

令和 6 年度 防衛装備庁
安全保障技術研究推進制度

研究成果報告書

水中航走体用レーザ通信に向けた光トラッ キング技術の研究開発

令和 7 年 5 月
ソフトバンク株式会社

本報告書は、防衛装備庁の安全保障技術研究推進制度による委託業務として、ソフトバンク株式会社が令和４年度から令和６年度にかけて実施した「水中航走体用レーザ通信に向けた光トラッキング技術の研究開発」の成果を取りまとめたものです。

目次

1. 委託業務の目的
2. 研究開始時に設定した研究目標の達成度
3. 委託業務における研究の方法及び成果

要素課題① 海中でのフォトン検知によるレーザ光軸合わせ技術の研究開発

- ①-1. 精追尾および通信用レーザ光源の開発ならびにフォトン受信機の研究開発
 - ①-1-1. 概要
 - ①-1-2. レーザ光源の開発
 - ①-1-3. フォトン受信機の研究開発
 - ①-1-4. サーボ回路
- ①-2. フォトン検知による光無線通信の変復調技術の研究開発
 - ①-2-1. 概要
 - ①-2-2. 変調方式
 - ①-2-3. 復調方式
 - ①-2-4. パケット構造
- ①-3. フォトン受信機搭載用ジンバルシステムの製作
 - ①-3-1. 概要
 - ①-3-2. 仕様
- ①-4. 海中光トラッキング、通信における外乱・変動への対応検討
 - ①-4-1. 海中光トラッキングにおける外乱・変動への対応
 - ①-4-2. 海中通信における外乱・変動への対応検討

要素課題② リングパルスレーザのフォトン検知による水中航走体の海中センシング技術の研究開発

- ②-1. トラッキングアルゴリズムおよびリングパルスレーザ制御ソフトウェアの研究開発
 - ②-1-1. 研究開発の概要と主要成果
 - ②-1-2. リングパルスレーザ(RPL)制御アルゴリズムの設計
 - ②-1-3. RPL 制御ソフトウェアおよび検証シミュレータの開発
- ②-2. リングパルスレーザ装置の水中航走体センシング用レーザ光源およびフォトン受信機の研究開発
 - ②-2-1. 概要
 - ②-2-2. RPL レーザ光源の研究開発
 - ②-2-3. RPL フォトン受信機の研究開発
 - ②-2-4. 原理試作機

要素課題③ 精追尾および粗追尾技術ならびに水中航走体の初期位置合わせ用 OCC トラッキング技術を組み合わせた光トラッキング技術の研究開発

- ③-1. 精追尾および粗追尾の協調アルゴリズムならびに制御ソフトウェアの研究開発
 - ③-1-1. 研究開発の概要と主要成果
 - ③-1-2. 精追尾・粗追尾協調アルゴリズム
 - ③-1-3. 協調制御ソフトウェアの設計
 - ③-1-4. シナリオ再現エミュレータ
- ③-2. OCC 用画像解析アルゴリズムの開発および信号変復調ソフトウェアの開発

要素課題④ 粗追尾および精追尾技術開発のための海水の光吸収・散乱係数および外乱調査ならびに基礎実験の実施に適した条件の海域および時期の調査

- ④-1. 実海域における海水の光吸収・散乱係数および外乱調査

④－２．基礎実験の実施に適した条件の海域および時期の調査

要素課題⑤ レーザ通信装置および光トラッキング機構を搭載する水中航走体の製作

⑤－１．水中航走体および制御則の開発

⑤－２．リングパルスレーザと水中航走体の同期制御機構の開発

要素課題⑥ 水中航走体の実験水槽におけるトラッキングおよび通信実験

⑥－１．実験水槽などの設備運用、水中航走体の運用ならびに調整、実験データの取得

⑥－２．光トラッキング制御システムの試験および実験データの取得、実海域での実験に向けたシステムの改修や調整

⑥－３．精追尾および粗追尾用レーザ光源およびフォトン受信機の試験および実験データの取得、実海域での実験に向けたシステムの改修や調整

⑥－３－１．精追尾のレーザ光源及びフォトン受信機の試験及び実験データの取得

⑥－３－２．粗追尾のレーザ光源及びフォトン受信機の試験

要素課題⑦ 水中航走体の実海域におけるトラッキングおよび通信実験

⑦－１．船舶などの設備運用、水中航走体の運用ならびに調整、実験データの取得

⑦－２．光トラッキング制御システムの調整および実験データの取得

⑦－３．精追尾および粗追尾用レーザ光源およびフォトン受信機の調整および実験データの取得

４．委託業務全体の成果

４．１ 計画時に想定していなかった成果（副次的成果）や、目標を超える成果

４．２ 研究課題の発展性（間接的成果を含む）

４．３ 研究成果の発表・発信に関する活動

５．プロジェクトの総合的推進

５．１ 研究実施体制とマネジメント

５．２ 経費の効率的執行

６．まとめ、今後の予定

７．研究発表、知的財産権等の状況

（１）研究発表等の状況

（２）知的財産権等の状況

（３）その他特記事項

８．参考文献

1. 委託業務の目的

排他的経済水域の面積世界第6位を誇る世界有数の海洋国家である我が国においては、沿岸部におけるインフラ老朽化や担い手不足の解消、海洋資源の有効活用や新産業の創出などのために大容量の海中光通信技術や海中ワイヤレス電力伝送技術の研究開発が進められている。ただし、海中における産業の発展や効率化には、ROV (Remotely operated vehicle) や AUV (Autonomous Underwater Vehicle) など水中航走体の利活用が必須であるが、ROVは動力供給と通信のためにケーブルが必要であるため、広域を自由に航行する事が出来ない。またAUVは通信速度の遅い音響通信しか利用できないため、カメラ映像などの観測データをリアルタイムで確認する事が出来ない。この制約を取り除きROVやAUVの利便性を向上させるためには、水中航走体で利用可能な長距離高速無線通信が必要と考えられている。水中における長距離高速無線通信の実現には可視光レーザ通信と高精度なトラッキングを組み合わせる方法が考えられるが、しかし広域を自在に移動する水中航走体を捕捉追尾してレーザ光軸合わせを行い、安定した光通信や光ワイヤレス電力伝送を実現するためのトラッキング技術は未だ存在しない。

広大な海中を移動する水中航走体を捕捉・追尾してレーザ光軸合わせを行い、安定した光無線通信を行うためには、陸上における自由空間光通信と同様に、通信対象の到来方向にベクトルを合わせる粗追尾技術と、そのベクトル上で精密なレーザ光軸合わせを行う精追尾技術を組み合わせた光トラッキング技術が必要となる。しかし従来の水中光無線通信にはそのような追尾技術が実現されておらず、人が手動で光軸を合わせて通信を確立・維持するか、通信装置を固定した状態で通信を行うしかないという課題があった。

そこで本研究では、一般的な水中光無線通信に用いられるようなPhotomultiplier tube (PMT) や PhotoDiode (PD) などではなく、光子単位で高感度に検知可能なフォトン受信機で捉えることにより、水中航走体を高精度かつ長距離でトラッキングする海中センシング技術を実証する。具体的には、水中航走体の外周にリング状にレーザ光源を配したリングパルスレーザ装置から照射した光をフォトン受信機で捉えることにより、通信対象の到来方向を自律的に把握し正対するよう機体を制御するトラッキング技術（粗追尾）を開発する。さらに、リングパルスレーザの円の中心部には通信用レーザ装置を搭載し、粗追尾技術と同様にフォトン受信機で光子を受信することによる高精度なレーザ光軸合わせ技術（精追尾）を開発する。これらの技術とフォトン通信技術を組み合わせた全く新しい発想の光トラッキング技術の開発を通じて、海中における水中航走体の追尾技術の課題解決に向けた基礎研究を行う。

水中における精追尾および粗追尾技術の課題を克服し、移動する水中航走体を捕捉・追尾して光無線通信を可能とする技術を実現するには、現在的水中光無線通信技術が達成している通信距離にて、十分な精度で水中航走体をトラッキングしてレーザ光軸合わせを行うことが可能であることを明らかにすることを必要がある。

そこで本研究課題の最終目標としては、本研究で得られる技術の有用性を検証することを目指す。具体的には、光トラッキング装置を搭載した2台1組の水中航走体を実海域に投入して光トラッキングおよび通信実験を行い、以下の性能の実現を目指す。

目標性能 通信距離：300m以上
通信速度：100Mbps以上

上記の最終目標を達成するためには、個別課題にて以下の目標の実現を目指す。

(1) 目標性能に対して十分な精度の粗追尾技術の実現

距離300m以上での海中光通信のリンクを維持するため、水中航走体に対するリングレーザによる粗追尾は分解能 $\pm 0.5\text{mrad}$ を実現する。レーザ光軸合わせの精追尾は粗追尾の $\pm 0.5\text{mrad}$ の範囲において分解能 $\pm 0.005\text{mrad}$ の実現を目指す。

(2) 目標性能に対して十分な精度の精追尾技術の実現

レーザ光軸合わせの精追尾は粗追尾の $\pm 0.5\text{mrad}$ の範囲において分解能 $\pm 0.005\text{mrad}$ の実現を目指す。

また、上記の最終目標を達成するにあたり、中間目標として令和6年10月までに以下を達成する。

- (1) レーザ光源、フォトン受信機の原理試作機の作成および、海水の減衰率を考慮した大気中の伝搬路で光軸調整の動作確認の実施
- (2) リングパルスレーザによる粗追尾機構の試作および動作確認の実施
- (3) 水中航走体の試作機の製作および、スラスト制御試験の実施

上記を実現するためには、以下の要素課題が挙げられる。

要素課題① 海中でのフォトン検知によるレーザ光軸合わせ技術の研究開発

海中では光の減衰が大きく、現状の光信号受信器では光信号を受信できる距離が限られてしまうため、海中での長距離光トラッキングを実現できない。長距離化のためには、受光素子として高感度なSPADを用い、そこから得られるフォトン受信信号を用いて光軸を精追尾できる機構並びにアルゴリズムを実現する必要がある。また、海中での高速で頑健な通信であり、その高速通信に耐えうる、フォトン受信器、フォトン通信用変復調方式と符号化並びにフロントエンドの実現が必須である。

海中での光トラッキング及び光無線通信は、太陽光をはじめとする外乱光による妨害、海洋生物による光信号の遮断等、外乱の影響を受けるため、外乱を想定し、頑健性を高める手法の検討を行い、システム設計に盛り込む必要がある。

要素課題② リングパルスレーザのフォトン検知による水中航走体の海中センシング技術の研究開発

長距離トラッキングにおいて、航走体が精追尾トラッキング機構の制御範囲外に移動してしまう可能性がある。そこでトラッキングを頑健にするために、水中航走体の捕捉・追尾用フォトンパルスレーザ機構による粗追尾機能が必要となる。

要素課題③ 精追尾および粗追尾技術ならびに水中航走体の初期位置合わせ用OCC (Optical Camera Communication) トラッキング技術を組み合わせた光トラッキング技術の研究開発

長距離トラッキング用の精追尾・粗追尾の仕組みでは、極近距離での光軸合わせができない可能性がある。そのため水中航走体同士の極近距離での初期位置合わせを行う際は別の仕組みが必要である。

要素課題④ 粗追尾および精追尾技術開発のための海水の光吸収・散乱係数および外乱調査ならびに基礎実験の実施に適した条件の海域および時期の調査

海中でのフォトンを用いた光トラッキング、通信システムを開発するためには、実海域での環境がフォトン伝搬に与える影響の把握が重要である。そこで実海域における光の吸収と散乱、および太陽光や照明などの外乱光の影響を、実験候補地にて日時を変えて複数回、調査する必要がある。

要素課題⑤ レーザ通信装置および光トラッキング機構を搭載する水中航走体の製作

本研究で開発される長距離光トラッキング及光無線通信システムの性能評価及び実海域での実証試験を行うには、水中航走体が必要であり、その水中航走体は大型のリングパルスレーザを搭載する必要があることから、形状、重心・浮心、および推力中心を方位安定性重視とする配置としつつ、かつ方位安定性を優先した制御とする必要がある。

要素課題⑥ 水中航走体の実験水槽におけるトラッキングおよび通信実験

水中航走体の方位安定性を評価するためには、光の吸収・散乱および外乱が無いもしくは十分に計測された環境での実験が必要である。またトラッキング部、通信部等個別のブロック毎及びシステム毎の評価も必要である。

要素課題⑦ 水中航走体の実海域におけるトラッキングおよび通信実験

要素課題⑥に評価に加えて、光の吸収・散乱が強く予測が難しく外乱も強い実海域において、方位安定性影響を評価する必要がある。

2. 研究開始時に設定した研究目標の達成度

本研究の最終目標は、広域を移動する水中航走体同士で長距離・高速の光無線通信リンクを確立するための光トラッキング技術を実証することであり、具体的な性能目標として通信距離300 m以上・通信速度100 Mbps以上が掲げられていた。これを達成するため、(a)高精度な粗・精追尾機構の開発、(b)長距離高速通信が可能なレーザ光源および受信器の開発、(c)それらを搭載した統合実証プラットフォーム（水中航走体）の製作と、水槽および海域環境での実証といった要素課題が設定されていた。本節では、これら各目標に対する達成状況を述べる。

(a)高精度な粗・精追尾機構の開発：光軸自動追尾のために開発したトラッキングサーボは、当初設計目標であった「 $\pm 1^\circ \cdot 1\text{ Hz}$ の外乱に対し指向ずれを $\pm 0.05^\circ$ 以内に抑制する精度」を大きく上回る性能を示した。実験では、両軸とも指向安定度が $\pm 0.001^\circ$ 未満と、目標値の1/50以下の誤差に抑えられ、さらに外乱を10 Hzに高速化した条件でも $\pm 0.05^\circ$ 以内の安定追尾を維持することを確認した。また、トラッキングサーボの引き込み動作（通信相手の捕捉）についても、 $\pm 1^\circ$ の揺動外乱下で確実にロックオン可能であることを実証した。この引き込みに際しては、新たに考案したスパイラルスキャン方式を適用し、ガルバノミラーを渦巻き状に走査させることで広範囲に探索を行った。その結果、外乱が存在する状況下でも通信相手からの微弱な光子信号を捕捉し、自律的に光軸を正対させることに成功している。受光感度の面でも、サーボが動作するために必要な最小光量は数nW程度と見積もられていたが、開発システムでは入力装置光量5.5 nW（SPAD受光素子1個あたり約500 pW）という微弱な光でも追尾動作が可能であることを確認しており、所期の感度要件を満たしている。以上により、粗追尾・精追尾双方の要素技術開発における目標は、一部設計値を上回る性能が確認されたこともふくめ、定性的・定量的に達成され、移動する水中航走体を高精度に捕捉・追尾し続ける光学式トラッキングの基本的な技術開発は完了した。

(b)長距離高速通信が可能なレーザ光源および受信器の開発：高速長距離通信を担うレーザ送受信機についても、当初目標の「300 m先で100 Mbps通信」を達成すべく設計・開発を行った結果、目標を超える性能が得られた。送信側では、水中での減衰が小さい波長帯（約450 nmおよび520 nm）の大出力レーザダイオード(LD)を選定し、1 W級出力で広域通信に対応する光源とした。その駆動回路として新規開発したLDドライバは、100 Mbpsの変調に留まら

ず最大500 Mbpsまでの高速変調を実現しており、実験的に1 W出力LDによる500 Mbps伝送の可能性を示した。これは、精追尾用通信レーザに求められる仕様を十分に満足する成果である。一方、受信側では、高感度なフォトンカウンティング方式を採用したフォトン受信機により、微弱な光でも誤りなく信号を復調できるシステムを構築した。リンク予備検討としてLambert-Beer則に基づく光減衰の計算やモンテカルロシミュレーションによる海中乱流の影響評価も行い、水中チャネルでの通信可能条件を定量的に把握した。例えば、300 m伝送で250 Mbpsの通信を成立させるには受信光強度で約1 nW以上が必要であり、それ未満では通信が困難となることを解析的に示した。こうしたリンクバジェット分析の知見は、データレートと通信距離のバランス設計に活かされ、実環境下でも安定して100 Mbps以上の通信を行うための余裕度を持ったシステム設計につながった。実験室レベルではあるが、水槽内に減衰フィルタを挿入して300 m相当の減衰条件を再現し、100 Mbps OOK変調によるデータ伝送が誤りなく達成できることを確認している。以上により、通信距離・速度の要素技術開発における目標についても達成が確認され、開発された送受信システムは所期の大容量海中通信能力を実現する上で必要な性能を備えていることを確認した。

(c)統合実証プラットフォーム（水中航走体）の製作と、水槽および海域環境での実証：光学系（追尾機構・通信機）を搭載する水中航走体については、リングパルスレーザ等の大型機器を実装しつつ高い姿勢安定性を確保する観点から、機体形状や重心・浮心レイアウトの最適化および制御アルゴリズムの工夫を行い、安定航行可能な試作機を製作した。共同実施機関であるJAMSTECの協力により、高精度な姿勢制御が可能な光トラッキング用水中航走体が完成し、あわせて通信試験に適した水槽環境および海域候補地の選定も完了している。これにより、プロジェクト後半ではまず屋内大水槽を用いた要素検証試験を実施し、外乱の少ない環境下で統合システムの有効性を客観評価することが可能となった。実海域試験についても、濁度の低い時間帯や海象条件を選んで段階的に試行する計画が立てられており、R7年度以降の最終的な300 m双方向通信の実証に向けた準備は整ったと言える。ただし、業務計画書に記載された令和6年度の具体的な目標の一つである『実験水槽で粗追尾装置および精追尾装置を載せた状態で水中航走体を離間距離40mにて正対させ、また、その状態でフォトン通信を確立し、速度100Mbpsで5分間維持する』というシステム統合実証については、各要素技術の開発と水中航走体の製作・調整に時間を要したことにより、令和6年度末までに実施する段階には至らなかった。

以上のように、本研究開始時に設定されたR6年度までの研究目標に対し、トラッキングサーボの高性能化やLDドライバの高速化といった要素技術開発においては、本プロジェクトは計画通りの成果を収めるか、あるいはそれを上回る達成度を示した。一方で、システム全体を統合した一部の具体的な実証試験目標については、期間内に完了するには至らない項目が存在する。

以上のように、本研究開始時に設定されたR6年度までの研究目標に対し、要素技術開発においては、本プロジェクトは計画を達成、あるいは一部目標を上回る成果を収めた。一方で、これらの要素技術を水中航走体プラットフォーム上で統合し、システム全体として検証する一部の具体的な実証試験目標については、部品調達の遅れや水中航走体の納期遅延により、期間内に完了するには至らなかった。

3. 委託業務における研究の方法及び成果

①－1. 精追尾および通信用レーザ光源の開発ならびにフォトン受信機の研究開発

①－1－1. 概要

精追尾の開発は光軸自動調整のためのトラッキングサーボ開発である。開発項目としてはトラッキングサーボ引き込み動作、 $\pm 1^\circ$ 1 Hzの外乱を $\pm 0.05^\circ$ に抑えるサーボの設計、海中300m先からの予想される送信光の光量でもトラッキングサーボがかかる回路設計がある。通信用レーザ光源の開発は海中300m先の受信機で100Mbpsが可能となるレーザ光源の選定とドライバの開発である。フォトン受信機の研究開発項目は、復調方式、誤り訂正が主なものである。

表1-1-1に成果を纏める。

表1-1-1

項目	目標値	成果
x軸、y軸外乱抑圧	$\pm 0.05^\circ$ （両軸とも外乱 $\pm 1^\circ$ 1Hz）	両軸とも $\pm 0.001^\circ$ 未満を達成、 $\pm 1^\circ$ 10Hzの外乱でも $\pm 0.05^\circ$ 未満を達成した
サーボ引き込み	外乱 $\pm 1^\circ$ 1 Hzの時でも、 サーボ引き込みが可能な事	スパイラルスキャンを用いる事で左記外乱があっても引き込みが可能である事が実験で証明した
サーボが掛かる最小光量検討	数nW近傍	装置入力光量5.5nW、SPAD当たり500pWの光量でサーボがかかる事を証明した
LDドライバ開発	1 WクラスLDで転送レート100Mbpsを実現	出力1WのLDで500Mbpsが可能となった これより精追尾用レーザ光源仕様を満足するドライバが開発できた

①－1－2. レーザ光源の開発

レーザ光源として、大きさ、取り扱いやすさ及び入手し易さから、レーザダイオード（以下LD）を使用する事とした。

1. LDの仕様

LDの発光波長と出力光量に関して、光の波長と海水における減衰率より400nm～550nmの波長帯の減衰が小さいことから、入手可能で品質が安定している450nmと520nmのLDを使用する事とした。出力光量に関しては目標である300mにおいて減衰率は 10^{-9} 近傍になる事が予想されるため最低でもワット級LDが必要となる。入手可能なワット級LDは波長450nm及び520nmにおいては1W～2WのLDとなる。

2. LD変調回路仕様

出力光量を変化させるには、LD発光の立ち上がり特性を確保するためにthreshold電流(i_{th})を常時流し、出力発光量となるドライブ電流(i_L)から i_{th} を差し引いた電流量をコントロールすればよい。

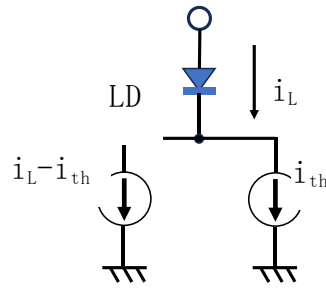


図1-1-1

本システムにおいて送信光はデータ及び光軸自動調整のトラッキングサーボ用信号として用いられる。これより 00K において 0n を増やすことは海中の様に光量が大きく減衰する環境において有利となる。変調前のデータがランダム化されていることから、BPSK (Binary Phase-Shift Keying: 二位相遷移変調) やマンチェスター符号を用いると 0n/Off の確率が 50% になる。本システムでは BPSK を変更して使用している (以下 m-BPSK と称す)。

変調周波数はユーザデータ (D_u) に対して Sync 等を含むシステムデータ (D_s) のサイズを D_u の 25% とした時、 D_u のデータレートを 100Mbps とすると変調前のデータレートは 125Mbps で通信レートは 250Mbps となる。これより 0n/Off の最短時間は 4nsec になる。

3. LDドライバの特性

ここではLD変調回路をLDドライバと称す。一般に入手可能な波長450nm、520nmの1W LDのコントロール電流 ($i_L - i_{th}$) は凡そ550mAから1.2A前後であることから、作成したLDドライバを250MHzで動作させ、LDの代わりにダミー抵抗 (1Ω) を用いて電流値の変化を求めた。実験結果を図1-1-2から図1-1-4に示す。

