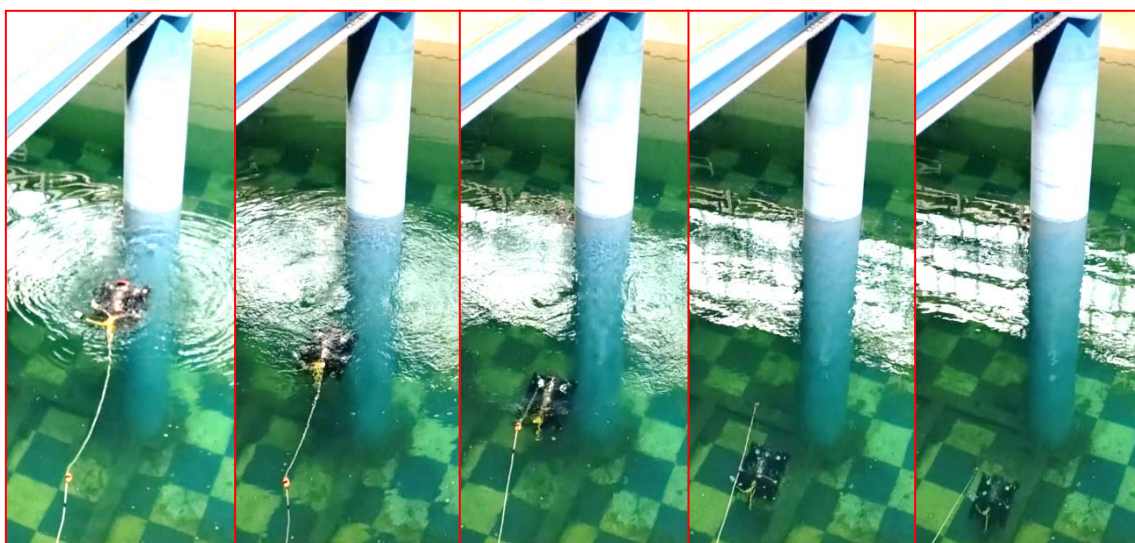


図 6.28 杭型構造物を対象とした自律航行の状況

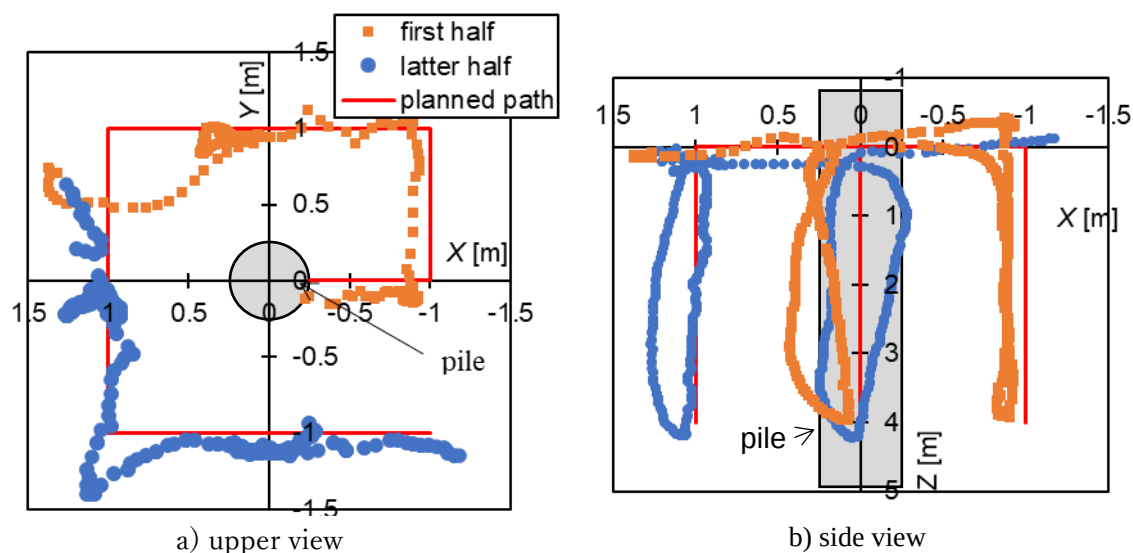


図 6.29 杭型構造物を対象とした自律航行の軌跡

6.4 まとめ

開発した自律航行型水中ロボットの自律航行機能について、水槽で検証を行った。まず、センサの精度検証を実施した。その結果、以下のことが判明した。

- ・方位計測について、停止状態では、AHRS の角速度積分による角度推定、地磁気方位計による磁北計測とも運用に十分な精度を持つことが確認された。地磁気方位計は起動から安定までにかかる時間が AHRS に比べ長かった。
- ・水圧計について、その計測値の再現性、安定性を確認し、自律航行の深度計測に十分な性能があることを確認した。
- ・水平位置推定の DVL について、運用に十分な位置計測精度を持つことを確認した。

以上の結果から、方位計測には AHRS を採用することとした。

その後、フィードバック制御のパラメータチューニングを行った後、直立壁型構造物を

対象とした目視点検を想定して、超音波距離計と DVL を用いた自律航行手法の検討を実施した。その結果は以下のとおりである。

- ・その結果、計画経路に対して、水中ロボットが構造物との距離方向に蛇行することが明らかとなった。原因は、移動に伴いピッチ傾斜が生じ、下方向への移動と、前後補方向への移動が連成したためである。
- ・蛇行は標準偏差 14cm 程度で目視点検の実施自体に影響はないと考える。

蛇行への対策は、ピッチ傾斜を抑えるため、機体側面に安定翼を設けて、パッシブに姿勢制御を実施するか、スラスタを増設し、モーメントを発生することでアクティブに姿勢制御を実施する方法が考えられたが、重量や機体の大きさの問題から、対策は取らなかった。運用では、構造物との距離の設定で余裕を見ることが構造物に衝突することなく作業できるようにすることを想定している。