図1-1-2はLDドライバに入力された250MHzのクロック波形。図1-1-3はダミー抵抗両端の電圧波形で、図1-1-4はLDドライバにより450nm 1W LDを2nsecで明滅させ SPAD (Single Photon Avalanche Diode) で検出された波形である。測定系を図1-1-5に示す。SPAD入射光量はLD近傍に減衰率 10^{-3} の固定及び可変NDフィルタ置いて実験を行った。これは安全対策によるものである。

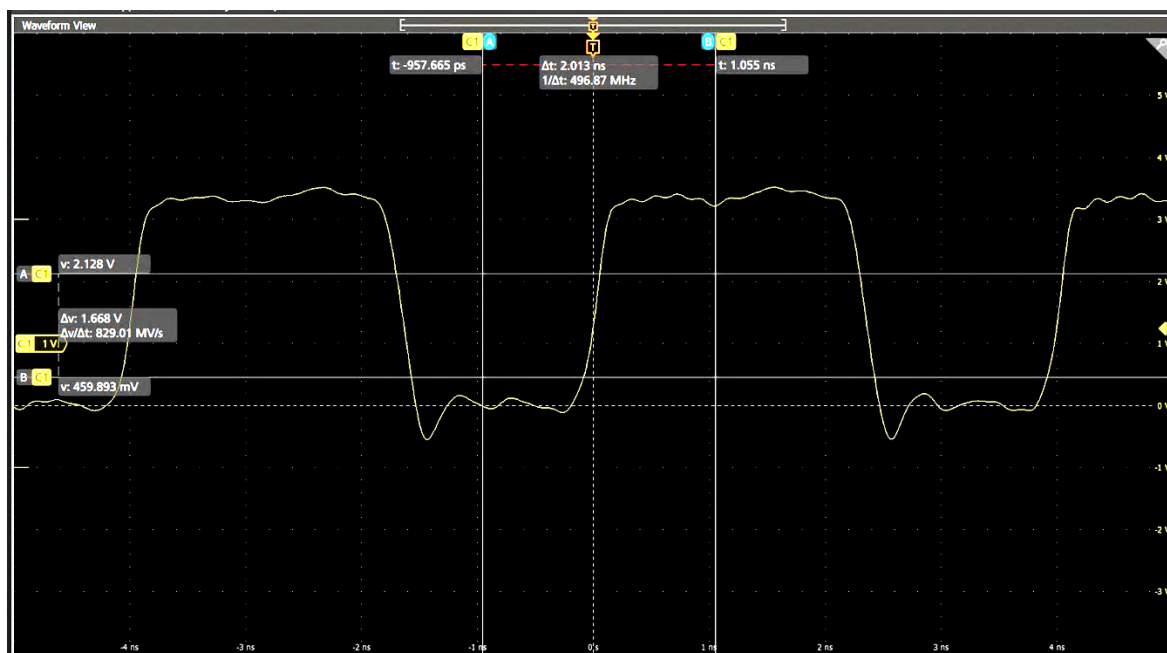


图 1-1-2

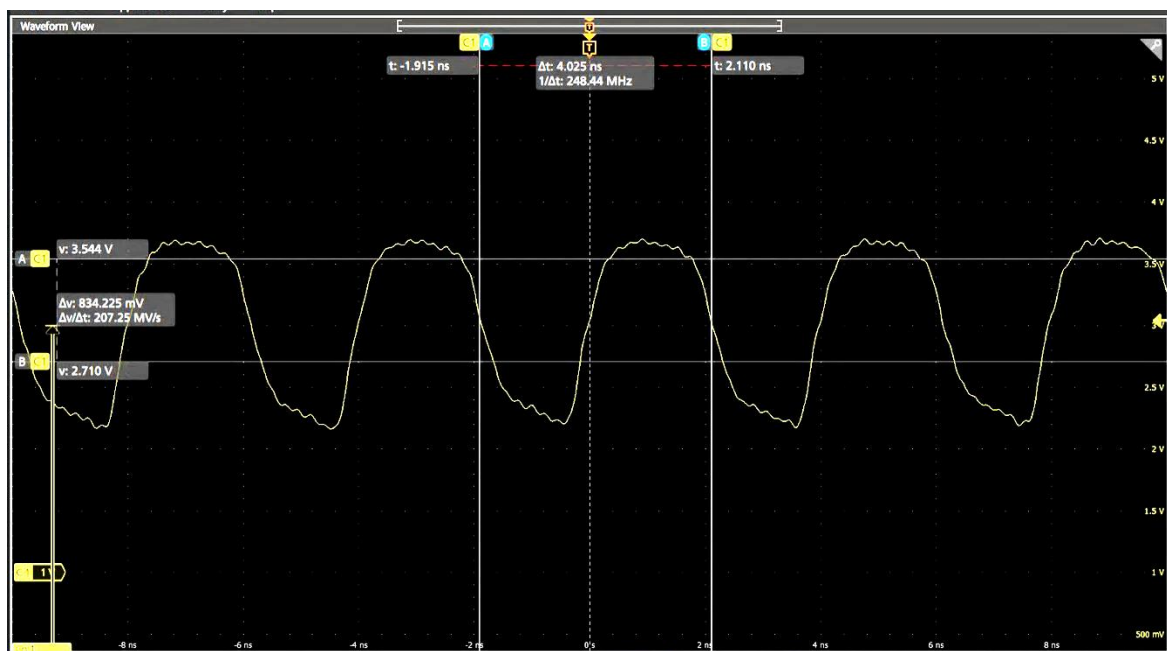


图 1-1-3

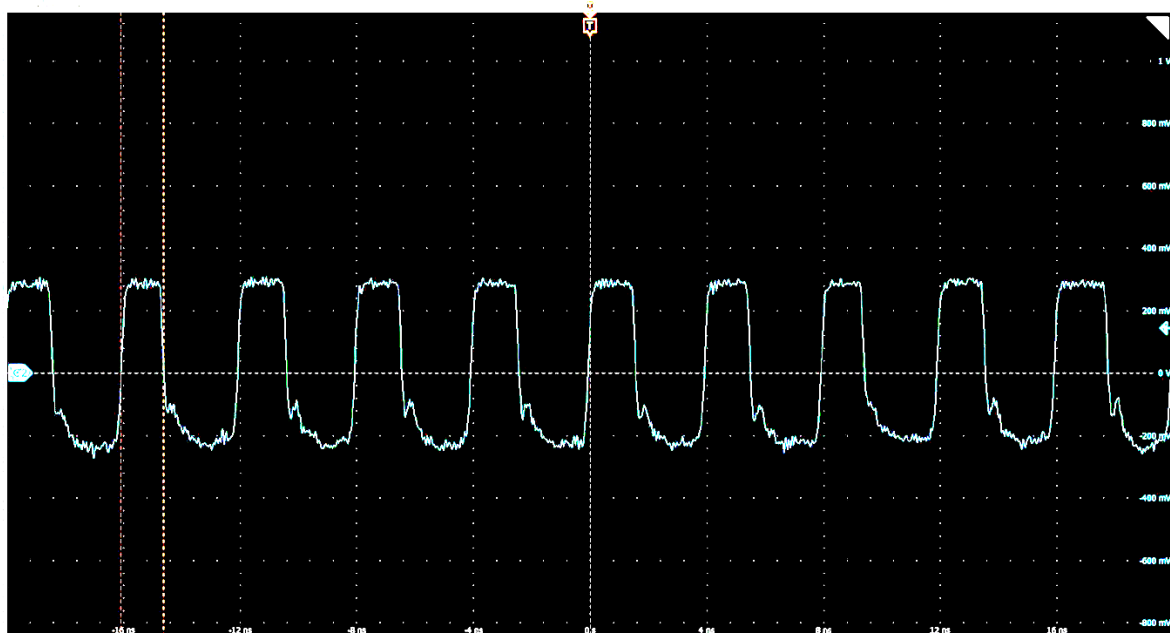


図1-1-4

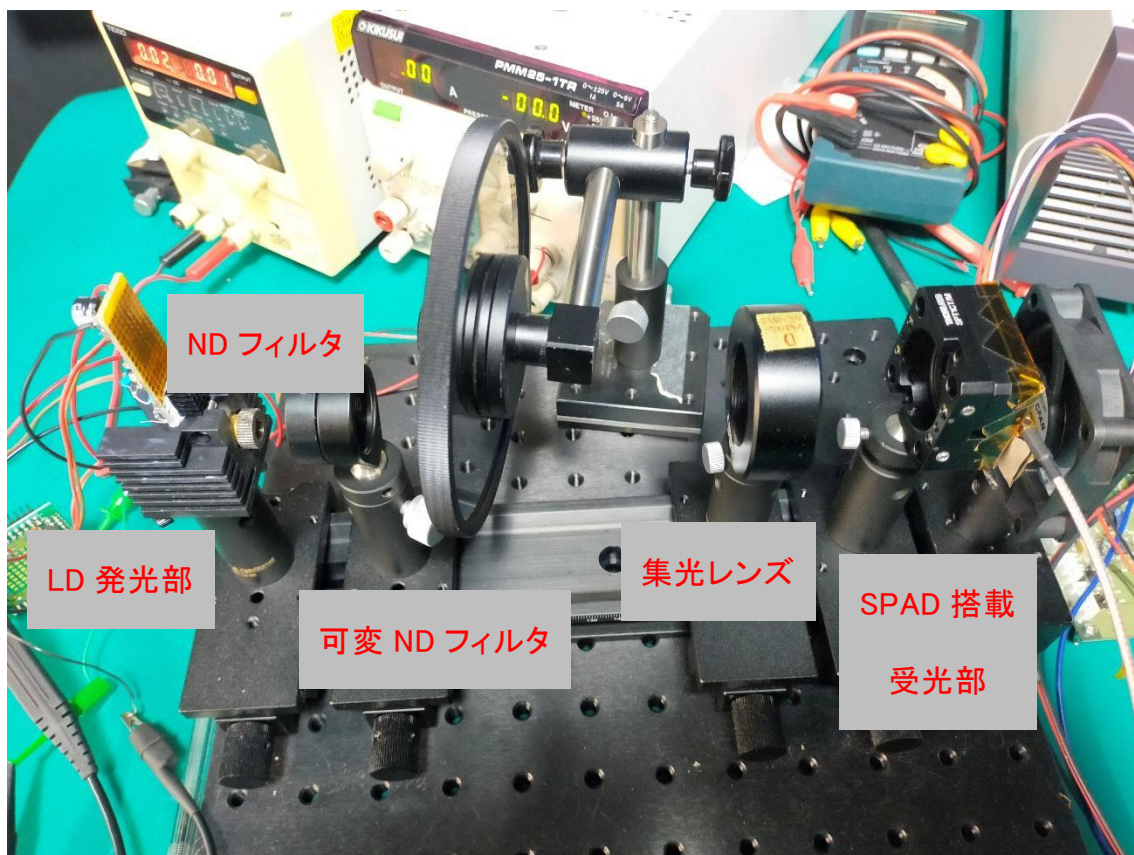


図1-1-5

図1-1-4より2nsecでLDの発光がコントロールされており、送信光において500MHzの転送レートが実現可能である事が分かる。

4. 海中での光量の減衰

図1-1-6にLambert-Beer's Lawより求めた距離と減衰量のグラフを示す。

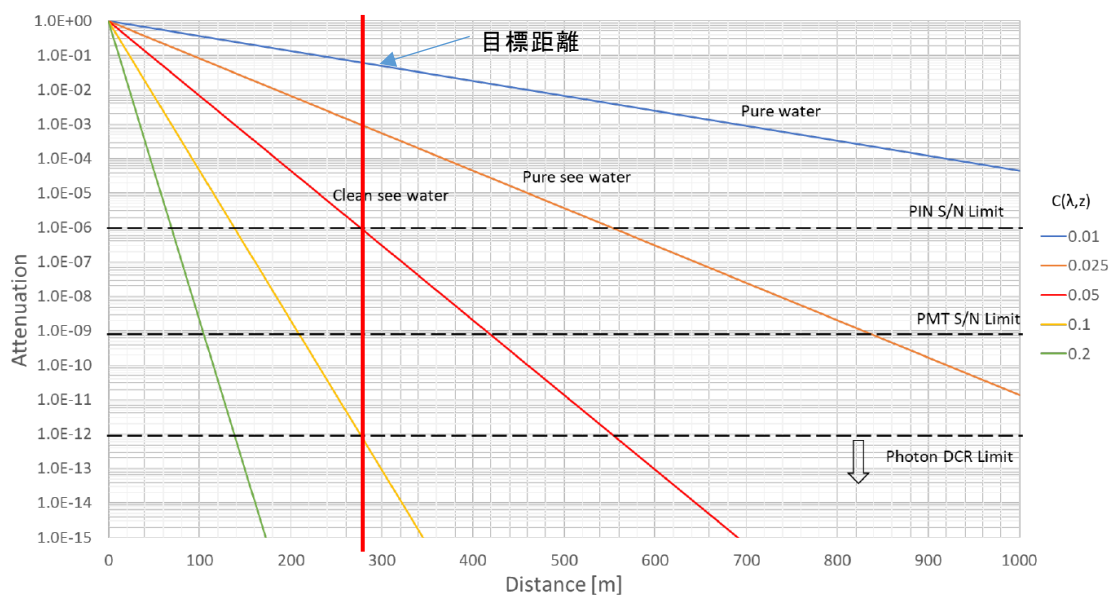


図1-1-6

図1-1-6より距離300mにおける減衰率は 10^{-12} から 10^{-7} 位が目標値として考えられる。出射光量が1Wの場合1pWから100nWとなる。送信光が周波数250MHz、m-BPSKされた場合発光時間は4nsecと8nsecとなる。以下で述べる光学系のパラメータを入れて1nW時のphoton数の概算値を求めると、光量1nW、発光時間4nsecのphoton平均値は2.26、8nsec時は4.53になる。LDより出射されるphotonはポアソン分布に従うため、分散は平均と等しくなる。図1-1-7に光量1nW時の発光時間4nsecのphoton数分布を、図1-1-8に8nsecのphoton数分布を示す。

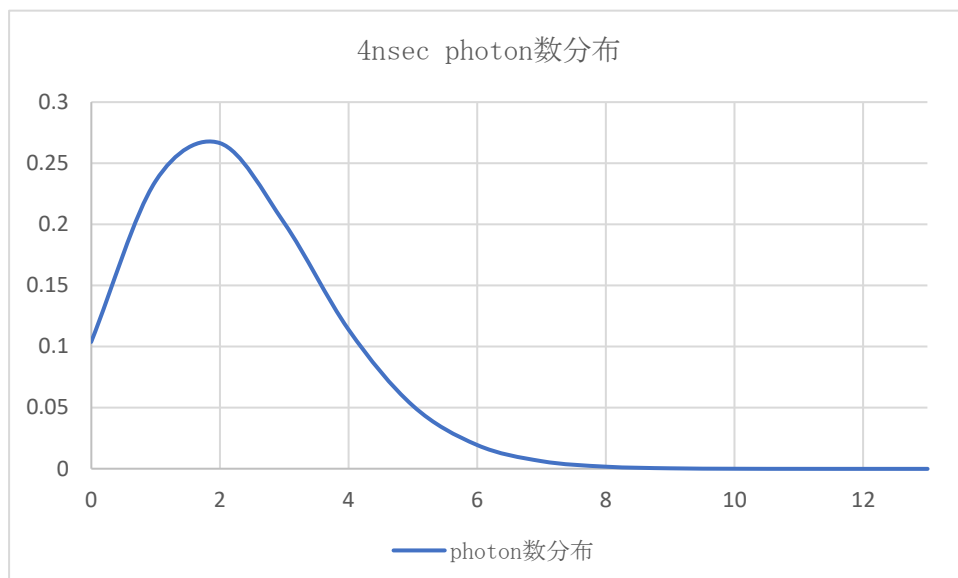


図1-1-7

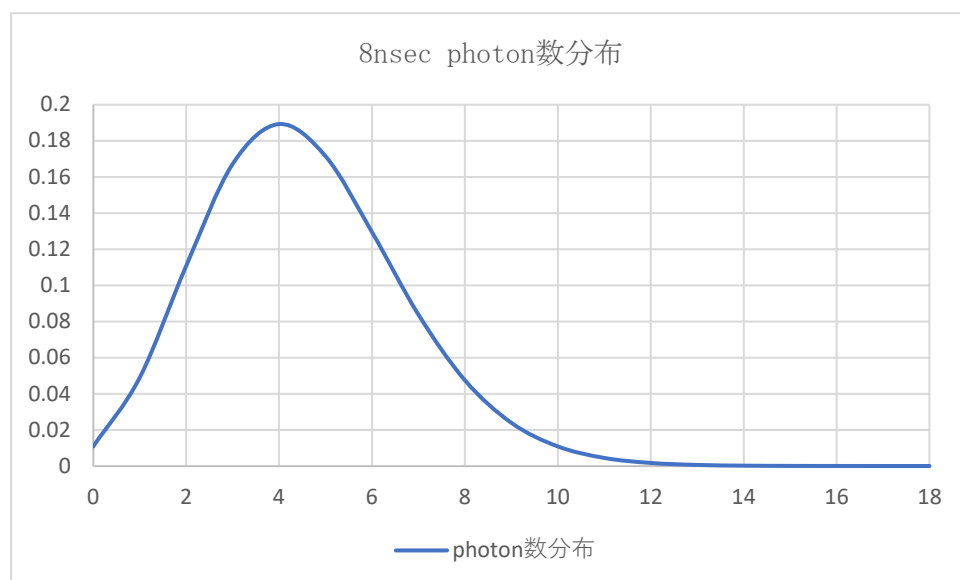


図1-1-8

以上の計算結果より1nWでの4nsecの発光時間では0個となる確率が10%程あり、海中300mの距離で送信光路250Mbpsの転送レートの場合到達光量が1nW未満であると、250Mbpsの転送レート実現が困難であると考えられる。

上記内容を元に通信で使用するFPGA(Field-Programable Gate Array)ボードより通信信号を出力し、図1-1-5に示されている評価機のLDドライバで光変調を行い、固定及び可変NDフィルタでSPAD受光量が1nWから100nWになる様に調整しながらSPAD出力信号を観測した。観測結果を図1-1-9から1-1-13に示す。何れの図も上段の黄色いラインは参照用のマスタークロックでマゼンタのラインがSPAD出力信号である。

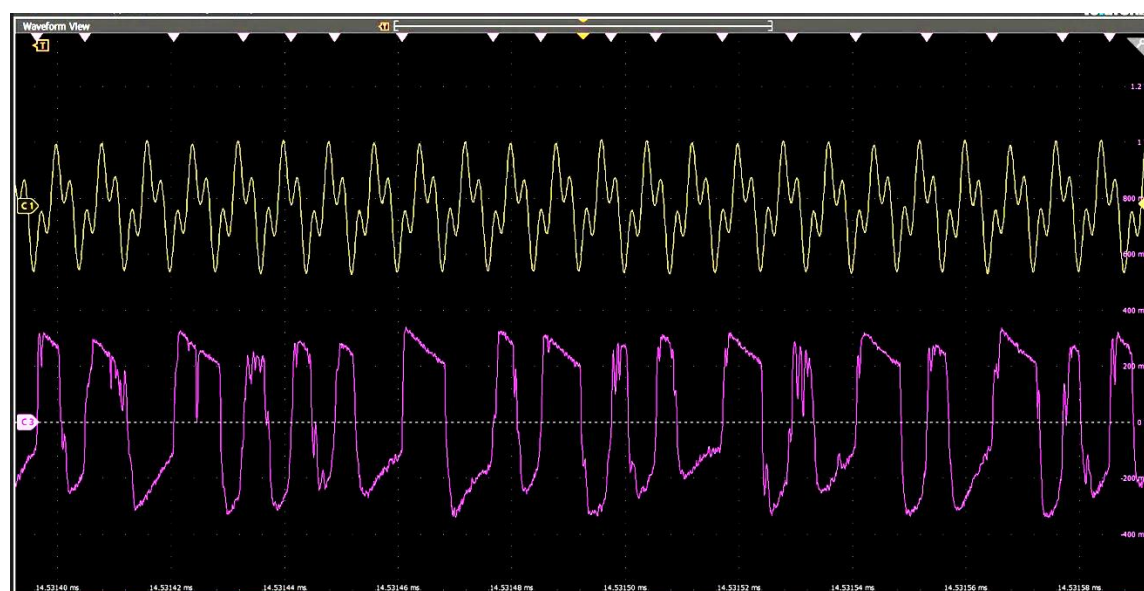


図1-1-9 100nW

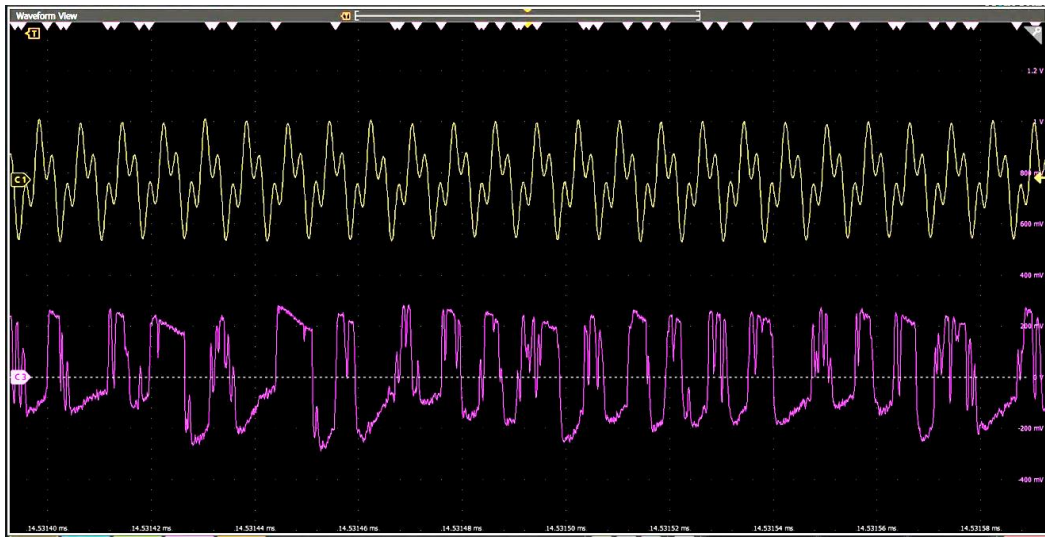


图1-1-10 30nW

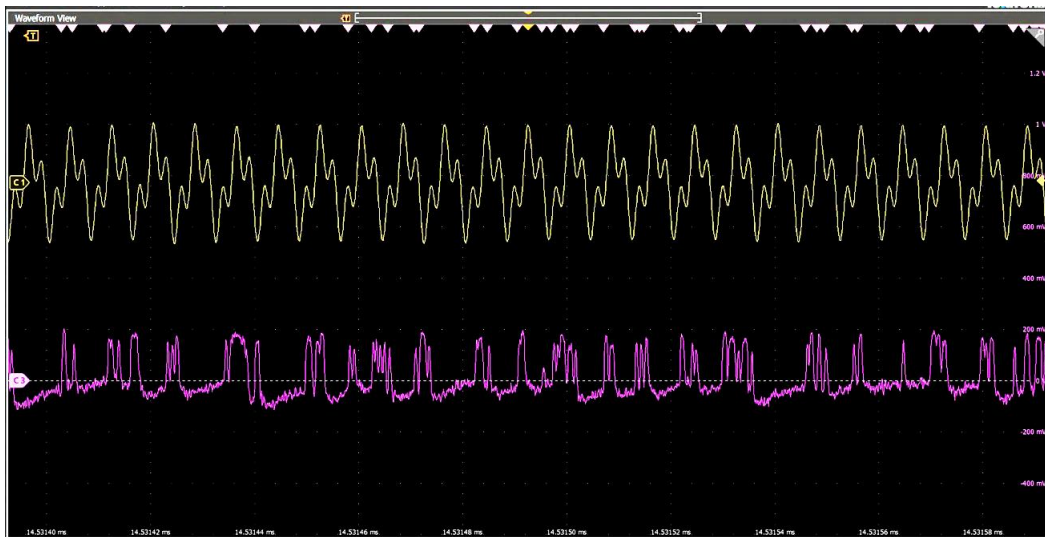


图1-1-11 10nW

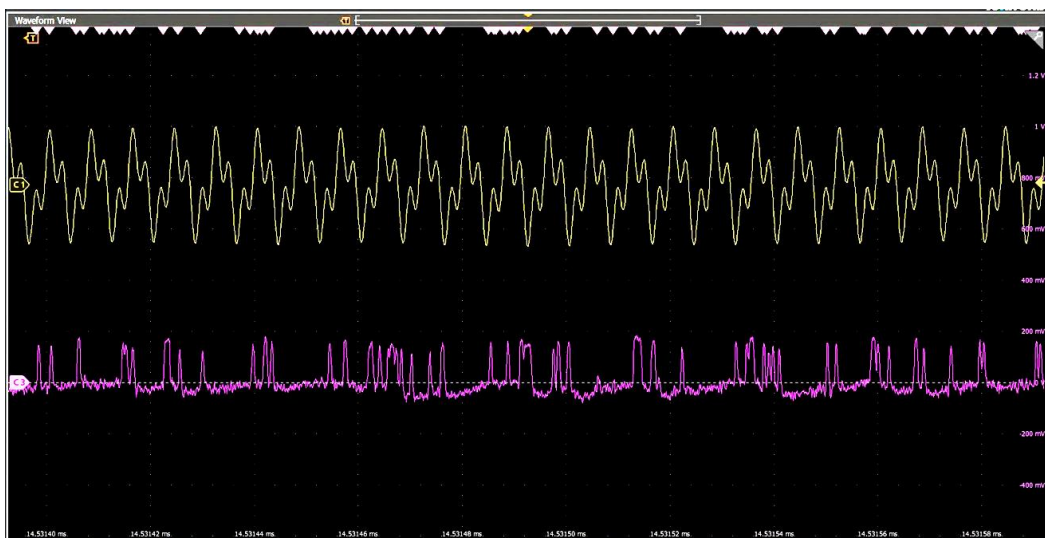


图1-1-12 5nW

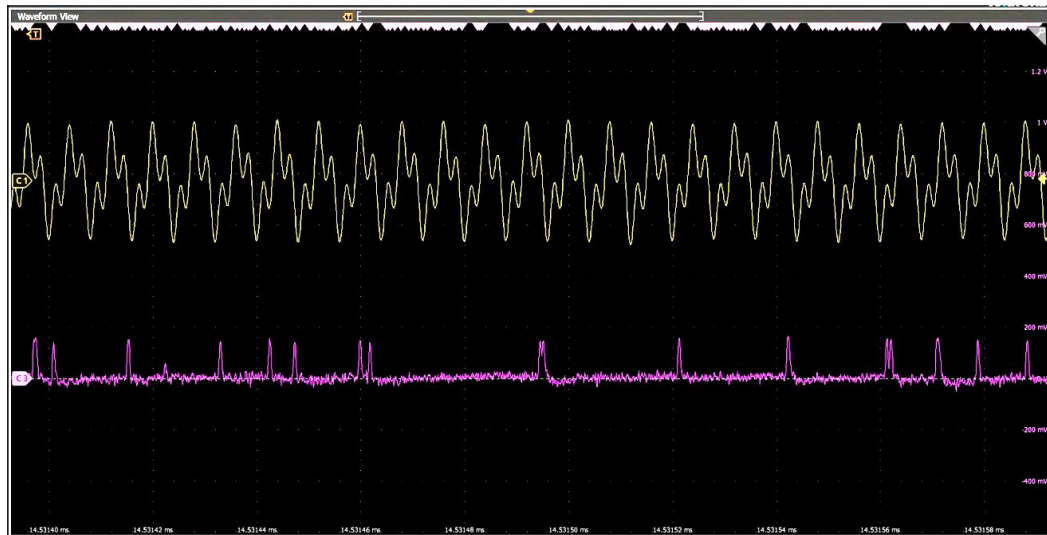


図1-1-13 1nW

図1-1-13より1nW時のSPAD出力を見ると想定されたphoton数分布より少なくなっている。光量は評価機の途中で測定しているがNDフィルタ後の光が全てSPADに入射されていない為想定数より少なくなったと考えられる

5. まとめ

レーザ光源は一般に入手可能なデバイスであり、大きさ及び取り扱いが容易という観点からLDとし、水中での光波長対光量減衰率から使用する波長を450nmと520nmとした。

出射光量1WのLD用いて転送レートがMAX. 500MbpsとなるLDドライバを作成した。海中300mの距離での光量の減衰率をLambert-Beer's Lawで求め、送信光路250Mbpsの転送レートにおける受信機での到達光量の推定を行った。結果として到達光量が1nW未満であると、250Mbpsの転送レート実現が困難であることを示した。

評価機を用いて想定光量である1nWから100nWをFPGAで変調した時のSPAD出力を観測した。これにより実海域における受光状態の想定ができた。

①-1-3. フォトン受信機の研究開発

1. 概要

①-1-2にある様に想定受光量がナノワットクラスであると、光検出器としてSPADが望ましい。海中においては距離に対して光量の減衰率が大きく、加えて、散乱による減衰がある。通信品質を保持するには送信側では送信光のビーム径が広がらない様にする必要があり、受信機側では確実に送信光を捉えるために光軸変動に追従するためのトラッキングサーボ機構が必要となる。トラッキングサーボに必要なサーボ信号は、送信光の受信機に対する角度検出をするための検出器をSPADで構成して出力信号を演算処理して求める。コリメータ光の場合対抗する光通信機のミラー角度が変化すると受光側のスポット移動を起こし、トラッキングサーボ信号が成り立たなくなる。そこで送信光はある程度拡散させる必要がある。

受信機の通信フォーマットにおいてSyncは重要な役割を果たす。データの開始点や復調クロックの調整などに用いられる。Sync検出の難しさはエラーがあった場合の補正の仕組みが無く、パターンマッチングなどの相関を取る方式に頼る点にある。本開発では他のデータエリアとの相関が低いパターンを選び出したが、実海域での試験で変更の可能性が考えられる。Syncパターンを容易に変更できるような方式とした。

全体ブロック図を図1-1-14に示す。

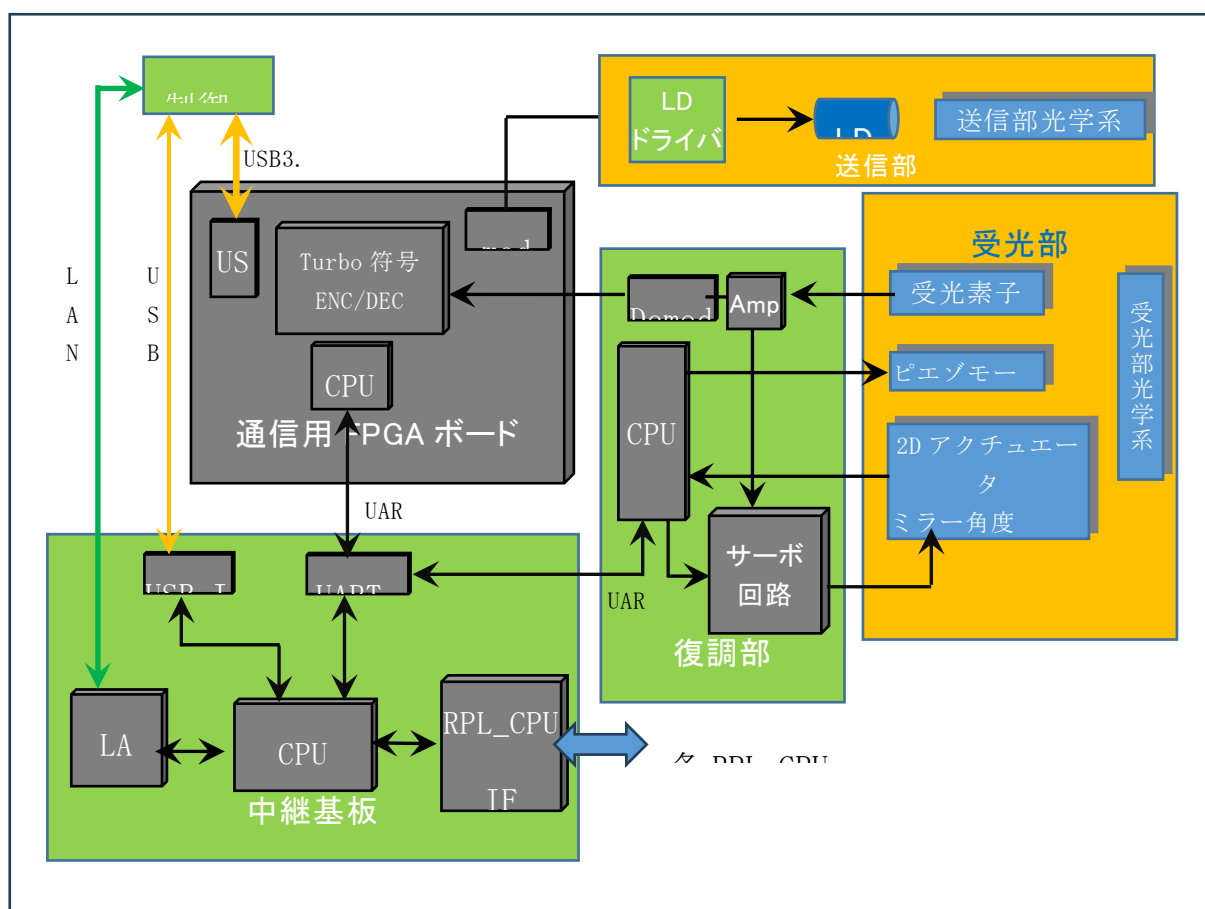


図1-1-14

図1-1-14の全体ブロック図を用いてフォトン受信機について説明する。

フォトン受信機としては受光部、復調部及び通信用FPGAボード（送受信機能）から成りなっている。但し、全体ブロック図には信号の流れを理解するために、送信部、制御PC及び中継基板が図示されている。

1-1. 受光部

入力光として1Wから1nW以下まで90dB以上のダイナミックレンジがあり、広いダイナミックレンジに対応する必要がある。受光素子出力は復調部で適切に増幅及び信号処理された後、復調回路で復調後デコードされデータは制御PCに転送される。また受光素子出力信号は同時にサーボ回路にも供給され、入力光の光軸傾きを計算して2軸のミラーアクチュエータ制御信号としてドライバに入力される。2軸のミラーアクチュエータからはミラー角度情報が出力され、復調部、中継基板を経由して制御PCに送られる。制御PCではこの情報を用いてジンバル制御を行う。受光部光学系においてPCからの制御信号によってピエゾモータに取り付けられたリレーレンズを駆動して拡散度合の調整を行う事が可能になっている。

1-2. 復調部及び通信用FPGAボード

復調部及び通信用FPGAボードに関しては、「①-2. フォトン検知による光無線通信の変復調技術の研究開発」で詳述するので、ここでは簡単に機能と信号の流れだけを説明する。

復調部には、通信用に受光素子出力を復調する機能、サーボ用に受光素子出力を演算処理して制御信号を生成する機能、及び制御PCからのコマンド処理や2軸のミラーアクチュエータからの角度情報などを制御PCに送出するインターフェース機能を有するCPUがある。通信用FPGAボードには、復調された信号が入力されTurbo符号による誤り訂正が行われ通信用フォーマットに変換後USB3.0によって制御PCに送出される。制御PCからはUSB3.0を介して送信データが送られ、送信フォーマットに変換されLD変調用信号が作成される。

2. 光路

2-1. 研究課題

研究課題を以下に列举する。

- ・海中での光量減衰に対して、受信光をロス少なく取り込める光学系であり、また受信光は通信だけでなくトラッキングサーボ用信号として使用される為、両方の信号品質を出来るだけ満足させる必要がある。
- ・受信光量のダイナミックレンジは前記の様に90dB以上ありとても広い事から、光路や電気回路での工夫が必要となる。
- ・受信光量が微小光量の場合、送信時において光学部品における反射など送信光の迷光の光量が受信光量より大きくなり問題となる。迷光対策が必要となる。
- ・ROVへの搭載に対しては、大きさ、重量、電力、放熱対策など光学系を含むメカ設計への制限がある。これらを考慮した光学設計が求められる。

2-2. 課題の解決方法

送信光をロス少なく受光するには送信光としてコリメータ光が望ましいが、対抗する光通信機のミラー角度が変化すると受光側のスポット移動を起こし、トラッキングサーボ信号が成り立たなくなる。通信における品質とトラッキングサーボ信号品質の両立という課題に対する解決方法としてビームエキスパンダとリレーレンズを用いて送信光の拡散度合を調整する方式を用いる事とした。

ビームエキスパンダとして3種類の案を作成し比較検討した結果、光量及び波面収差が良いものを選んだ。

表1-1-2

	レンズ①	レンズ②	レンズ③
案1	DLB20×2	無	DLB120
案2	SLB40×2	無	DLB120
案3	SLB50×2	SLB300	DLB120

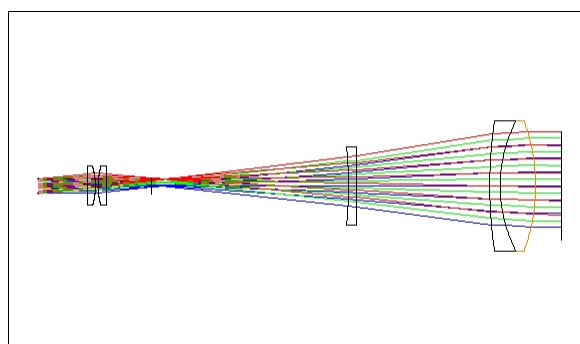


図1-1-15

ここで、DLB(Doublet with achromatic correction)：アクロマティックダブルレットまたは球面亜クロマティックレンズ、SLB(Surface Lens Back)：平凸レンズである。

入射角度に対する波面収差及び入射光量を計算したグラフを図1-1-16及び図1-1-17に示す。

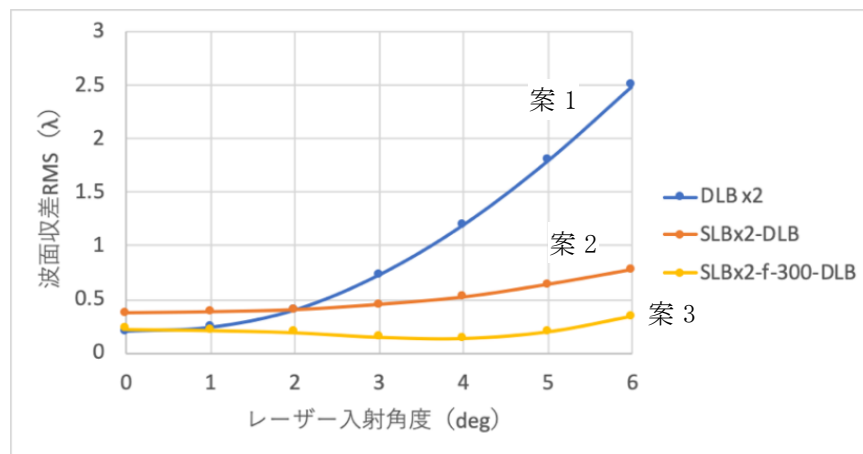


図1-1-16

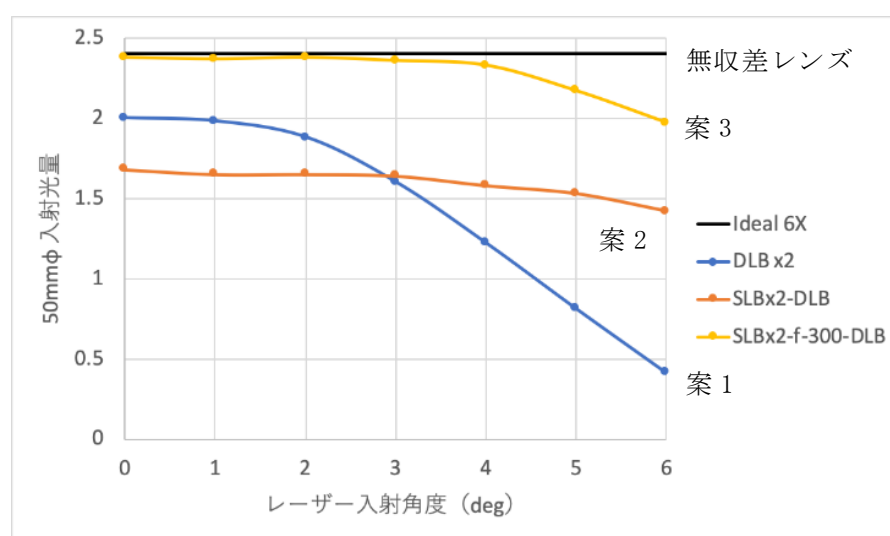


図1-1-17

計算結果より案3をビームエキスパンダとして用いる事とした。

次の課題である受光量の広いダイナミックレンジは、通信系においては電気回路上サチュレーションが起きたとしても問題は無く、受光量差を用いるトラッキングサーボ信号生成に問題が発生する。課題解決方法としては光量が多い場合は、4分割PIN photodiodeを使用し、光量が少ない場合は光を4等分する4分割プリズムと4個のSAPDを使用してトラッキングサーボ信号を生成する方式を採用した。

図1-1-18にトラッキングサーボに関する光学系を示す。

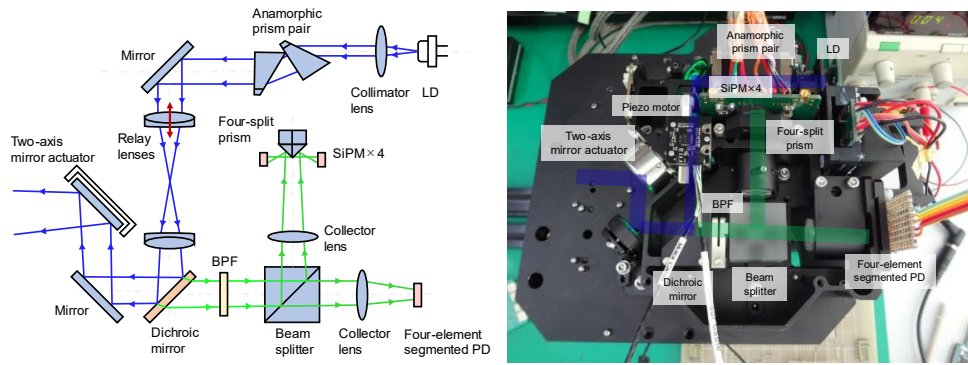


図1-1-18

4分割プリズムを使用したトラッキングサーボ信号生成について述べる。4分割SPADがあれば容易であるがその様なデバイスが存在せずデバイス開発になることから、光を4分割するプリズムを採用してトラッキングサーボ信号が得られるようにした。図1-1-19に4分割プリズム並びに4個のSPADの配置図を示す。

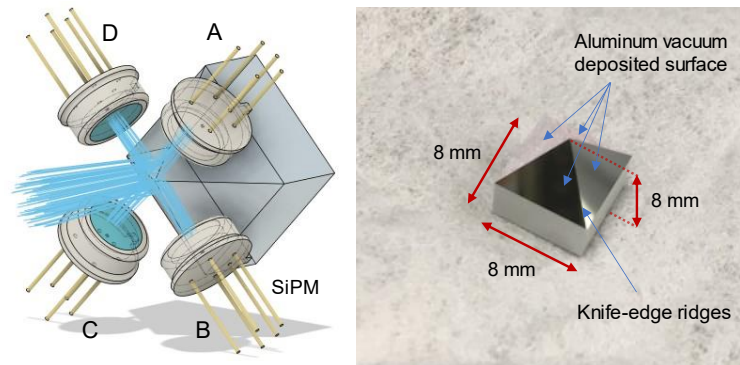


図1-1-19

4分割プリズムは光学系がコンパクトに展開できる理由から反射型とし、45°の角度を持ったピラミッド形状で表面にはアルミ蒸着膜を付けている。プリズムは光軸方向に対して45°回転させて配置し、その周りにSPADを4個配置する。このプリズムの頂点に収束光を当てると四方に光が分割され、入射光の角度が変化するとそれぞれのSPADに入る光量の割合が変化する。この特性は4分割PIN-photodiodeと等価になる。直交するx-y軸から成る4象限のそれぞれに対してSPAD-A、-B、-C、-Dの光量(A, B, C, D)を配置した時、入射光の角度に対するトラッキングサーボ信号はx軸(S_x)、y軸(S_y)それぞれに対して以下の数式で求められる。

ここでx軸はヨー方向、y軸はピッチ方向になる。

$$S_x = \frac{A + B - (C + D)}{A + B + C + D} \quad (1-1-1)$$

$$S_y = \frac{A + D - (B + C)}{A + B + C + D} \quad (1-1-2)$$

それぞれの差分信号は光量総和で正規化している。シミュレーション結果を図1-1-20に示す。このシミュレーションは装置間距離が10m、300mの時のビーム角度におけるトラッキングサーボ信号計算値である。x軸、y軸とも同じ形となる。

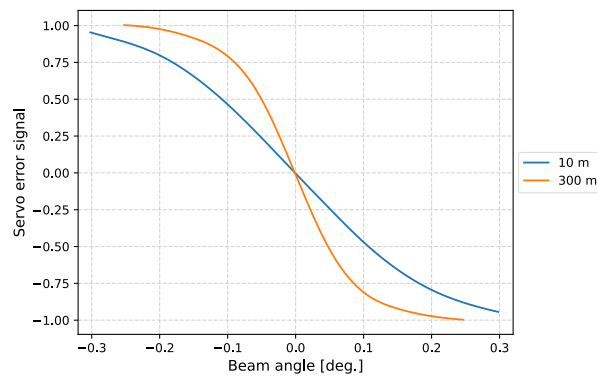


図1-1-20

図1-1-20から分かる様にトラッキング信号のダイナミックレンジと感度は距離に依存している。対応策となるトラッキングサーボの自動ゲインコントロールの手法は、光ディスクドライブなどで以前より行われている。検討内容については「⑥-3. 精追尾および粗追尾用レーザ光源およびフォトン受信機の試験および実験データの取得、実海域での実験に向けたシステムの改修や調整」に記載する。