その後、直立壁型構造物を対象とした目視点検を想定して、ベースマシンに新たにセンサを搭載することなく、車輪やアームを取り付けることで自律航行を行う手法も検討を行った。その結果は以下のとおりである。

- ・壁面が平坦であれば、計画経路に対して、数 cm の誤差で自律航行することが判明した。
- ・横方向からの流れに対し、横方向の推力は発生させていないが車輪の摩擦で、横方向のスラスト力を用いる超音波距離計方式と同程度の流され方であることが示された。
- ・壁面の段差に対して、本体が転倒状態となり、作業が続行できなかった。
- ・実際の港湾では、壁面に貝などの生物が一面に付着しているため、車輪方式の採用には、段差や不陸を乗り越える対策を実施する必要がある。

さらに、杭型構造物に対しても自律航行試験を実施し、衝突することなく運用できることを確認した。

参考文献

- 1)山本重彦，加藤尚武：PID 制御の基礎と応用,朝倉書店
- 2)国道交通省港湾局，維持管理計画策定のための現地調査積算基準，
<https://www.mlit.go.jp/common/001284026.pdf>, 2022-11-28 参照。
- 3) 野上周嗣，加藤絵万，”水中ドローンを利用した港湾構造物の調査に関する検討”，港湾空港技術研究所資料，NO.1380，2020。
- 4)田中敏成ら：係留装置の点検作業を目的とした ROV の鎖保持機構の提案，日本ロボット学会学術講演会予稿集，CD-ROM，2011。

7 実海域試験

7.1 試験の実施

実際の港湾で、構造物水中部の目視点検を想定した計画経路に従う水中ロボットの自律航行運用試験を実施した。構造物は、実験時の水深が 6m のブロック式護岸であった。5.3.1 に示した、超音波距離計と DVL を用いた方法で自律航行を実施する試験を行った。この概要図を図 7.1 に示す。