AR (Anti-Reflective) コーティングの実力値は設計波長に対して反射率は0.1%以下と考えられる。LD出力パワーが1Wを想定しておりプリズムで考えると反射戻り光量は $10\mu\text{W}$ ほどになる。その他の迷光発生源としては、海中の散乱戻り光によるクロストーク、ROV出射光窓の反射ホットスポットの発生などがあり、受光量がナノワットの微小光量通信においては無視できないノイズとなる。解決策としてはLDの波長を450nmと520nmに分けて、光学部品としてはDichroic mirrorとBPF (Band Pass Filter) を用いて迷光を減少させる光路とした(図1-1-18参照の事)。

ROV搭載上の制限に関しては「3. メカ開発」に記載する。

3. メカ開発

3-1. メカに関する要求仕様

光学ブロックをx軸、y軸の2次元で動作出来る事と光学ブロックで発生するLD及びLDドライバで発生する熱及びSPADでの発熱を効率良く外部に逃がす構造である事である。ROVの主耐圧容器において内径が水圧によって狭まる可能性がある。この場合でも支障なく動作できる構造である事が要求仕様に付加される。

3-2. 組立の説明

球体Assy. にLDとSPADの放熱部材及びExpander Lens Assy. を取り付ける。放熱部材は熱的に球体から分離している。

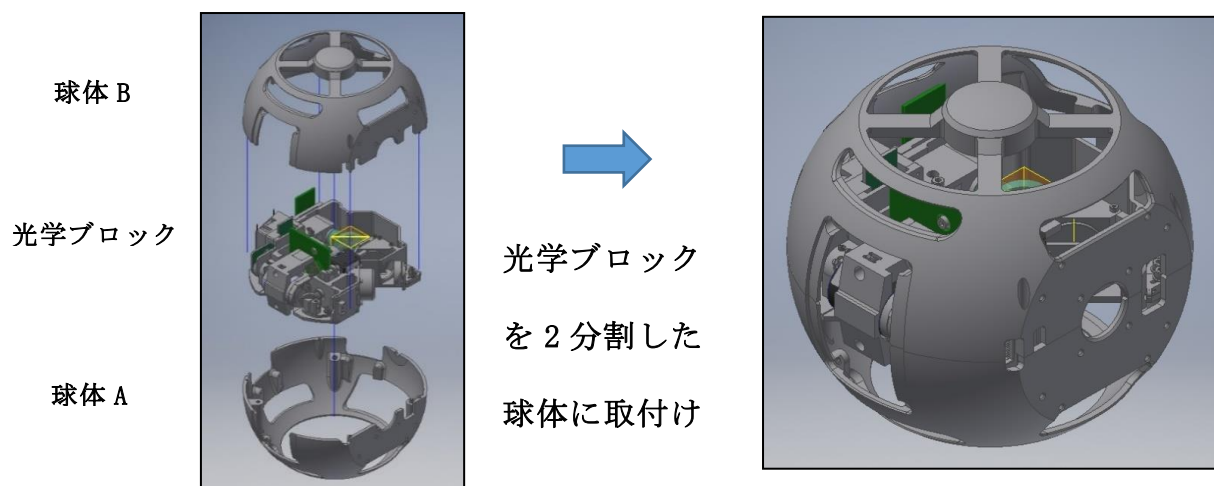


図1-1-21



図1-1-22

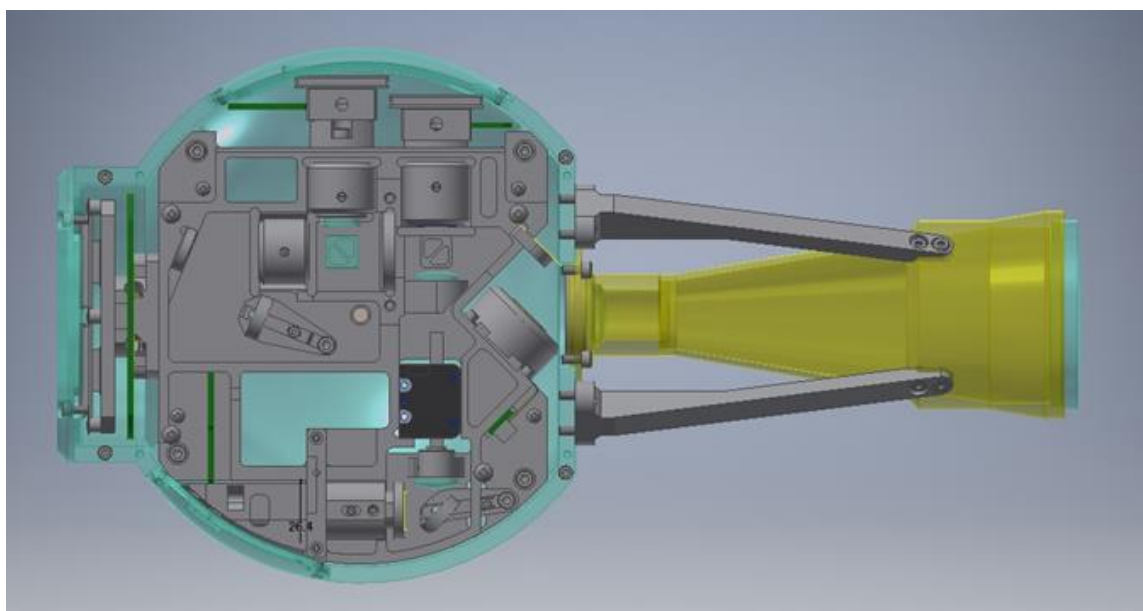


図1-1-23

球体Assy. を筐体に収納する。

筐体は上下 2 分割で構成され球体との接触点を下筐体の 4 カ所とし、上筐体の上部位置に付勢ばねを介して球体を押圧する。この構造により球体Assy. はx軸、y軸方向に粗調が可能となる。

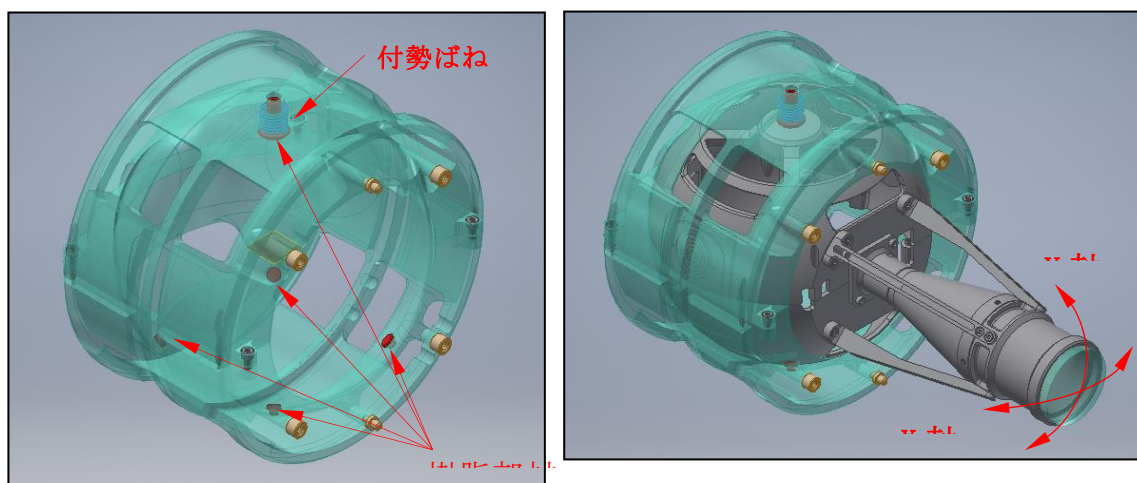


図1-1-24

x軸、y軸動作用モータに直結したカムが回転し、リンク機構により中央の部材が直線運動を行う。図1-1-25と図1-1-26に完成状態の図面と写真を示す

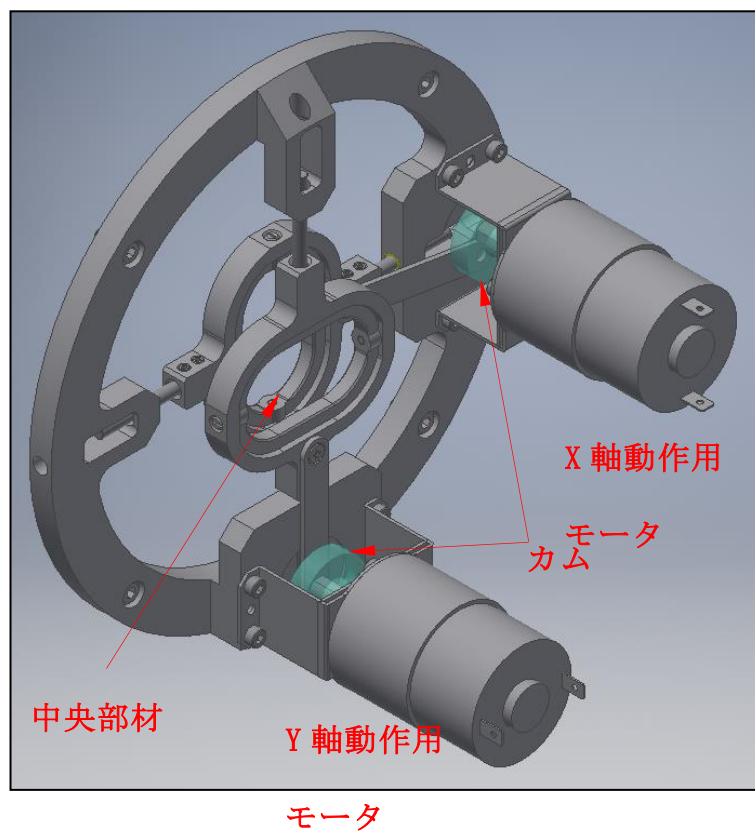


図1-1-25

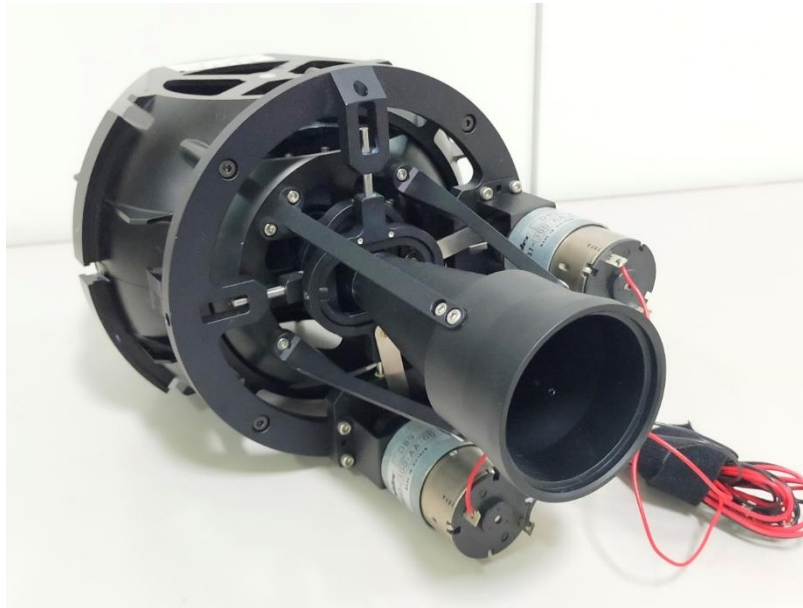


図1-1-26

3-3. 熱実験

精迫尾機構にはLD、LDドライバ、SPAD等発熱体が存在するため、放熱対策は重要である。原理試作機で熱実験を行い、主耐圧容器に効率よく放熱するための筐体設計への情報収集を行った。熱実験ではLD(450nm 1W)を発光させ熱源として代用した。図1-1-27に示すように光学ブロックはサーボ検証に使用するため搭載せず、熱電対を各熱源に付けカバーをして温度測定を行った。

実機に対しては原理試作機熱実験で得られた知見より筐体設計を行った。

図1-1-27において、2-5 4分割プリズムホルダー、2-6 LDホルダー、2-7 球体、2-8 外気温、2-9 SPAD4ホルダー(SPAD4ホルダーとはサーボ用角度誤差信号生成には4つのSPADを用いるためそのホルダーの開発名称)は熱電対による測定ポイントを示す。

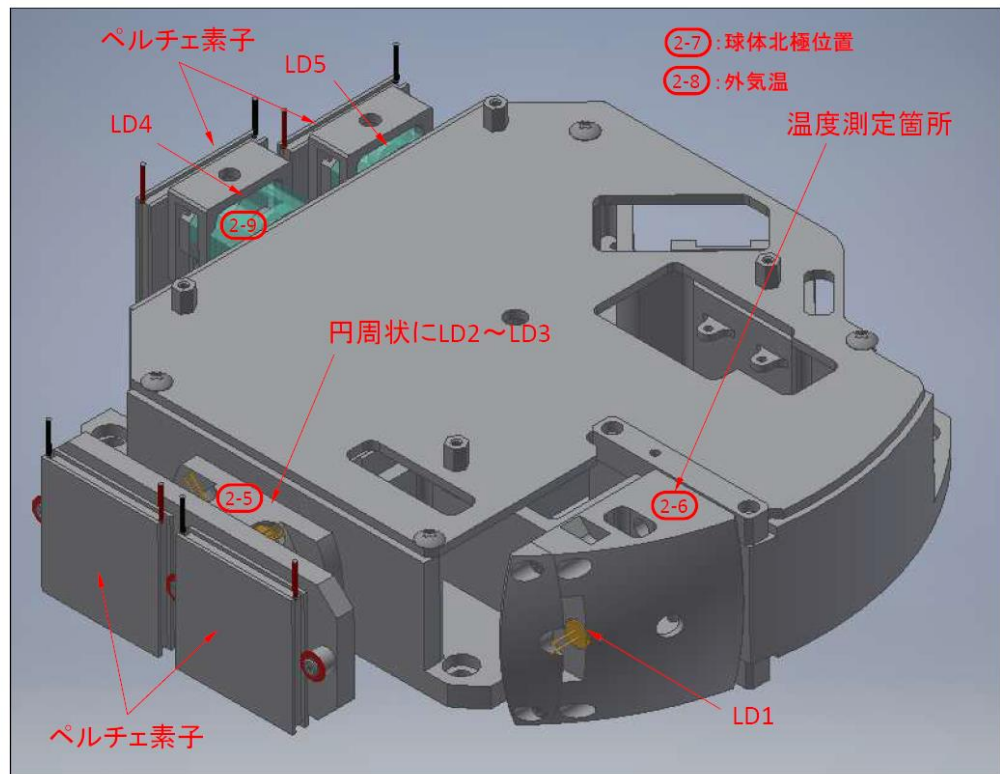


図1-1-27 熱源位置と温度測定位置

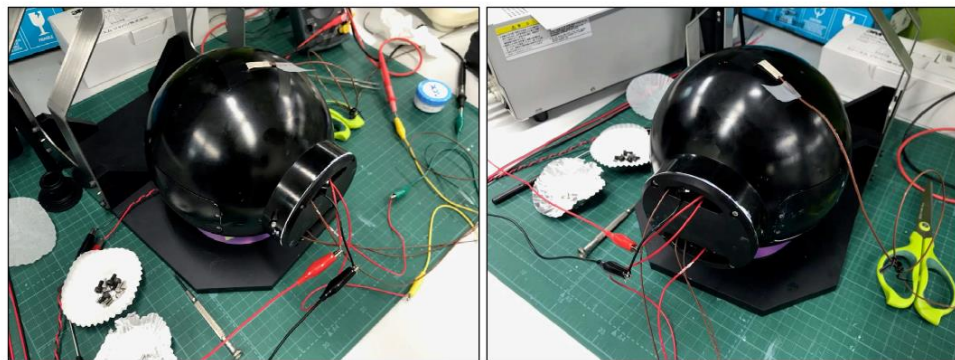


図1-1-28 精迫尾原理試作機温度測定外観

(検証結果)

代用熱源のLDには0.5A(光量凡そ0.8W)を流し、LDとしての消費電力はおよそ3.2Wとなっている。図1-1-29に測定結果を示す。緑の線が球体温度を示していて、各発熱体から熱が伝わっていない事が分かる。

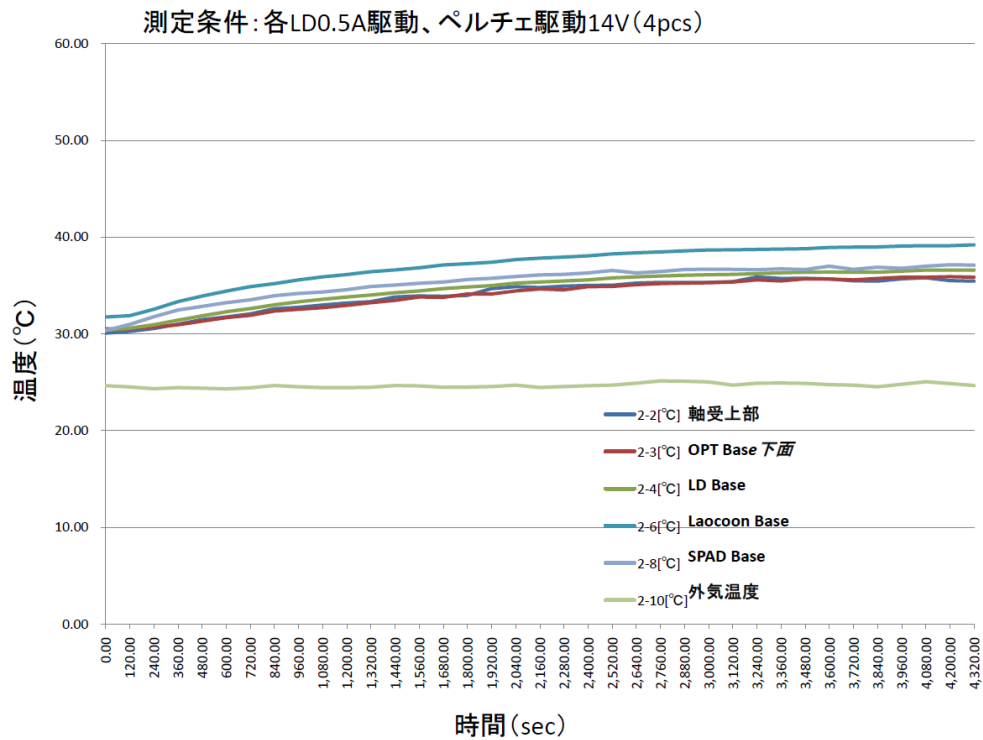


図1-1-29

4. サーボ回路

4-1. 概要

光軸制御は閉ループ、古典制御及びデジタルフィルタを用いたデジタルサーボで構成している。オープンループ特性を決定するためには、外乱の把握が必要で光軸角度変化量と変化する周波数及び制御後の許容角度誤差を決める必要がある。

外乱に関しては実験海域でのROVの姿勢制御における残留誤差が主なものと考えられるが、現時点では測定値等が無い為経験値による予想しかない。経験的予想値としては光軸の角度誤差が $\pm 1^\circ$ 、周波数は1 Hzとの指摘によりこの数字を元にオープンループ特性の設計を行った。光軸制御期間中にサーボループ構成要素である2軸のミラーアクチュエータに積算されるオフセットは、ミラー角度検出器出力を用いてジンバルによりオフセット補正を行う構成となっている。

トラッキングサーボ引き込み動作においては、ROVによる姿勢制御、RPLによる通信機の対向制御が行われている状態で、ミラーを振って(Wobble動作)送信光を探索して引き込み動作を行うが、今回はミラーを振る方法としてスパイラルスキャンを用いて検討を行った。

前述の様に受光量のダイナミックレンジ対応でトラッキングサーボ信号を4分割PIN photodiodeで検出する方式(Photocurrent mode)と4分割プリズムで分けられた光を4個のSPADで検出する方式(Photon-count mode)を光量によって切り替えて使用する。

トラッキングサーボの実験はまず原理試作機で基本的な評価を行い、評価結果を元に実機にて最終評価を行った。

研究課題を纏める。

- ・オープンループ特性
- ・トラッキングサーボ引き込み動作検討
- ・Photocurrent modeとPhoton-count modeの特性評価

4-2. 課題の解決方法

i) オープンループ特性

現在予想されている外乱は $\pm 1^\circ$ 、1Hzで通信における許容角度誤差は $\pm 0.05^\circ$ となっている。オープンループの設計目標値は1Hzで26dB以上となる。

オープンループ特性において2軸のミラーアクチュエータの特性が主たる要素となる。駆動系にはボイスコイルにより $\pm 5^\circ$ で稼働するOptotune社のプロトタイプを使用し、誘電体多層膜でコーティングされた直径15mmのミラーを搭載して2軸のミラーアクチュエータを構成した。x軸、y軸それぞれの周波数特性評価結果を図1-1-30、図1-1-31に示す。

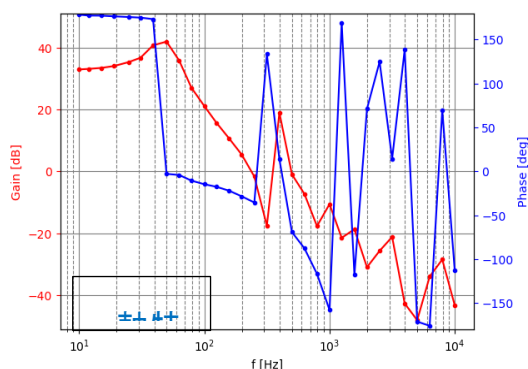


図1-1-30

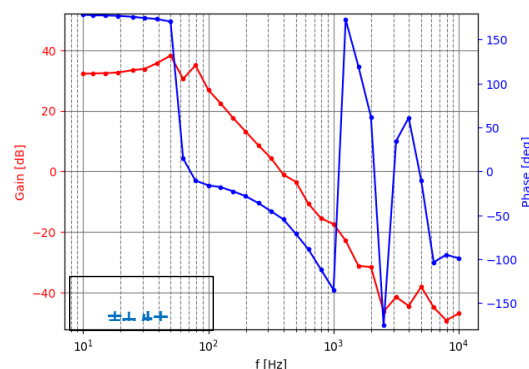
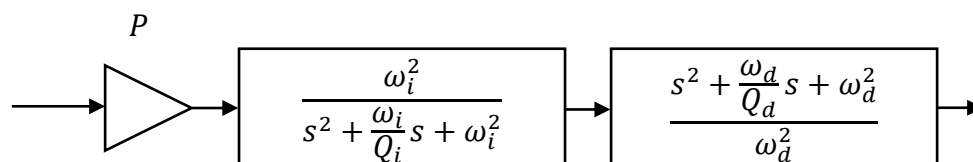


図1-1-31

図1-1-30より x 軸特性には400Hzで共振点がありフィルタでの対応が必要である。対策後PID (Proportional-Intefrval-Derivative) 設計しシミュレーション及び実測した結果を以下に示す。PIDはx軸、y軸とも同じ構成、同じパラメータとした。



$$P = 5000$$

2 次 LPF

$$f_i = 0.1, f_d = 400$$

2 次 HPF

$$Q_i = 0.5, Q_d = 0.1$$

図1-1-32

シミュレーション結果を図1-1-33に示す。

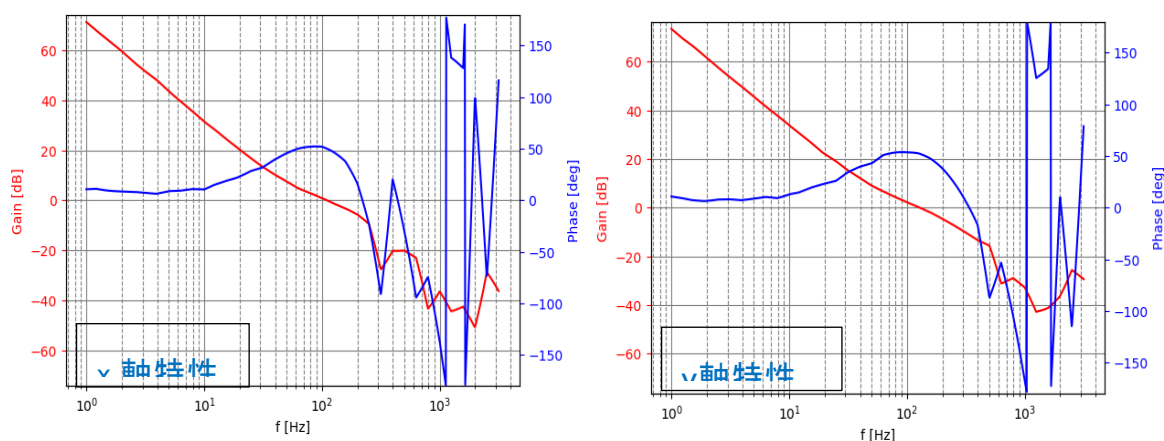


図1-1-33

y軸に比べてx軸は200Hzを超えると位相が回り込んでおりゲイン余裕が少なくなっている。

測定結果を図1-1-34に示す。

図1-1-20においてエラー検出感度は距離により異なる事が示されているが、本測定では短距離の感度となっている。グラフにおいて点線は実験値を破線はPID計算値を示す。

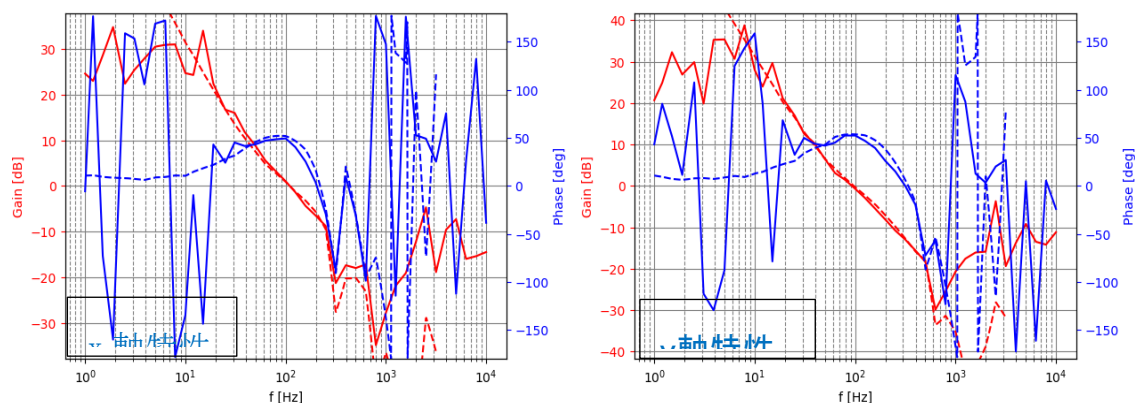


図1-1-34

長距離系の感度は短距離系に対して2dB程上がり、特にx軸側で位相余裕が少なくなっている。この点に関しては前述のトラッキングサーボの自動ゲインコントロールで対応する。グラフ上1Hz近傍が切れているが26dB以上のゲインが確保されており、目標であった $\pm 0.05^\circ$ は達成されている。

ii) サーボの引き込み動作

原理試作機を用いてトラッキングサーボの引き込み動作について検討を行った。

原理試作機は2軸のミラーアクチュエータの代わりにガルバノミラーをx軸、y軸に配置し、LDは405nm(40mW)、450nm(100mW)を使用し光変調は行っていない。トラッキングサーボ信号検出には4分割PIN-photodiodeを用いている。x軸方向に動く加振器とy軸方向に動く加振器を距離50cmになる様に配置し、加振器に原

理試作機を載せて加振器を動かして外乱発生装置として用いている。スパイラルスキャン時のガルバノミラーの振れ角は84 cm離れたスクリーン上で最大半径18.5 cmであったことから実測値で $\pm 12.8^\circ$ となり、実機の $\pm 1^\circ$ より大きく振っている。これは実験での確認を容易にするためである。ビーム径は長辺30 mmで短辺対長辺は1対2.5の楕円形である。

原理試作機の光学系を図1-1-35に配置図を図1-1-36にガルバノミラー振れ角測定系を図1-1-37に示す。

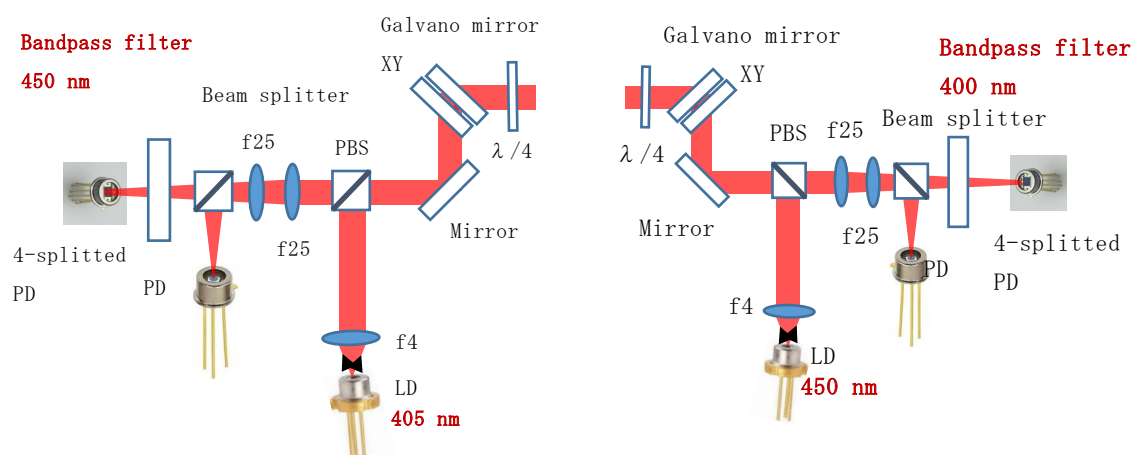


図1-1-35

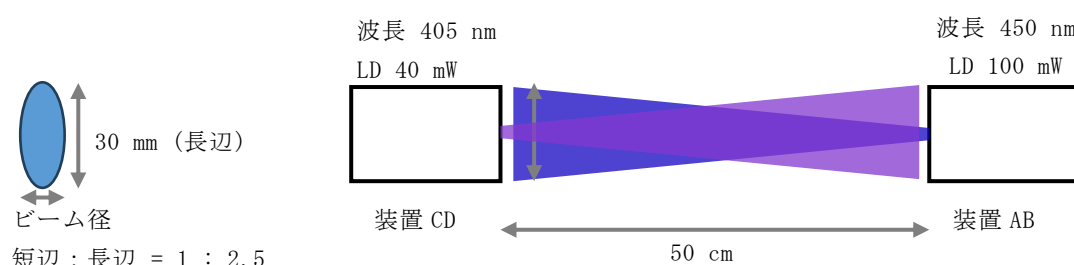


図1-1-36

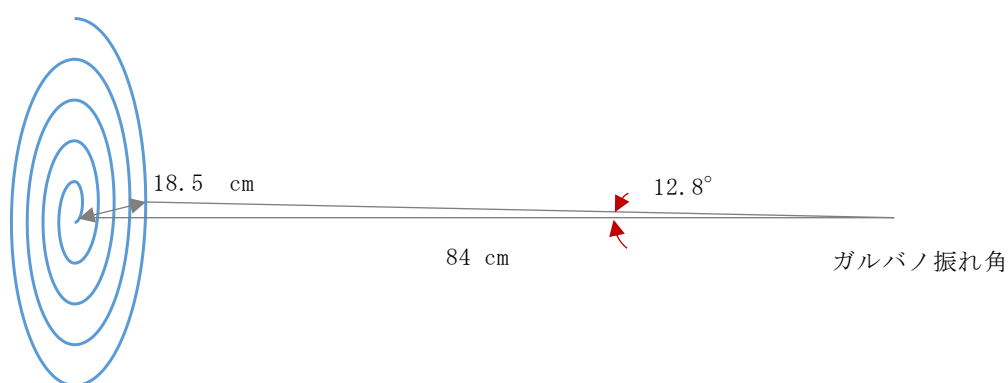


図1-1-37

スパイラルスキャンについて述べる。スパイラルの開始点から終了点までを1スパイラルとして、開始点から 360° 回転した時を一周期（ここではrow(行)と称す)とする。今回使用したシステムではサンプリング周波数は5kHz (200 μ sec) で1rowのサンプル数 (Sとする) とrowの数 (Nとする) によって1スパイラルの時間 (T_s) が決まる。

$$T_s = 200 \times 10^{-6} \times S \times N \quad (1-1-3)$$

これ以降周波数 $F_s (=1/T_s)$ を用いスパイラル周波数と呼ぶことにする。

トラッキングサーボ引き込み動作実験では、2台の加振器を動かし外乱を加えた状態で、両原理試作機のガルバノミラーを動かしてスパイラルスキャン動作させ、引き込みまでの時間計測を行った。

装置ABの加振器はx軸方向、装置CDの加振器はy軸方向に動くようにセットし、 $\pm 5^\circ$ 動かした図1-1-38に上記内容を図示する。

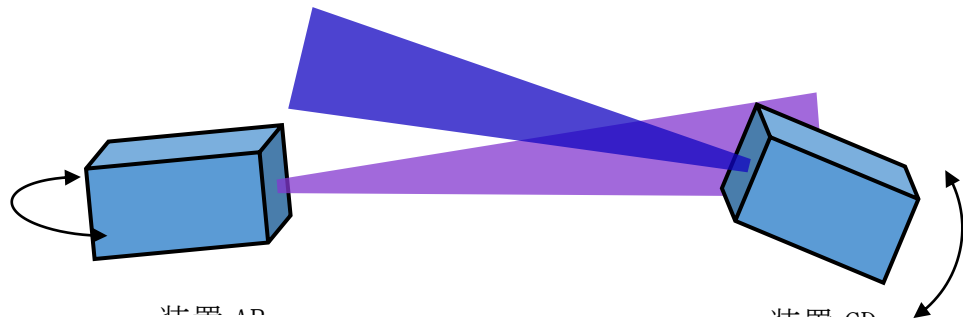


図1-1-38

装置CD側のスパイラル周波数を23.06Hzに固定し、装置AD側のスパイラル周波数は0.14Hz、6.09Hz、11.37Hz、21.78Hzとした場合の引き込み時間(sec)を計測した。測定結果を表1-1-3に示す。

表1-1-3

F_s [Hz]	No1	No2	No3	No4	No5	No6	No7	No8	No9	No10	平均	偏差
21.78	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1.1	0.3
11.37	1	1	1	1	3	1	1	1	1	1	1.2	0.6
6.09	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1.1	0.3
0.14	2	1	2	2	2	1	1	1	1	2	1.5	0.5

以上の結果から、トラッキングサーボ引き込み動作においてスパイラルスキャンで引き込みが可能である事が実証された。

iii) トラッキングサーボ信号検出

Photocurrent modeは光ディスクドライブ等で広く用いられているので、Photo-count modeについて述べる。その後実機にてPhotocurrent mode及びPhoton-count modeで行ったトラッキングサーボ実験について述べる。

a) Photon-count mode

Photocurrent modeでのトラッキングサーボ信号生成はオーディオ帯域以下である事から容易であるが、Photo-count modeでは変調信号周波数（今回は250MHz）の帯域からトラッキングサーボ信号を得る為、SPADの電波を拾いやすい特性は海中では電波吸収の為問題とならないが地上実験では対策が必要となってくる。SPAD出力信号に対してEMI-filterを使用して問題となるノイズを除去後、RFディテクタICを用いて高周波検波を行った。通信用信号はEMI-filter前で取り出すのでEMI-filterの影響はない。

b) Photocurrent modeでのトラッキングサーボ実験

実機にはピエゾモーターでリレーレンズを動かしてビーム径を変える機能があるので、2台の実機を55cm離れた時のビーム径が50mmになる様に調整してS字の測定と、オープンループの測定を行った。実測上の問題としてビームエキスパンダを取り付けると、2台の距離を取る必要がある為、ビームエキスパンダは外した状態で測定を行っている。Photon-count modeでもビームエキスパンダは外した状態で測定を行っている。ビームエキスパンダをつけた状態での実験結果は「⑥-3. 精追尾および粗追尾用レーザ光源およびフォトン受信機の試験および実験データの取得、実海域での実験に向けたシステムの改修や調整」で記載する。

図1-1-39は実機の写真でLDの波長は450nmである。送信光(450nm:青)、受信光(520nm:緑)が図示されている。

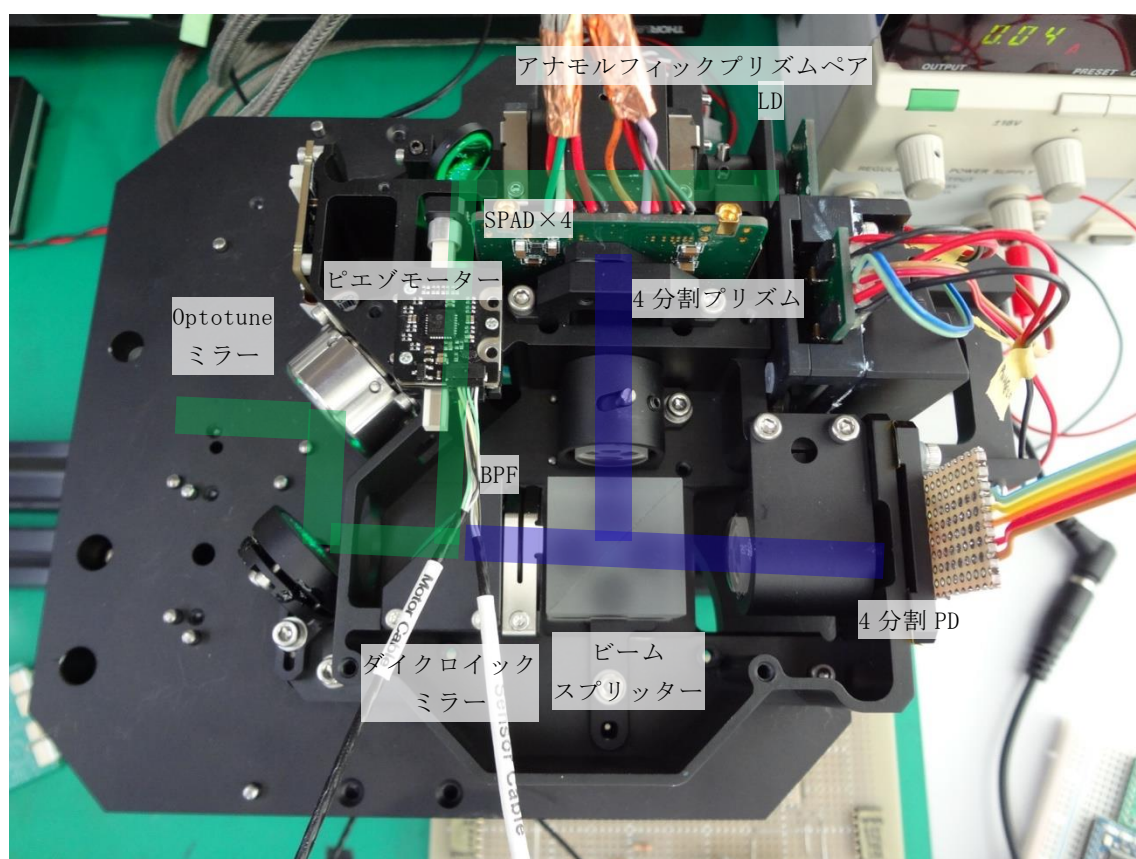


図1-1-39

図1-1-40に測定したS特性を示す。y軸方向に対してx軸の感度が下がっているが、ビーム形状が楕円となっている為で、ビームエキスパンダを取り付けた状態では改善される。

この後のサーボ実験では感度補正の為y軸側のPIDでPを半分の値に設定している。

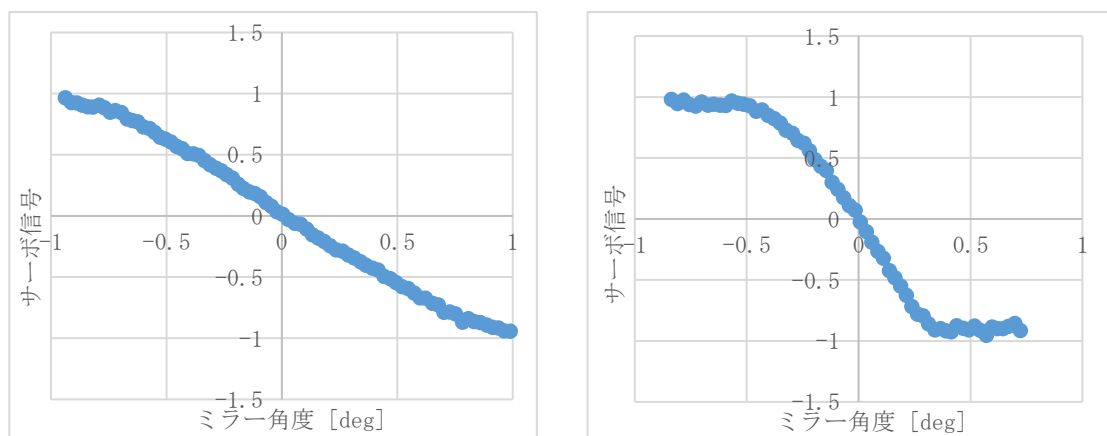


図1-1-40

x軸及びy軸のPIDの構成を図1-1-41に、オープンループ特性を図1-1-42に示す。

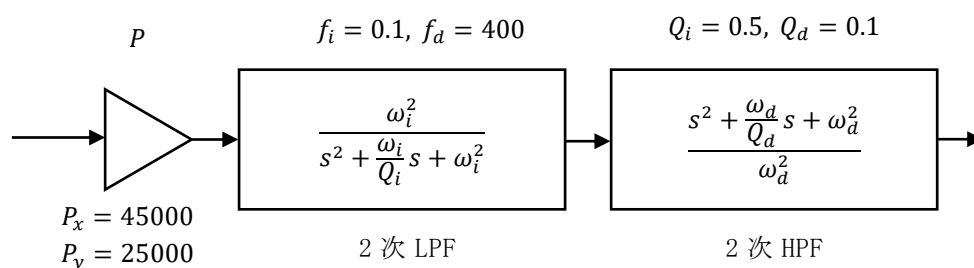


図1-1-41

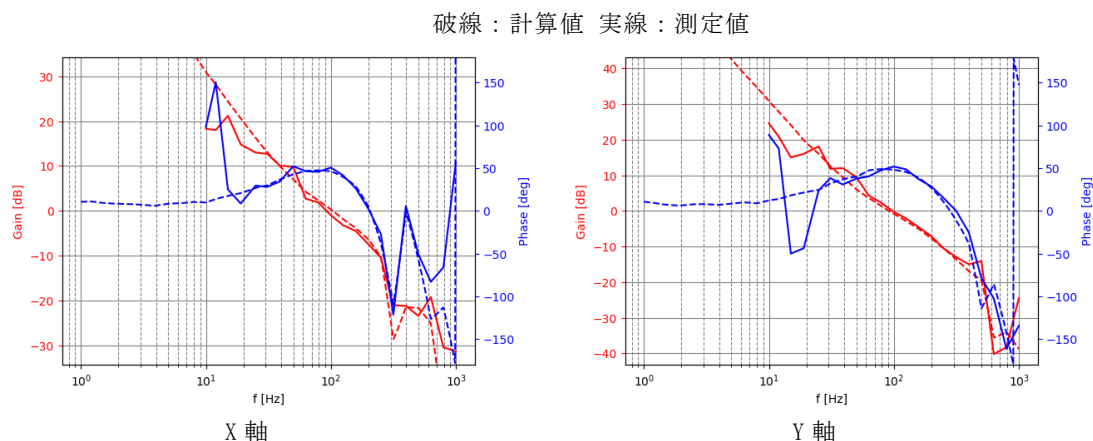


図1-1-42

計算結果と測定結果はよく一致している。

c) Photon-count modeでのトラッキングサーボ実験

図1-4-43に測定したS字特性を示す。x軸側の特性が反転しているが測定系の問題である。ダイナミックレンジがPhotocurrent modeに比べて狭い。これはSPAD感度が高くまた電波を拾い易い特性や実験上光学系が筐体に入っておらずシールド効果が無い為、除去しきれないノイズの影響がS字測定結果に出ている。