実験当日、風速は 3m/s 程度で、海側から岸壁に吹き寄せる向きであった。現場は港内で、波浪は静穏であった。実験開始前に透明度をセッキ板で計測した結果、透明度は 4.2m であった。実験では各設定値を、 $z_{c1} = 0.5\text{m}$, $z_{c2} = 0.5\text{m}$, $Y_c = 0.5\text{m}$, $X_c = 1\text{m}$, $w_c = 0.25\text{ m/s}$, 潜行の回数を 3 回とした。機体の喪失を防ぐため、機体にロープを結び、実験を実施した。

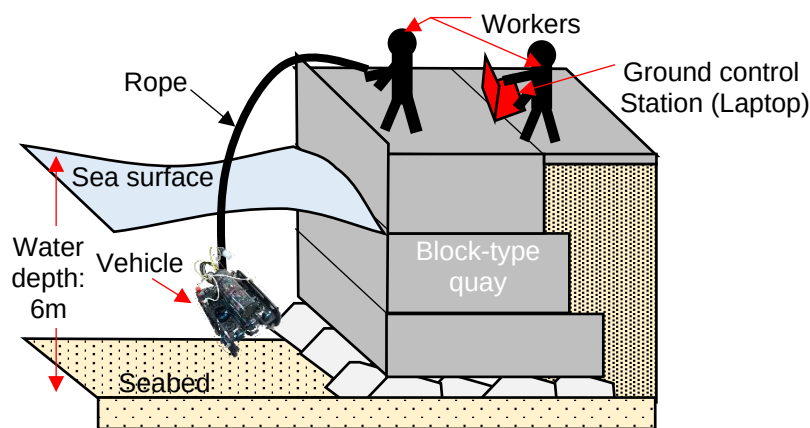


図 7.1 実験現場の概略図

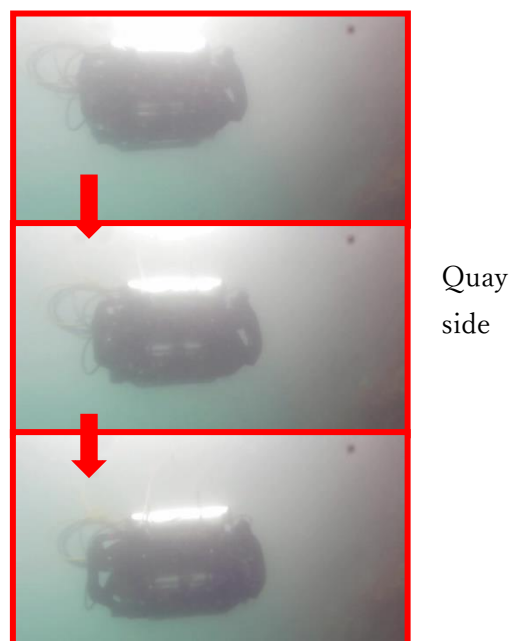


図 7.2 実験時の水中ロボットの自律航行の状況

7.2 試験の結果

実験中、他の水中カメラから撮影した機体の状況を図 7.2 に示す。実験中、水中ロボットは壁面に衝突することなく、自律航行を実施することができた。

DVLにより計測した軌跡を図 7.3 に、実験時の機体の姿勢の時系列変化を図 7.4 に示す。図 7.3 中、 X は、機体の壁面からの距離、 Y は、自律航行開始からの壁面方向の移動距離、 Z は、水面を基準とした機体の位置を示す。これらは、全て DVL の計測から推定した位置である。図 7.3 は 1 回の自律航行の軌跡である、1 回の自律航行で 3 回の潜行、浮上を実施した。3 色で軌跡を示しているが、それぞれの色は、各潜航での自律航行の結果である。ただし、赤色は計画経路である。水中ロボットが水深 1m より深いときの、計画経路からの水平位置の誤差、機体の姿勢の誤差を表 7.1 に示す。

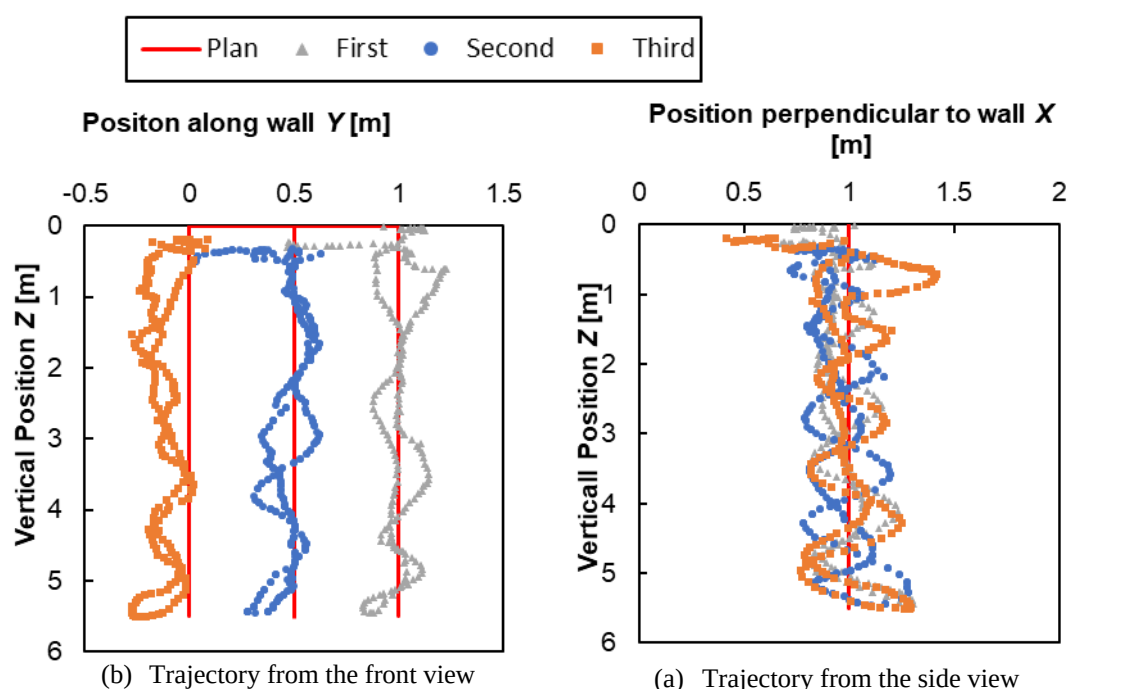


図 7.3 実験時の機体の軌跡 (左：正面図，右：側面図)

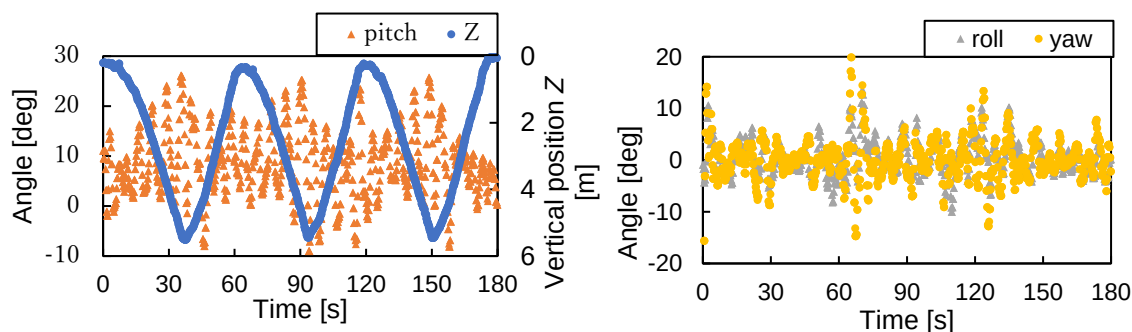


図 7.4 実験時の機体の姿勢の時系列変化

表 7.1 実験時の機体の水平位置の計画からの誤差と姿勢角の誤差

Direction	Average of error	Deviation
Position perpendicular to wall X	-0.009 m	0.127 m
Position along wall Y	-0.051 m	0.093 m
Roll	0.2 deg	3.1 deg
Pitch	9.2 deg	7.4 deg
Yaw	-0.2 deg	3.0 deg