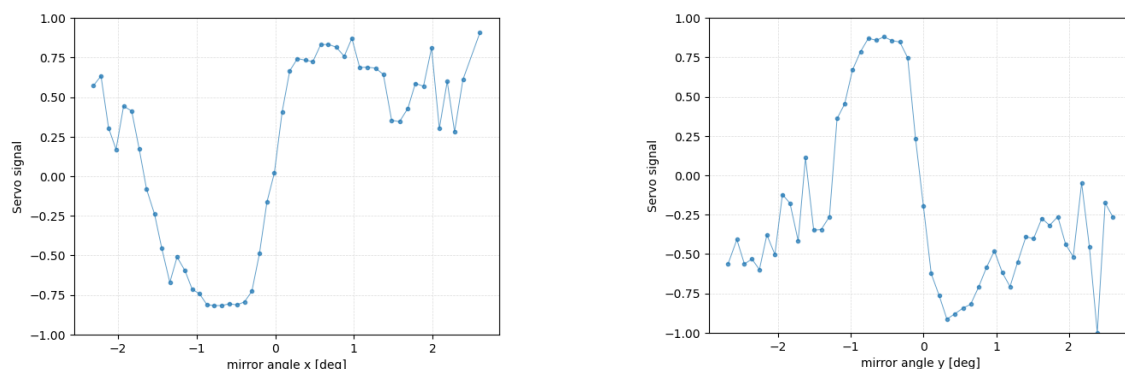


図1-4-43

Photon-count modeのPIDは、IDはPhotocurrent modeと同じで、x軸及びy軸のPの値はS字特性に合わせて変更してある。図1-4-44に計算結果及び測定結果を示す。

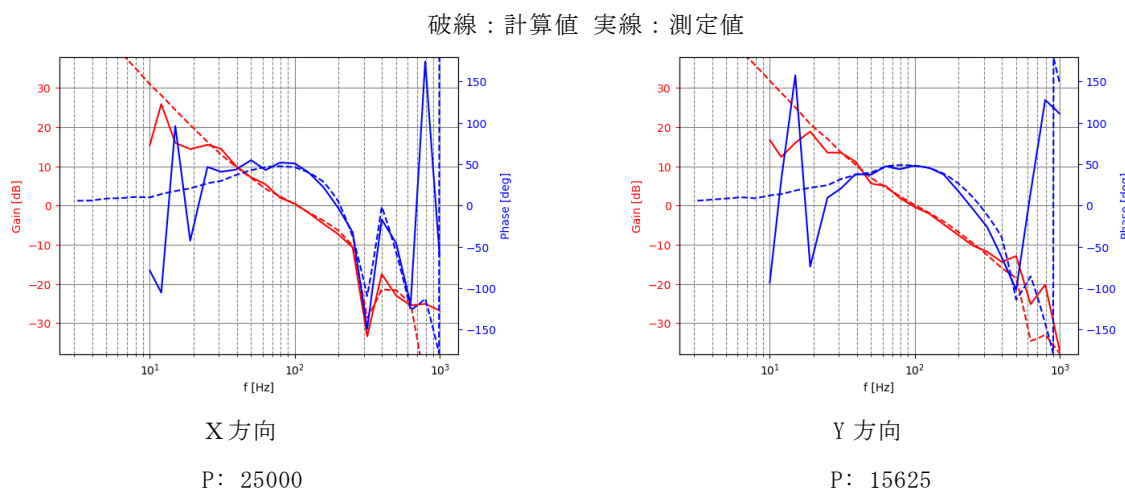


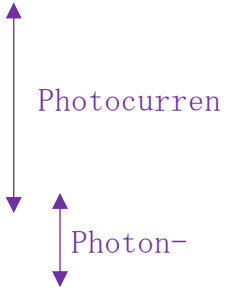
図1-4-44

Photocurrent mode同様計算結果と測定結果はよく一致している。

d) Photocurrent modeとPhoton-count modeの適応範囲

Photocurrent modeとPhoton-count modeの適合範囲を求める。
条件としてビーム径400mmで光パワーは1 W、集光するレンズの直径は50mmとすると、レンズ後の光量は15.625mWとなる。水中距離をパラメータに水中での減衰率をかけてSPADに届く光量を計算した。結果を表1-1-4に纏める。

表1-1-4

距離 (m)	吸収と散乱による減衰率	光量 (μW)	Photocurrent/ Photon-count
1	95.12%	14863	
2	90.48%	14138	
3	86.07%	13449	
4	81.87%	12793	
5	77.88%	12169	
10	60.65%	9477	
20	36.79%	5748	
30	22.31%	3487	
40	13.53%	2115	
50	8.21%	1283	
100	0.67%	105	
200	0.0047%	0.73	
300	0.00003%	0.0047	

計算結果よりサブnW<Photon-count mode≦数 μW ≦Photocurrent modeがそれぞれの適合範囲と考えられる。光量が数 μW の時Photocurrent modeとPhoton-count modeがクロスオーバーするので切り替えタイミングとなる。切り替え判定はPhoton-count modeで使用するRFディテクタ出力値で行う。

5. まとめ

- ・「精追尾及び通信用レーザ光源の開発」では精追尾及び通信に適合する光変調方式を選定した。LDを光源とするレーザドライバの開発を行い1Wレーザで500Mbpsの可能性を示した。これより100Mbpsの目標が達成できることが示された。
- ・「フォトン受信機の研究開発」では光路開発、メカ開発及びトラッキングサーボ検討を行い、夫々の課題を解決する事が出来た。
- ・トラッキングサーボの引き込み動作においては、スパイラルスキャンから引き込みが可能であることが証明された。
- ・実機においてPhotocurrent mode及びPhoton-count modeともトラッキングサーボは安定しており、両者ともオープンループ特性は計算結果と測定結果がよく一致している。

①－2. フォトン検知による光無線通信の変復調技術の研究開発

①－2－1. 概要

変復調は2-PPMやBPSKを参考にして独自形式のものとしている。復調ではSync検出と共にパターンマッチングを用いている。エラー訂正にはTurbo符号を使用した。全体の構成を図1-2-1に示す。

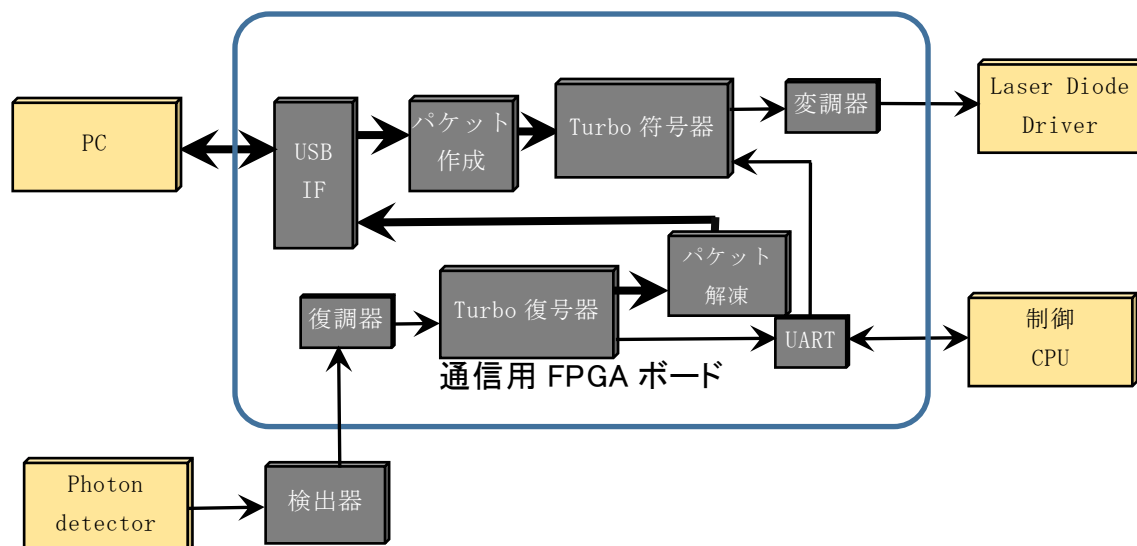


図1-2-1

通信用FPGAボードでは変復調、エンコード/デコード、パケットの作成及び解凍、各種インターフェース機能を有している。Syncの生成はFPGAボードで行うが、Sync検出は外付け回路の検出器で行っている。検出器はSync検出以外に復調機能を有している。復調機能を有しているのはSync検出と同様に実験による変更修正を容易にするためである。成果を表1-2-1に纏める。

表1-2-1

項目	目標値	成果
誤り訂正	誤り訂正後 100Mbps で $BER \leq 10^{-6}$	受光量 30nW 訂正前で、通信容量 110Mbps、SNRは約5dBである事から、符号化率80%のターボ符号による訂正で $BER \leq 10^{-6}$ を実現

①-2-2. 変調方式

BPSKは信号レベルの遷移でデータを表し、同じ値が連続する場合に位相を合わせのために遷移が挿入される。本方式ではデータの値で遷移の有無を表して、データの境界には必ず遷移が挿入されるという形式となっている。フォトン通信機においては微小光量の領域でSPAD出力はフォトンパルス列になる為、信号レベルの遷移は検出できなくなる。本方式ではパルス列の塊によって遷移を把握し、データ値を予測する事が可能となる。図1-2-2にデータフォーマットを記す。

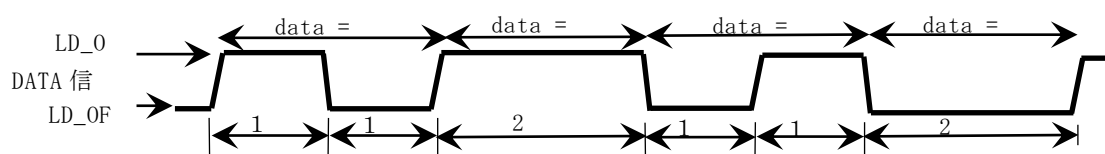


図 1-2-2

1tは4 nsecで1bitは2tの8 nsecとなる。

Timing diagram for the 16C45 I2C interface. The diagram shows three signals: SYNC, bit rate (bit 速率), and DATA signal. The SYNC signal is high for the first 10 clock cycles and then low. The bit rate is shown as a series of pulses with a period of 6t. The DATA signal is a square wave. The diagram is labeled with '16C45' and 'I2C'.

①-2-3. 復調方式

The diagram illustrates the data processing flow. A SPAD sensor provides data to a comparator. The comparator's clock is derived from a 375MHz clock and an inverted 375MHz clock. The comparator outputs data to a 9-bit shift register. The 375MHz clock is also divided by 3 to provide a clock for a 9-bit shift register and a 9360 divider. The 9-bit shift register outputs O-detection and pattern detection signals to a SYNC detector. The 9360 divider outputs a GATE signal to the SYNC detector. The SYNC detector outputs a VWR clock to a 32-bit FIFO. The 32-bit FIFO outputs NRZ data to the Turbo FPGA and a 125MHz RD clock back to the FIFO. The 9360 divider also outputs a period signal to the Turbo FPGA.

SPADで受信された信号はコンパレータを通して2値化され、図1-2-4に示す375MHz CLOCKで駆動される9bitのシフトレジスタへ入力される。シフトレジスタの値を表1-2-2に示す0検出パターンと照合して受信データを0と1のNRZ信号にする。375MHz CLOCKはデータの3倍のクロックであるので、3分周したシフトクロックでNRZ信号をFIFOへ送る。0検出パターンのpattern2とpattern5は受信データが3分周のタイミングより少し早く入っており、pattern3とpattern6は少し遅くなっている。Bit同期検出回路で早かったり遅かったりするパターンが3回続いた場合には3分周器の周期を調整してpattern1やpattern4となるようにする。

最初のSync検出は次の3段階で行われる。最初に4. 6t以上のLD_ON状態を検出するためにSync用パターン検出器で表のpattern7を探す。そのパターンが見つかったら次にpattern8で3分周器の同期を整える。最後に復調されたデータから12bitのSyncパターンの一致を探してSync信号を作成する。それ以降のSync検出はSync間隔を測る9360分周器を使い12bitのSyncパターン検出のみでSync信号を出している。9360分周器で次のSync位置を推定するが、その範囲にSyncパターン12bitが連続3回表れなければ、最初のSync検出からやり直しをする。

表1-2-2

Pattern1	×	×	1	0	0	0	1	×	×	0 検出パターン
Pattern2	×	1	0	0	0	1	×	×	×	
Pattern3	×	×	×	1	0	0	0	1	×	
Pattern4	×	×	0	1	1	1	0	×	×	
Pattern5	×	0	1	1	1	0	×	×	×	
Pattern6	×	×	×	0	1	1	1	0	×	
Pattern7	1	1	1	1	1	1	1	×	×	Sync 検出パターン
Pattern8	1	1	1	0	0	0	1	1	1	

通信用FPGAボード並びに検出器を光学系に組み込み、受光量対BERの測定を行った。詳細は⑥-3-1 精追尾のレーザ光源及びフォトン受信機の試験及び実験データの取得に記載した。

①-2-4. パケット構造

1 パケットはSync(32 bits)、Header(32 bits)、Data(7488 bits)及びCRC(32 bits)の合計7584 bitsから成っている。DataはScramblerで乱数化され、Syncを除くHeader、Data及びCRCはTurbo符号化される。以下にSync構造、Header構造、Scrambler、CRCの式を示す。

1. Sync構造

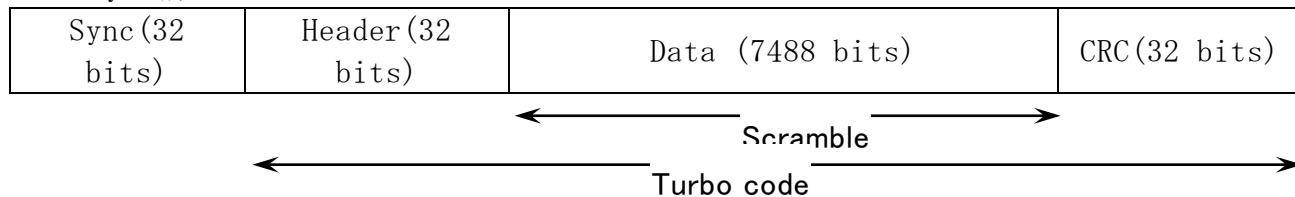


图 1-2-5

2. Header構造

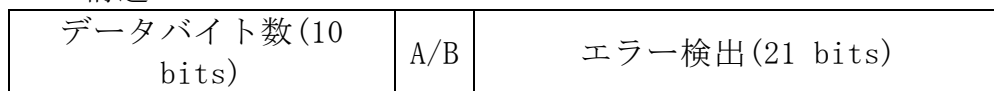


图 1-2-6

3. Scrambler

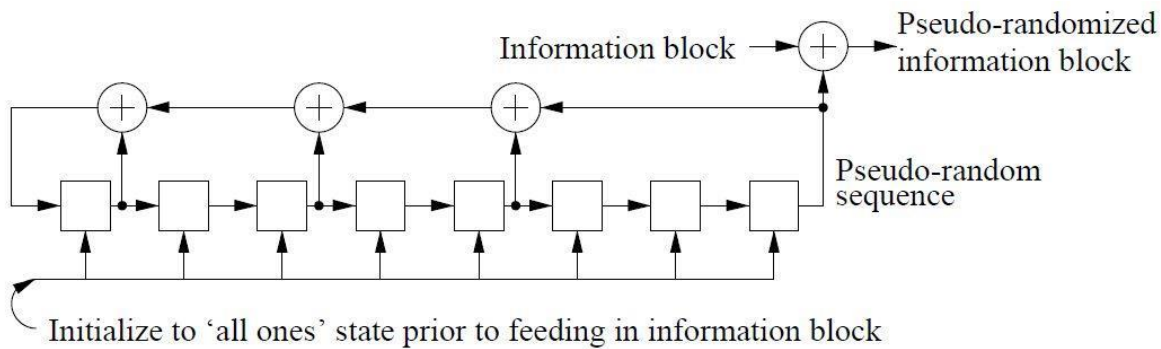


图 1-2-7

①-3. フォトン受信機搭載用ジンバルシステムの製作

①-3-1. 概要

「①-1-2 フォトン受信機の研究開発-3. メカ開発」の光学ブロック用リング型ジンバル機構は、x 軸・y 軸を粗調整できるものの、モータのトルク不足と駆動系バックラッシュに起因して指向精度と再現性が確保できないという課題を抱えていた。そこで、本設計を元に駆動性能の向上を目的としてジンバル開発実績が豊富な株式会社コスメイトへジンバルの制作を委託し、最適なモータ選定を含む新規ジンバル機構を開発した。

①-3-2. 仕様

本ジンバルシステムは、①-1-2 で言及した内製ジンバル機構と同様にスライダークラック方式を採用した。高トルクな DC サーボモータを新たに選定したことで、x 軸（ヨー）と y 軸（ピッチ）の可動範囲をともに $\pm 5^\circ$ に維持しつつ、最大角速度 $30^\circ / \text{sec}$ 、駆動時の位置決め精度は $\pm 0.05^\circ$ 以下という高精度な制御が可能となった。また、制御系は外部 PC からジンバル制御ユニットへシリアル通信でコマンドを送信する構成とし、通信プロトコルを本プロジェクトに合わせて一から策定した。これにより、外部アプリケーションとの高い互換性と柔軟な制御インターフェースを両立した。

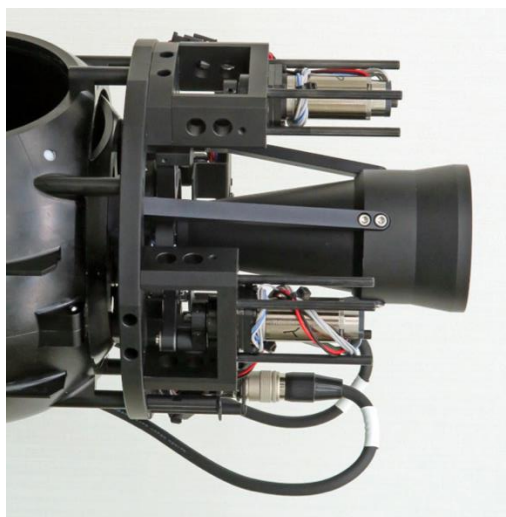


図 1-3-1 ジンバル機構

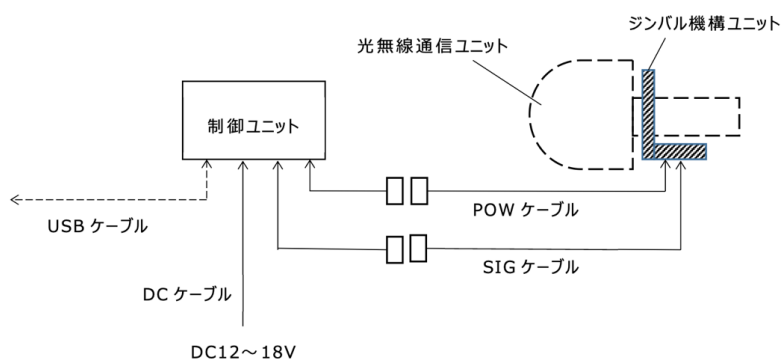


図 1-3-2 ジンバルシステムの構成図

①－４．海中光トラッキング、通信における外乱・変動への対応検討

①－４－１．海中光トラッキングにおける外乱・変動への対応

外乱及び変動対策に関しては「①-1. 精追尾および通信用レーザ光源の開発ならびにフォトン受信機の研究開発（４）サーボ回路」に記載した。但し、外乱に関してはあくまでも予測に基づくもので実際の海中での試験で修正が必要となる事が考えられる。トラッキングサーボが外れる様な外乱があった場合は、前記スパイラルスキャンによって再引き込みを行う。

①－４－２．海中通信における外乱・変動への対応検討

１．外乱として考えられるのは、海中生物、浮遊物などによる光の遮断

通信フォーマットにおけるSyncパターンとユーザデータその他とでは、光遮断によるダメージは異なる。SyncパターンにダメージがありSync検出が出来なかった場合は、それに連なるデータを復調する事は困難になる。そこでSync位置の予測によるダミーSync挿入などの方法が有効と考えられる。

Syncパターン以外にダメージがあった場合は、データが正しく復調できるかはエラー訂正能力に依存する。本システムではTurbo符号を搭載しており、i) ランダムノイズによるエラーの補正、ii) 光量減衰によるphotonの欠落補正、iii) 光遮断によるランダムノイズによるエラーの補正を行う事になる。ランダムノイズによるエラーは一般化するのが難しい為、符号化率（現在80%）を下げての対応は好ましくない。これよりアプリケーション層での補正が有効であると考ええる。

２．光速度の変化

光の速度は以下の式で求められる。

$$v = \frac{c}{n} \quad (1-4-1)$$

ここで、 v ：媒体中の光速、 c ：真空中の光速、 n ：屈折率

海中において送信光の軸方向に対して屈折率が時間的に変化する層があった場合、光速度が変化して結果的に受信信号のジッタとなる。受光信号から送信クロック成分が検出可能な系においては、PLLで再生クロックを生成してジッタに対応する事が可能となるが、フォトン通信の様に送信クロック成分が検出困難な場合はPLLでの再生クロック生成はできず、ジッタに対応する事が出来ない。ジッタによるエラーは上記ランダムノイズによるエラーに含まれると考えられTurbo符号で訂正する事になる。訂正後の誤り率が高い場合まずはアプリ層での訂正を行い、最後の手段として通信レートを下げていくことになる。

海中無線光通信における屈折率の揺らぎ（乱流）についてはモンテカルロシミュレーション用いた研究が行われている[1][2][3]。

②－１．トラッキングアルゴリズムおよびリングパルスレーザ制御ソフトウェアの研究開発

②－１－１．研究開発の概要と主要成果

本研究項目は、リングパルスレーザ（RPL）システム用の中核となるトラッキングアルゴリズムおよび制御ソフトウェアの開発が目的である。RPLシステムは粗追尾機能の根幹を成し、一方の水中航走体が他方の水中航走体から照射されるパルスレーザ信号を検知することにより、その到来方向を特定することを可能にする。本項目の具体的な目標は、RPL信号を解釈可能な頑健なアルゴリズムと、RPLの動作管理および水中航走体の姿勢制御システムとのインタフェースを担うソフトウェアを開発することであった。

本研究開発における主要な成果は以下の通りである。

- a) リングパルスレーザ（RPL）装置の動作原理に基づき、対向装置から照射された光子を検知し、その到来方向を推定するトラッキングアルゴリズムを開発した。このアルゴリズムには、受光パターンの重心計算を用いることで、高い精度での方向推定を可能とするロジックが組み込まれている。
- b) RPL装置のレーザ照射方向を対向装置の存在する方向へ正確に指向させるため、水中航走体の姿勢制御システムに対して適切な指示を出力する制御ソフトウェアの設計および開発を完了した。
- c) 開発したアルゴリズムおよび制御ソフトウェアの機能検証を効率的かつ網羅的に行うことを目的として、「RPL受発光パターン解析検証プログラム」を開発した。このシミュレータは、RPLの受発光パターン、照射角、照射距離、対向装置との相対的な位置ずれ、さらには想定される水中環境条件など、多岐にわたるパラメータを模擬することが可能である。本検証プログラムの存在は、実機を用いた試験に伴うリスクおよびコストを大幅に低減し、多様な条件下におけるトラッキングロジックの机上検証を実現する上で不可欠な成果となった。
- d) 特に、照射距離に応じて最適な照射角を設定するための制御ロジック、具体的には近距離用と遠距離用にレーザユニット群を分離して制御する方式を考案し、その有効性をシミュレータ上で確認した。これにより、様々な交戦距離においてRPL信号の安定した送受信を維持するための基盤技術を確立した。