計画経路との比較において、水中ロボットの航跡が蛇行するなど、水槽試験の結果（表 6.4）と同様の傾向が見られた。機体のピッチ角の平均値が水槽試験での 2.0 度に対し、海域試験では 9.2 度となったが、その他は、平均値、標準偏差とも同程度であった。ピッチ角に違いが生じたのは、清水と海水の比重の違いによる浮力の違いのためと考えられるが自律航行が水槽でも、実海域でも同様に機能することが確認された。

以上から、開発した水中ロボットが実海域での直立壁面の目視点検を実施するための自律航行機能として利用可能であることが示された。

7.3 実海域での運用の課題

7.3.1 海面の浮遊物の巻き込み

実験中、海から護岸に吹き寄せる向きの風があったため、護岸付近の海面に海藻などが浮遊していた。水中ロボットのプロペラにこれらの浮遊物が絡まり航行できなくなる場合が確認された。

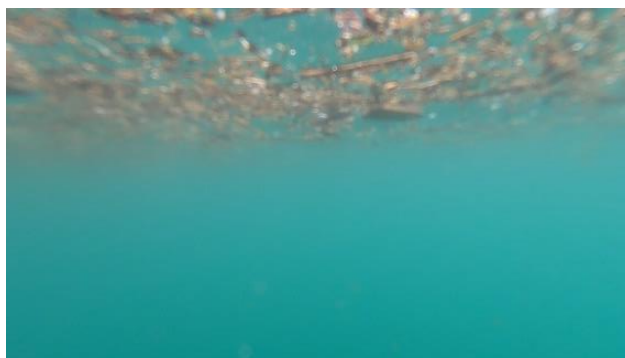


図 7.5 水中ロボットのカメラで下から撮影した実験時の海面の状況

7.3.2 波による機体傾斜の影響

実海域試験を実施したのは港内で静穏であったが、航跡波で水中ロボットが動揺する場合があった。その時、機体が機首を上げる方向に傾斜が発生し超音波距離計が上向きになり、センサから構造物までの距離ではなく、海面前の距離を計測し、構造物から一時的に離れるような自律航行が行われる場合が確認された。

7.3.3 課題への対応

これらの課題はいずれも水面付近で生じた。この影響を低減するためには、水中ロボットが浮上時に、水面まで浮上せず、水面下数 m ～ 数十 cm のところで停止し、横移動、潜行を行う経路設定が考えられる。

7.4 まとめ

超音波距離計と DVL を搭載した自律型水中ロボットによる係船岸壁直立壁面の目視調査の実施を想定した経路での自律航行試験を実海域で実施した。次の結果が得られた。

- ・自律航行機能により，構造物に衝突することなく航行を行うことができた。
- ・水槽試験と同程度の計画経路からの水平位置の誤差があった。
- ・水槽でも，濁った実海域でも同様に自律航行が実施可能であった。
- ・実海域特有の課題として機体が水面付近にある時に浮遊物や，航跡波の影響があった。対策として，水面付近での航行が少ない経路を設定することが考えられる。

8. 結言

インフラ構造物のライフサイクルコスト削減のために、点検の要望が高まっている。設計時の供用年数を超える構造物が増え、老朽化が進む中、点検の需要は今後も増大していく。災害の甚大化が進み、被災後の構造物水中部の点検についても要望がある。一方、港湾での点検を実施する潜水士の数も減少している。そのため、構造物水中部の点検には、潜水士の作業の一部代替や作業効率向上のために水中ロボットなどの新技術を活用することが期待されている。

そこで、本研究では、まず、港湾構造物の点検に用いられる水中ロボットについて先行事例の調査を実施した。

その結果、現在、港湾構造物水中部の点検に主に用いられている有線遠隔操作型の ROV には、次の課題があることが判明した。

- ・操縦者の習熟が必要。
- ・水平位置が計測できないため、濁りが強い場合に作業効率が悪化する。

そこで、港湾構造物水中部の点検を目的としたもの以外も含め、ロボットの機体の位置を推定する手法について調査した。その結果、次のような手法を用いるロボットが存在することがわかった。

- ・ UAV, ASV : GNSS を用いるもの。
- ・ ROV : カメラ映像から操縦者が推測し操縦するもの。（現状）
構造物との相対位置関係を計測するもの。
- ・ AUV : 構造物との相対位置関係を計測するもの。
音響測位装置と用いるもの。

このうち GNSS、音響測位装置は本検討の目的には適用が難しいことが先行検討で示されていた。そこで、本研究でも、構造物との相対位置関係を計測する水中ロボットを港湾構造物水中部の点検に用いることを提案することとした。さらに、実業務への導入を想定し、小型のロボットを用いることで、人力投入による運用コストの低減を行うこととした。

以上を踏まえ、新たな水中ロボットの開発にあたり、次の要件を設定した。

- ・対象とする構造物は水中部に直立壁面を有するものと、杭式のものとする。
- ・水面では無線 LAN による通信を介し遠隔操作を行い、自律航行の開始位置まで移動させる。
- ・自律航行開始後、機体は水中を上下に移動する。この間、機体方位は構造物の方向に、水平位置は構造物から一定距離、機体左右方向位置は保持するように制御を行う。
- ・岸壁上から手で投入できる大きさ、重さを検討し、その関係性に収まる設計を行う。
- ・市販の水中ロボットに、外付けモジュールを取り付ける改造を行う。
- ・追加のセンサは外付けモジュールに組み込む。
- ・センサは DVL、水圧計、AHRS、超音波距離計を設置する。
- ・ソフトウェアについては、新たに自律航行用ソフトウェアを作成し、市販ロボットの操縦ソフトウェアにジョイスティック信号を疑似的に出力することで機体の操縦を行う。

以上の要件に基づきベースマシン、センサを選定し、それらのハードウェアの組立を実施した。これの詳細を以下に列記する、

- ・ベースマシンとして BlueROV2（Blue Robotics 社）を選定。

- ・ 外付けモジュール内の自動制御用コンピュータとして Latte Panda 4GB/64GB (DFRobot 社) を選定.
- ・ 水平位置推定のために搭載する DVL として, A50 (Water Linked 社) を選定.
- ・ 構造物との相対位置の計測手段として, 音波方式の距離計 Ping sonar (Blue Robotics 社) を選定.
- ・ ロボットの上下方向位置の計測のための水圧計はベースマシン搭載の Bar30 (Blue Robotics 社) を使用.
- ・ 方位推定のための AHRS は DVL A50 組み込みのものを使用.

その後, 自律航行用のプログラムを作成した. 自律航行プログラムに搭載した機能は, 次の通りである.

- ・ 機体に設置されたセンサからデータを取得する機能.
- ・ その他のセンサからデータを取得する機能.
- ・ 決定した操作量をジョイスティック信号として元々の操作用ソフトウェアに入力する機能.
- ・ 自律航行の開始などの指示を与えるユーザインターフェイス.
- ・ 取得したデータからスラスト出力の制御値を決定する機能.
 - 直立壁型構造物を対象とし超音波距離計と DVL を利用したもの.
 - 直立壁型構造物を対象とし車輪を利用し, 距離を幾何学的に保持するもの.
 - 杭型構造物を対象とした目視点検用のもの.

その後, 開発した自律航行型水中ロボットの自律航行機能について, 水槽で検証を行った. これに先立ち, センサの精度検証を実施した. その結果, 以下のことが判明した.

- ・ 方位計測について, 停止状態では, AHRS の角速度積分による角度推定, 地磁気方位計による磁北計測とも運用に十分な精度を持つ.
- ・ 地磁気方位計は, 起動後の安定までの時間が AHRS よりも長い.
- ・ 水圧計について, その計測値の再現性, 安定性を確認し, 自律航行の深度計測に十分な性能があること.
- ・ 水平位置推定の DVL について, 運用に十分な位置計測精度を持つ.

この結果から, 方位計測には AHRS を採用することとした.