RPLシステムは、8基のレーザユニット、精密なタイミング制御、可変ビーム角、そして水中という困難な環境下で移動する2台の水中航走体間の動的な相互作用を含む複雑な構成を有する。このようなシステムを実環境（試験水槽を含む）で直接試験し、デバッグを行うことは、時間的、コスト的に極めて大きな負担となり、また物理的な再現性の確保も困難である。そのため、包括的なシミュレータの開発は、プロジェクト初期段階における重要な戦略的判断であった。この「RPL受発光パターン解析検証プログラム」は、トラッキングアルゴリズムの迅速なプロトタイピングと反復的な改良を可能にし、物理的には再現が難しい広範なシナリオやエッジケース（例えば、様々な距離、位置ずれ、ビーム拡散設定、模擬ノイズなど）の試験を容易にする。さらに、制御ソフトウェアにおける論理的な欠陥の早期発見と修正、そして制御された条件下でのアルゴリズム性能の定量的評価にも貢献する。この検証プログラムは、開発プロセスをより頑健かつ効率的にすることで、粗追尾目標の達成に直接的に寄与し、プロジェクトリスクの低減とコスト効率の向上を実現した点で、単なる補助ツールを超えた重要な研究開発成果と位置づけられる。

②－１－２．リングパルスレーザ (RPL) 制御アルゴリズムの設計

リングパルスレーザ (RPL) 制御アルゴリズムは、水中航走体間の相対的な方位を特定し、安定した光学的捕捉を維持するための粗追尾機能の中核を担う。

1. RPLシステムの概要と動作原理

RPL装置は、図2-1-1 に示されるように、直径1mのリング上に8基のレーザユニットが等間隔に配置された構成を持つ。各レーザユニットは、レーザ発光機とレーザ受光機を備えている。動作時において、レーザ発光機は1番から8番へと順次発光し、これに正対する相手側のRPL装置のレーザ受光機は、対応して8番から1番へと逆順に受光する（図2-1-2 参照）。この一連の発光・受光シーケンスを1サイクルとする。

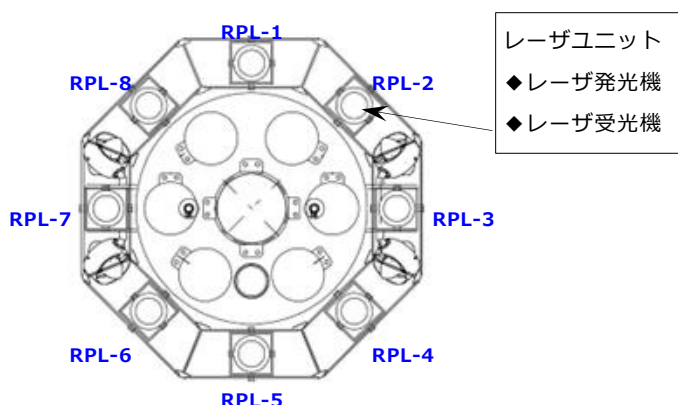


図2-1-1 リングパルスレーザの外観

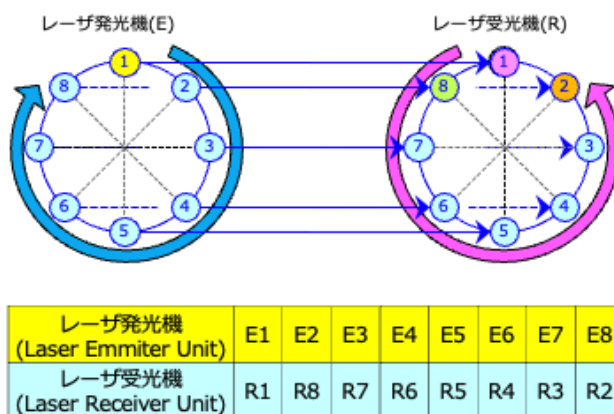


図2-1-2 レーザ発光機と受光機の関係

2. 照射範囲制御アルゴリズム

RPLシステムにおける照射範囲制御の目的は、レーザ光が過度に拡散して強度が低下することなく、またビームが狭すぎて相手側の受光機を捉え損なうことなく、効果的に到達するように制御することである。当初の設計仕様では、照射距離に応じて照射角を可変させる計画であった（例えば、距離10mで照射範囲1mとなる半角2.862度、距離300mで照射範囲1mとなる半角0.095度）。しかしながら、水中環境において正確な距離をリ

アルタイムで計測する手段の搭載が困難であることから、距離情報に依存しない照射範囲制御方式の確立が求められた。

開発された解決策として、レーザ発光機内のレンズ位置（x）を制御することで照射角（ θ 、中では y と表記）を調整する方式を採用した。レンズ位置と照射角の関係は、 $y=0.2954x-0.0055$ の式で表され、この関係に基づき、最短10mから最長300mの範囲で照射範囲1mを維持する運用が可能である（表2-1-1 参照）。

表2-1-1 レンズの位置と照射角

No	4 μ m座標	位置mm	角度 θ	$\sin\theta \times 2$	1m距離
1	2427	9.708	2.862	0.099870	10.013
5	2423	9.692	2.858	0.099705	10.030
1211	1217	4.868	1.433	0.049999	20.001
1616	812	3.248	0.954	0.033298	30.032
1818	610	2.440	0.715	0.024967	40.053
1939	489	1.956	0.572	0.019977	50.058
2020	408	1.632	0.477	0.016636	60.110
2077	351	1.404	0.409	0.014285	70.003
2120	308	1.232	0.358	0.012512	79.926
2154	274	1.096	0.318	0.011109	90.015
2181	247	0.988	0.286	0.009996	100.044
2203	225	0.900	0.260	0.009088	110.032
2222	206	0.824	0.238	0.008305	120.415
2237	191	0.764	0.220	0.007686	130.108
2250	178	0.712	0.205	0.007150	139.866
2262	166	0.664	0.191	0.006655	150.268
2272	156	0.624	0.179	0.006242	160.197
2281	147	0.588	0.168	0.005871	170.325
2289	139	0.556	0.159	0.005541	180.468
2296	132	0.528	0.150	0.005252	190.388
2302	126	0.504	0.143	0.005005	199.802
2308	120	0.480	0.136	0.004757	210.195
2313	115	0.460	0.130	0.004551	219.720
2318	110	0.440	0.124	0.004345	230.148
2322	106	0.424	0.120	0.004180	239.232
2326	102	0.408	0.115	0.004015	249.062
2330	98	0.392	0.110	0.003850	259.735
2334	94	0.376	0.106	0.003685	271.363
2337	91	0.364	0.102	0.003561	280.791
2340	88	0.352	0.098	0.003438	290.898
2343	85	0.340	0.095	0.003314	301.760

さらに、このレンズ位置制御を基盤とし、より広範な運用距離に対応するため、8基のRPLレーザを近距離用（例：ユニット①③⑤⑦）と遠距離用（例：ユニット②④⑥⑧）の2つのグループに分けて制御する革新的な戦略を導入した。このグループ化の論理的根拠は、異なる運用距離範囲に対してそれぞれ最適化された照射角制御戦略を適用することで、ビームカバレッジを最大化しつつ制御ロジックを簡素化することにある。これにより、正確な距離計測が困難であるという水中特有の課題を効果的に緩和する。例えば、近距離グループは10mから60mの範囲を、遠距離グループは60mから300mの範囲をカバーするように設定され、これにより、各距離帯で最適なビームプロファイルを提供する（図2-1-4～図2-1-10 参照）。

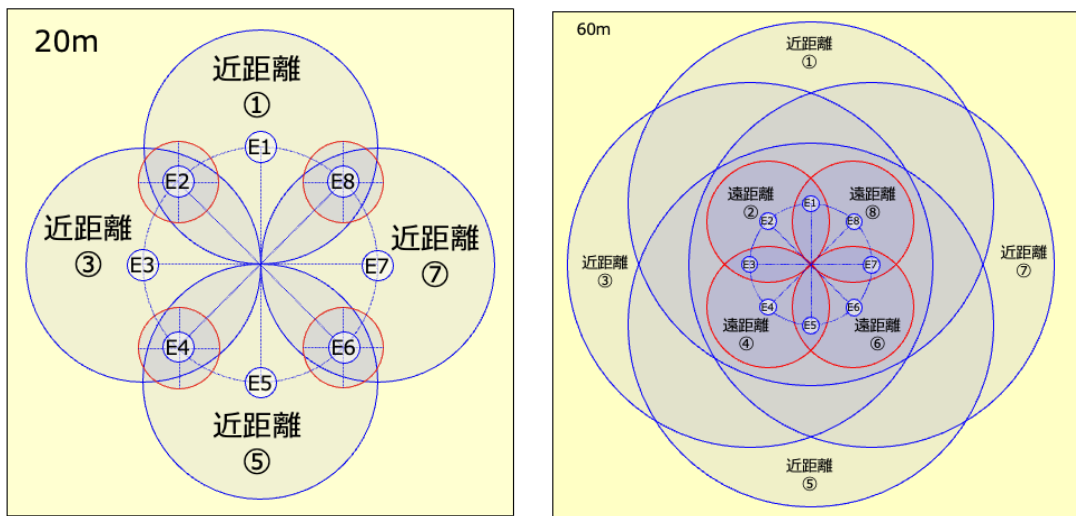


図2-1-4 近距離と遠距離のRPL照射範囲

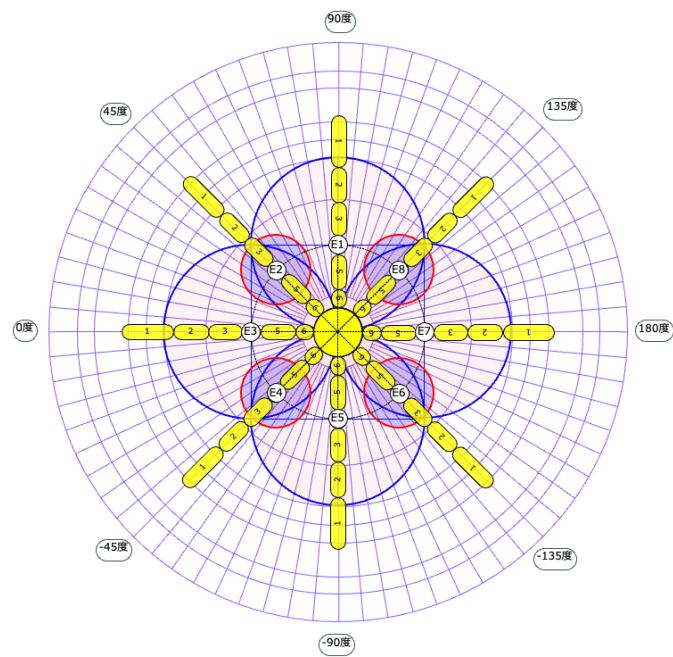


図2-1-5 RPLの距離による照射範囲 10m

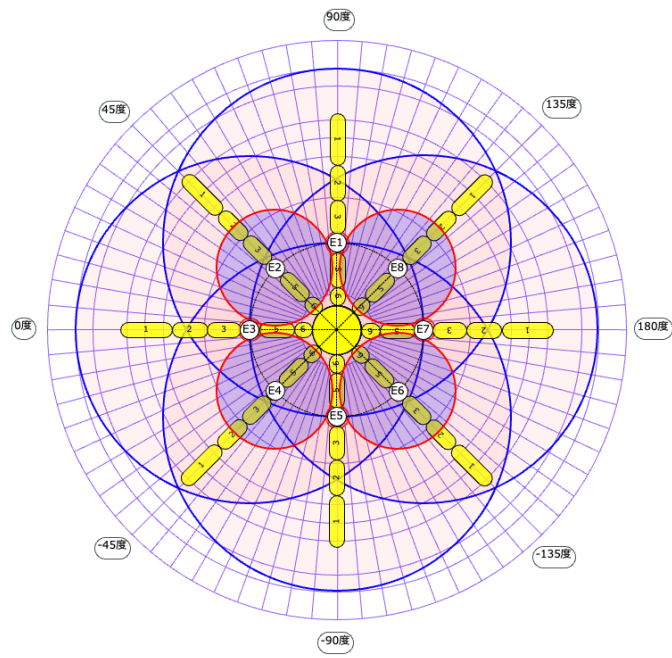


図2-1-6 RPLの距離による照射範囲 20m

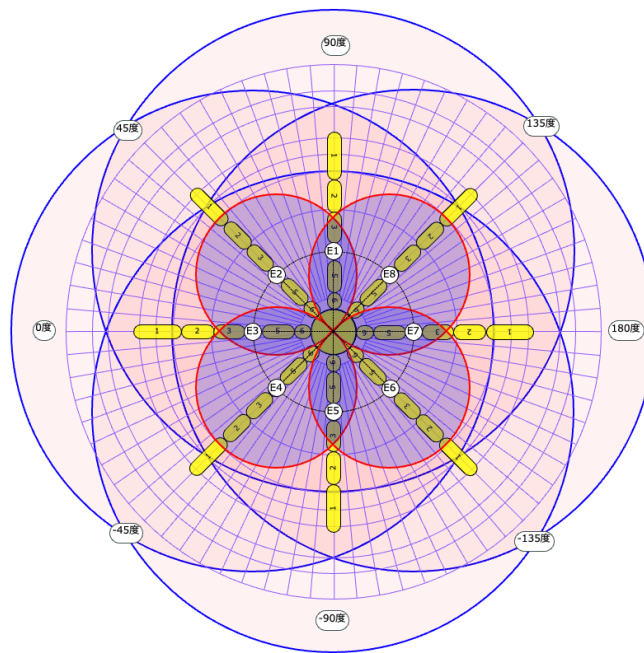


図2-1-7 RPLの距離による照射範囲 30m

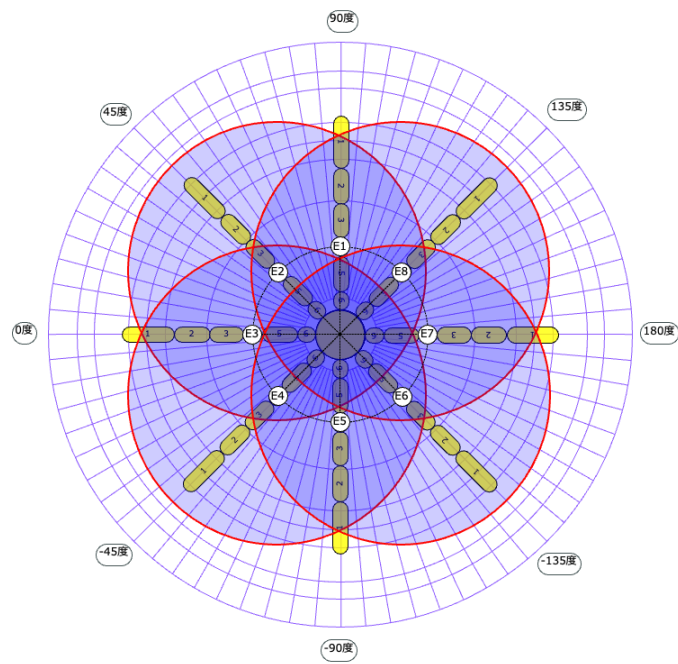


図2-1-8 RPLの距離による照射範囲 100m

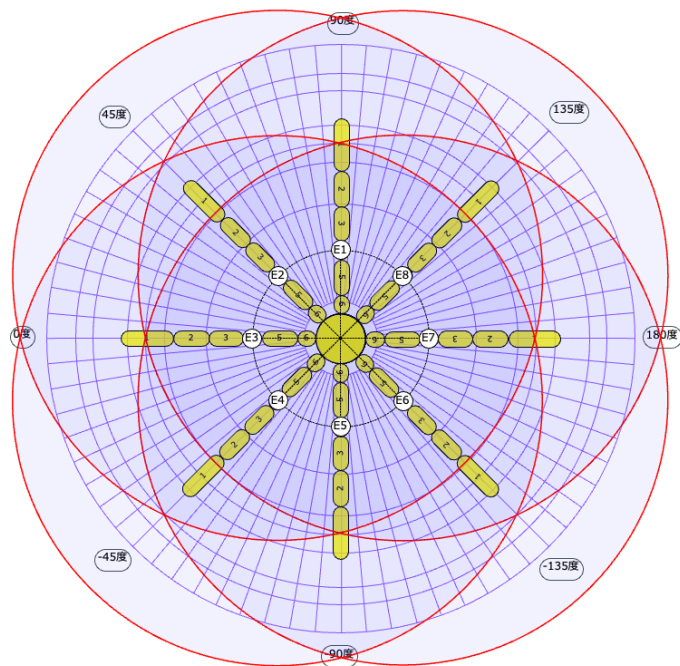


図2-1-9 RPLの距離による照射範囲 200m

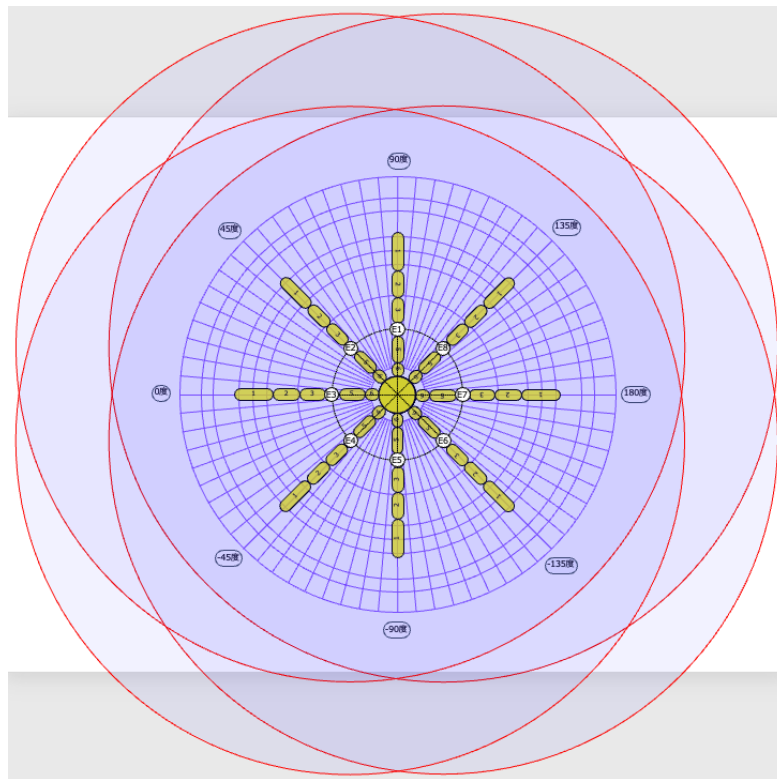


図2-1-10 RPLの距離による照射範囲 300m

3. 受光パターン解析および位置ずれ検出アルゴリズム

本アルゴリズムの目的は、対向するRPL装置から到来するレーザ光の方向を特定し、それによって2台の水中航走体間の相対的な方位（位置ずれ）を算出することである。トラッキングアルゴリズムの中核を成すのは、8基のRPL受光ユニットで受光された光強度の重心を計算する手法である（図2-1-11 参照）。

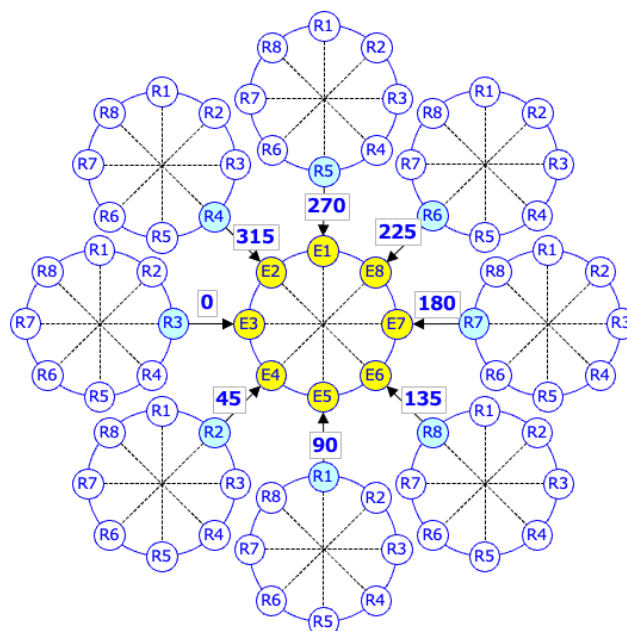


図2-1-11 重心計算の方法

この重心計算方式では、各受光機の幾何学的な方向ベクトル（表2-1-2 参照）と、各受光機が受光した総光子量（単なるヒット回数ではなく）を利用する。これにより、受光フォトン数に多少の変動があっても、識別可能なパターンが存在する限り、安定した方向推定が可能となる。算出される重心の方向（表2-1-3、表2-1-4 に示されるように、受光量の重み付き和から得られるX成分とY成分の逆正接関数 $\text{ArcTan}(Y/X)$ によって角度として求められる）は、水中航走体が位置ずれを補正するために旋回すべき方向を直接的に示す。

また、位置ずれがない（正対している）状態の判定は、受光した光量がリング上に均等に分布している場合、すなわち、対角線上に位置する受光機間の受光量差が実質的にゼロとなる場合（例：R1-R5=0、R2-R6=0など）として定義される。

表2-1-2 受光機の方方向ベクトル

受光機	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8
方向(角度)	90°	45°	0°	315°	270°	225°	180°	135°
$\Delta X:\text{COS}()$	0.000	0.707	1.000	0.707	0.000	-0.707	-1.000	-0.707
$\Delta Y:\text{SIN}()$	1.000	0.707	0.000	-0.707	-1.000	-0.707	0.000	0.707

表2-1-3 方向ベクトルと受光した光量による重心計算（1）

	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	
E1	4								
E2							3	4	
E3					2	4	4		
E4					3				
E5				4					
E6			4	4					
E7		3	4						
E8		5							
光量	4	8	8	8	5	4	7	4	総量 48
光量 × ΔX	0	5.657	8	5.657	0	-2.828	-7	-2.828	6.657
光量 × ΔY	4	5.657	0	-5.657	-4	-2.828	0	2.828	0.000

表2-1-3 方向ベクトルと受光した光量による重心計算（2）

	総数	1/総数	$\text{atan}(Y/X)$	角度	方向
光量	48	1/48	rad	deg	
光量 × ΔX	6.657	0.139	0	0°	R3
光量 × ΔY	0.000	0.000			

RPL制御の頑健性は、個々のアルゴリズム要素の性能だけでなく、これらの要素が有機的に連携することによって達成される。水中での正確な距離測定の困難性という根本的な課題に対し、近距離・遠距離グルーピング戦略は、ビーム整形のための明示的な距離入力を不要とすることで、問題を効果的に単純化し、定義済みの運用ゾーンを設けることで対応する。一方、総光子量に基づく重心計算は、吸収、散乱、微小な遮蔽物などによる信号強度の変動が避けられない水中光通信環境において、方向探知の信頼性を高める。これらのアルゴリズムは、制御ソフトウェアに実装され、検証シミュレータによってその有効性が確認されており、可変距離におけるリンク維持と正確な相対方位決定という粗追尾の核心的課題を解決する統合的システムとして機能する。