これまでの検討結果を踏まえ, フィードバック制御のパラメータチューニングを行った後, 直立壁型構造物を対象とした目視点検を想定して, 超音波距離計と DVL を用いた自律航行手法の検討を実施し, 以下の結果を得た.

- ・ 計画経路に対して, 水中ロボットが構造物との距離方向に蛇行することが明らかとなった. 原因は, 移動に伴いピッチ傾斜が生じ, 下方向への移動と, 前後補方向への移動が連成したためである.
- ・ 蛇行は標準偏差 14cm 程度で目視点検の実施自体に影響はないと考える.
- ・ 実際の運用では, 構造物との距離の設定を, 蛇行の大きさに対して大きく設定することで, 構造物に衝突することなく作業できるようにすることを想定している.
- ・ 構造物との距離の設定を 70cm の設定に設定し自律航行した場合に, 壁面に衝突しないことを水槽試験で確認した.

次に, 直立壁型構造物を対象とした目視点検を想定して, ベースマシンに新たにセンサを搭載することなく, 車輪やアームを取り付けることで自律航行を行う手法も検討を行い, 以下の結果を得た.

- ・壁面が平坦であれば、計画経路に対して、数 cm の誤差で自律航行することが判明した。
- ・横方向からの流れに対し、横方向の推力は発生させていないが車輪の摩擦で、横方向のスラスト力を用いる超音波距離計方式と同程度の流され方であることが示された。
- ・壁面の段差に対して、本体が転倒状態となり、作業が続行できなかった。
- ・実際の港湾では、壁面に貝などの生物が一面に付着しているため、車輪方式の採用には、段差や不陸を乗り越える対策を実施する必要がある。

さらに、杭型構造物に対しても自律航行試験を実施し、衝突することなく運用できることを確認した。

超音波距離計と DVL を搭載した自律型水中ロボットによる係船岸壁直立壁面の目視調査の実施を想定した経路での自律航行試験について実海域で実施した。この結果、次の結果が得られた。

- ・自律航行機能により、構造物に衝突することなく航行を行うことができた。
- ・水槽試験と同程度の計画経路からの水平位置の誤差があった。
- ・蛇行は標準偏差 13cm で目視点検の実施自体に影響はないと考えられる。
- ・濁った実海域でも水槽と同様に自律航行が実施可能であった。

本研究では以上のように、係船岸壁直立壁面の目視調査の実施を想定し、超音波距離計と DVL を用い事前に計画した経路で自律航行が実施可能な自律型水中ロボットの検討・開発を実施した。なお、運用方法についても併せて検討・提案を実施している。その後、水槽試験と実海域試験を実施し、開発した水中ロボットが実海域での直立壁面の目視点検を実施するための自動航行機能として利用可能であることを示した。

一方で、実海域での運用の課題として、以下の課題があることを示した。

- ・機体が水面付近にある時に浮遊物を巻き込むこと。
- ・機体が水面付近にある時に航跡波によりセンサの計測が不安定になること。

今後の課題として、以下のことが挙げられる。

- ・計画経路からの蛇行を抑制するため、ピッチ傾斜を抑える必要がある。
- ・機体側面に安定翼を設けて、パッシブに姿勢制御を実施するか、スラストを増設し、モーメントを発生することでアクティブに姿勢制御を実施する方法が考えられる。
- ・ただし、投入揚収時の作業上の制約から重量や機体の大きさに配慮が必要となる。
- ・実海域での運用における浮遊物や航跡波への対策として、水面付近での航行が少ない経路を設定することが考えられる。

謝辞

本論文の作成にあたり，多くの方々にご指導ご鞭撻，ご協力を賜りました．指導教官の大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻 鈴木博善教授には終始適切なご指導を賜りました．ここに深謝の意を表します．

国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所の特別研究主幹 吉江宗生氏，メタロボティクス研究グループ長 田中敏成氏，同グループ主任研究官 野上周嗣氏には，運用方法の検討，ロボットの製作，実験の実施等において，多大なご助言とご助力を賜りました．厚く御礼を申し上げます．

本研究の遂行にあたり，快く開発，実験等にご協力頂いた皆様に，深く感謝いたします．