②－１－３．RPL制御ソフトウェアおよび検証シミュレータの開発

1. RPL制御ソフトウェア

RPL制御ソフトウェアは、前項②－１－２で詳述した各種アルゴリズムを具現化するものである。このソフトウェアは、RPL受光機からのデータを処理し、必要な補正量を算出し、RPL発光機（レンズ位置制御による照射角調整）および水中航走体の姿勢制御システム（再指向のため）へコマンドを発行する。その検証と開発効率向上のために、専用のシミュレータが開発された。

2. RPL受発光パターン解析検証プログラム

本検証プログラムは、実際の水中航走体へのRPLシステム搭載に先立ち、トラッキングアルゴリズムおよび制御ロジックの開発と検証を行う上で極めて重要な役割を果たした。このツールは、RPLシステム全体の相互作用を模擬するために開発された。その主要な機能と特長は以下の通りである（図2-1-12～図2-1-41 参照）。

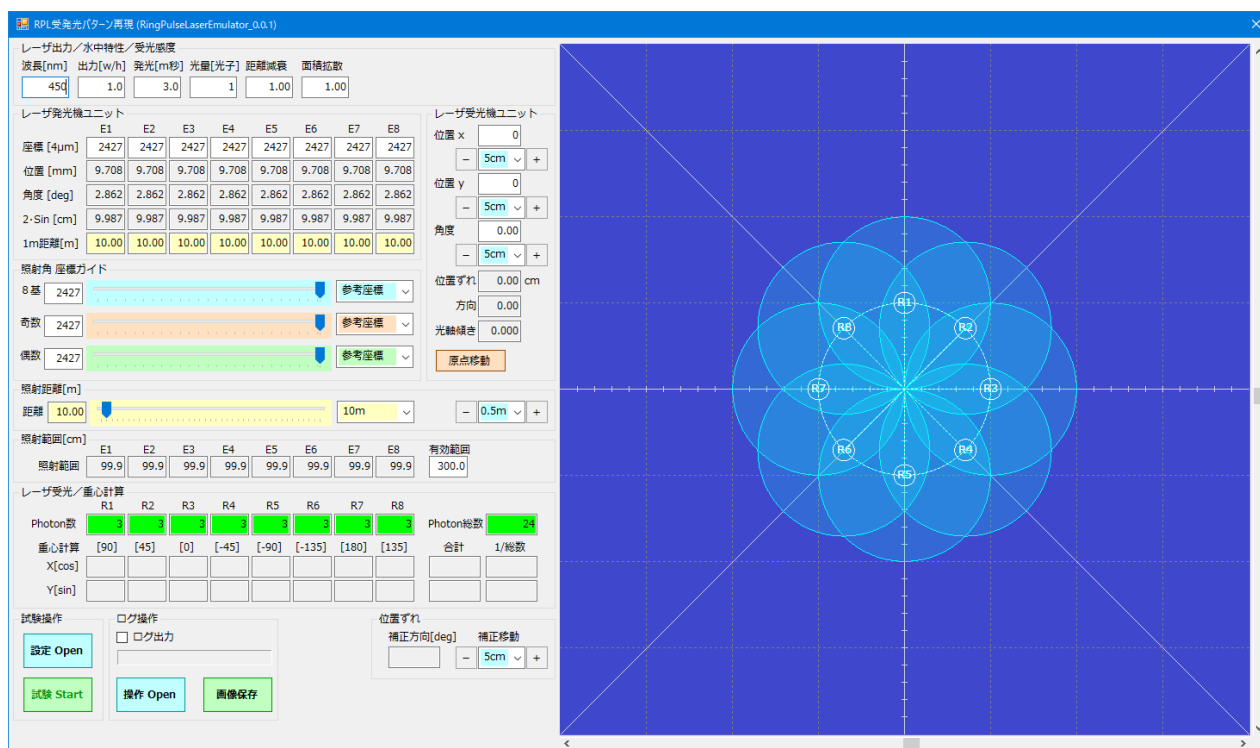


図2-1-12

レーザ出力／水中特性／受光感度

波長[nm]	出力[w/h]	発光[m秒]	光量[光子]	距離減衰	面積拡散
450	1.0	3.0	1	1.00	1.00

図2-1-13

レーザ発光機ユニット

	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8
座標 [4μm]	2427	2427	2427	2427	2427	2427	2427	2427
位置 [mm]	9.708	9.708	9.708	9.708	9.708	9.708	9.708	9.708
角度 [deg]	2.862	2.862	2.862	2.862	2.862	2.862	2.862	2.862
2・Sin [cm]	9.987	9.987	9.987	9.987	9.987	9.987	9.987	9.987
1m距離[m]	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00

図2-1-14

照射角 座標

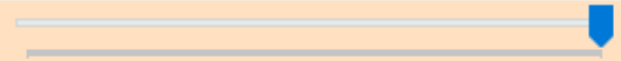
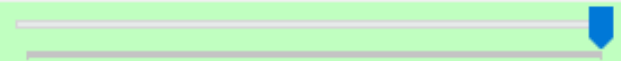
8基	2427		参考座標 ▾
奇数	2427		参考座標 ▾
偶数	2427		参考座標 ▾

図2-1-15

レーザ受光機ユニット

位置 x	-64
	- 5cm ▾ +
位置 y	-48
	- 5cm ▾ +
角度	0.00
	- 5cm ▾ +
位置ずれ	80.00 cm
方向	143.13
光軸傾き	4.574
<button>原点移動</button>	

図2-1-16

照射距離[m]

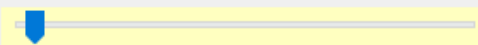
距離 10.00  10m - 0.5m +

図2-1-17

照射範囲[cm]

	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	有効範囲
照射範囲	99.9	99.9	99.9	99.9	99.9	99.9	99.9	99.9	300.0

図2-1-18

レーザ受光／重心計算

	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8		
Photon数	3	3	3	3	3	3	3	3	Photon総数	24
重心計算	[90]	[45]	[0]	[-45]	[-90]	[-135]	[180]	[135]	合計	1/総数
X[cos]										
Y[sin]										

図2-1-19

レーザ受光／重心計算

	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8		
Photon数	0	2	2	4	3	0	0	0	Photon総数	11
重心計算	[90]	[45]	[0]	[-45]	[-90]	[-135]	[180]	[135]	合計	1/総数
X[cos]	0.000	1.414	2.000	2.828	0.000	0.000	0.000	0.000	6.2426	0.5675
Y[sin]	0.000	1.414	0.000	-2.828	-3.000	0.000	0.000	0.000	-4.4142	-0.4013

図2-1-20

位置ずれ

補正方向[deg] 補正移動

54.74 - 5cm +

図2-1-21

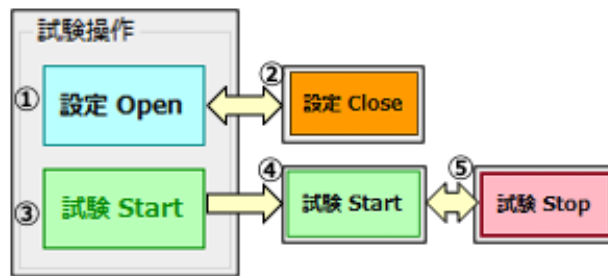


図2-1-22

RPL試験パターン設定

レーザ出力／水中特性／受光感度

波長[nm] 出力[w/h] 発光[m秒] 光量[光子] 距離減衰 面積拡散

450 1.0 3.0 1 1.00 1.00

照射角 座標

8基 2427 参考座標

奇数 2427 参考座標

偶数 2427 参考座標

照射距離[m]

距離 10 定距離

照射範囲[cm]

E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8
99.87	99.87	99.87	99.87	99.87	99.87	99.87	99.87

駆動パターン

ケース

☐ 矩形周回

☐ 円形周回

☒ 放射状

☐ 方眼状

矩形周回

辺の長さ[cm] 100

駆動単位[cm] 5

外へ増分[cm] 20

周回数 5

円形周回

円の直径[cm] 100

駆動単位[度] 5

外へ増分[cm] 20

周回数 5

放射状

円の直径[cm] 400

駆動単位[cm] 5

開始角度[度] 0

駆動角度[度] 15

方眼状

辺の長さ[cm] 400

横駆動[cm] 25

縦駆動[cm] 25

発光パターン

照射パターン

pattern_normal.dat

Load Save

パターン使用 ☐

パターン件数 10

No	遠距離	近距離
1	1925	351
2	1685	308
3	1445	261
4	1205	216
5	1085	185
6	965	161
7	845	144
8	725	127
9	605	111
10	485	99

図2-1-23

レーザ出力／水中特性／受光感度

波長[nm] 出力[w/h] 発光[m秒] 光量[光子] 距離減衰 面積拡散

450 1.0 3.0 1 1.00 1.00

図2-1-24

照射角 座標

8 基	2427		参考座標 ▼
奇数	2427		参考座標 ▼
偶数	2427		参考座標 ▼

図2-1-25

照射距離[m]

距離 ▼

- ▼ +

図2-1-26

照射範囲[cm]

E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8
99.87	99.87	99.87	99.87	99.87	99.87	99.87	99.87

図2-1-27

パターン使用 ☐

パターン件数

図2-1-28

No	遠距離	近距離
1	1925	351
2	1685	308
3	1445	261
4	1205	216
5	1085	185
6	965	161
7	845	144
8	725	127
9	605	111
10	485	99

図2-1-29

図2-1-30

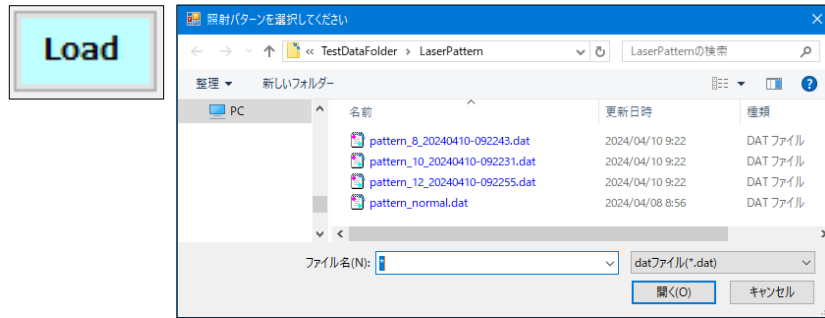


図2-1-31

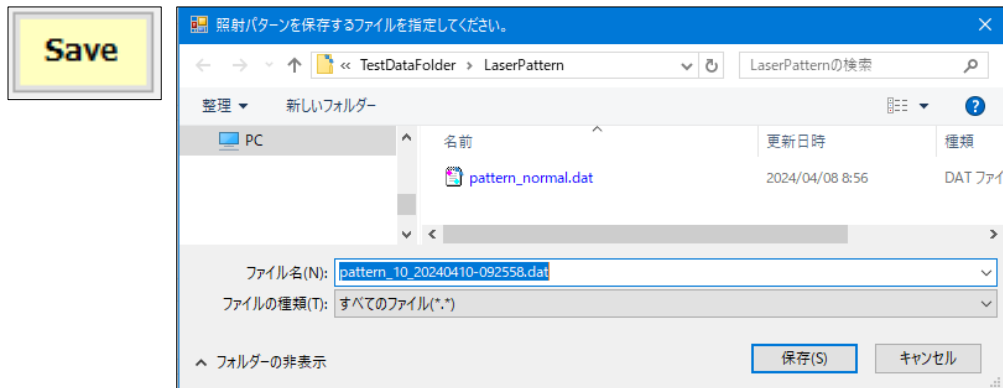


図2-1-32

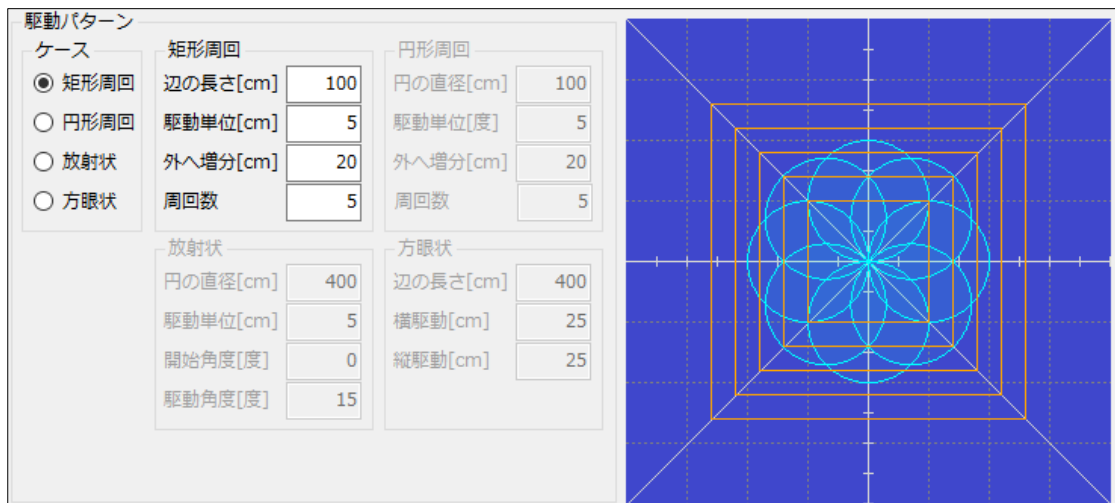


図2-1-33 駆動パターン画面（矩形周回）

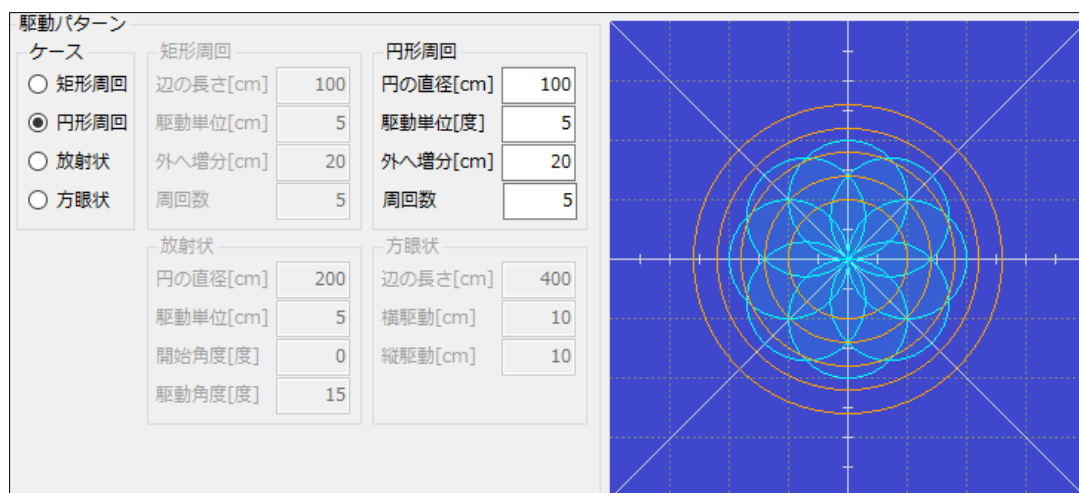


図2-1-34 駆動パターン画面（円形周回）

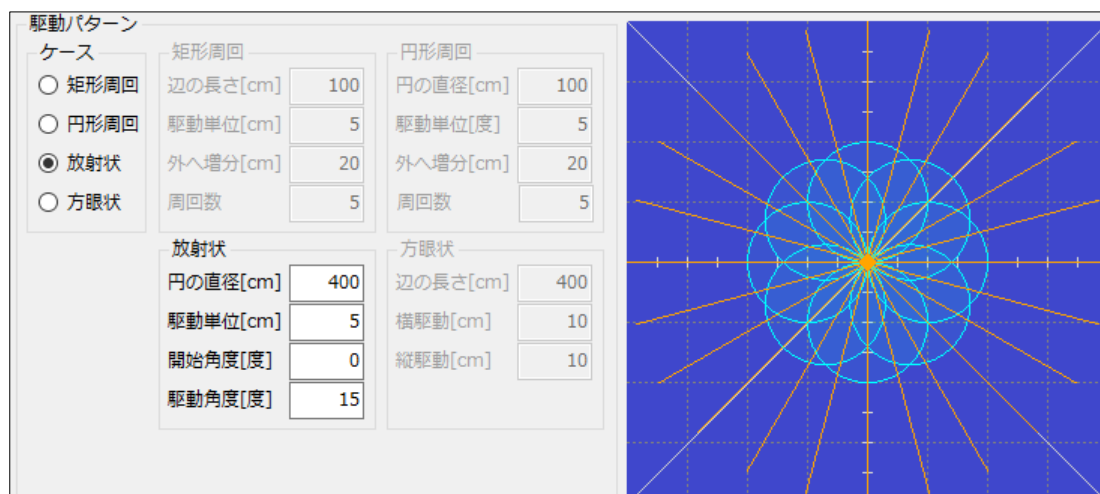


図2-1-35 駆動パターン画面（放射状）

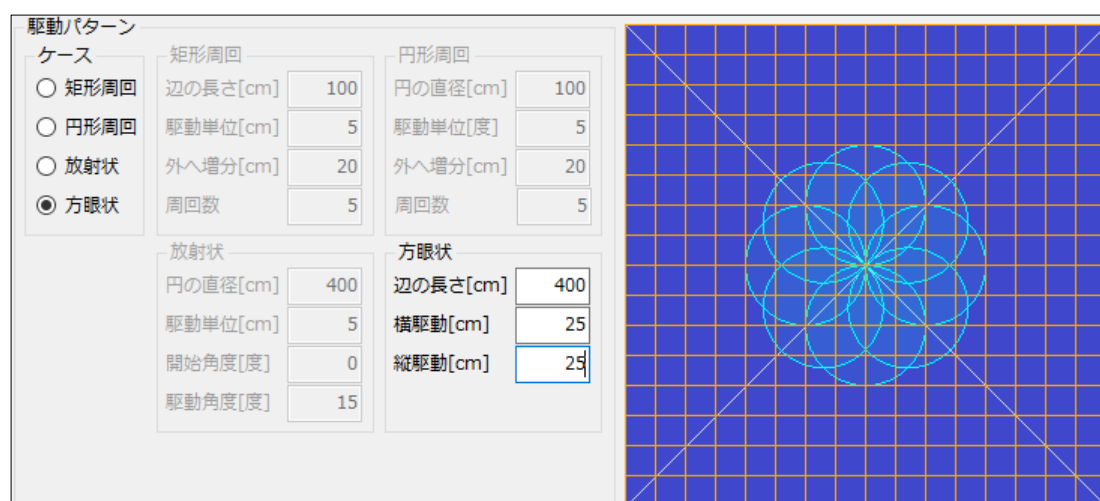


図2-1-36

ログ操作

☐ ログ出力

操作 Open

画像保存

☒ ログ出力

Laser_20240403_083612.log

図2-1-37

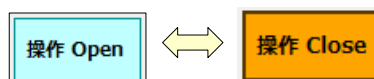


図2-1-38

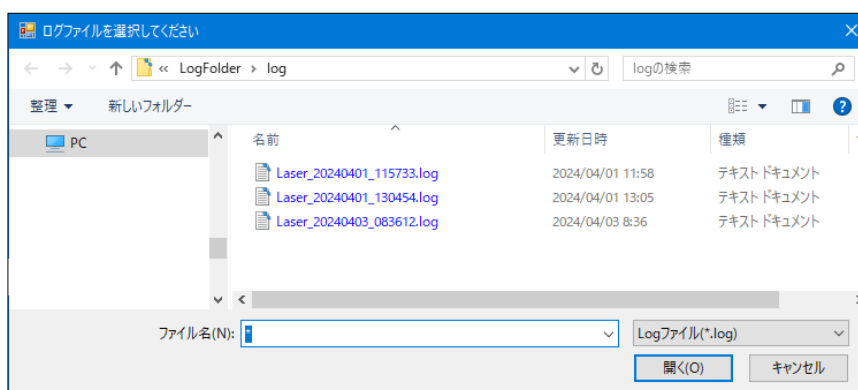


図2-1-39

試験ログ操作																				
LOGファイル										☐ 試験ログ再現										
No	Time	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	距離	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	X	
1	0.002	611	1138	611	1138	611	1138	611	1138	61.00	152.6	285.1	152.6	285.1	152.6	285.1	152.6	285.1	0	
2	24.751	611	1138	611	1138	611	1138	611	1138	61.00	152.6	285.1	152.6	285.1	152.6	285.1	152.6	285.1	75	
3	24.810	611	1138	611	1138	611	1138	611	1138	61.00	152.6	285.1	152.6	285.1	152.6	285.1	152.6	285.1	73	
4	24.902	611	1138	611	1138	611	1138	611	1138	61.00	152.6	285.1	152.6	285.1	152.6	285.1	152.6	285.1	70	
5	24.996	611	1138	611	1138	611	1138	611	1138	61.00	152.6	285.1	152.6	285.1	152.6	285.1	152.6	285.1	64	
6	25.095	611	1138	611	1138	611	1138	611	1138	61.00	152.6	285.1	152.6	285.1	152.6	285.1	152.6	285.1	57	
7	25.179	611	1138	611	1138	611	1138	611	1138	61.00	152.6	285.1	152.6	285.1	152.6	285.1	152.6	285.1	48	
8	25.280	611	1138	611	1138	611	1138	611	1138	61.00	152.6	285.1	152.6	285.1	152.6	285.1	152.6	285.1	37	
9	25.360	611	1138	611	1138	611	1138	611	1138	61.00	152.6	285.1	152.6	285.1	152.6	285.1	152.6	285.1	25	
10	25.435	611	1138	611	1138	611	1138	611	1138	61.00	152.6	285.1	152.6	285.1	152.6	285.1	152.6	285.1	13	
11	25.512	611	1138	611	1138	611	1138	611	1138	61.00	152.6	285.1	152.6	285.1	152.6	285.1	152.6	285.1	0	
12	25.614	611	1138	611	1138	611	1138	611	1138	61.00	152.6	285.1	152.6	285.1	152.6	285.1	152.6	285.1	-13	
13	25.689	611	1138	611	1138	611	1138	611	1138	61.00	152.6	285.1	152.6	285.1	152.6	285.1	152.6	285.1	-25	

図2-1-40

☐ 試験ログ再現

図2-1-41

各図表の説明

メインインターフェース（図2-1-12）：シミュレーションパラメータの包括的な制御と結果の視覚的確認を可能とするダッシュボードを提供する。

レーザパラメータ設定（図2-1-13）：レーザ出力、減衰率、面積拡散、SPAD感度などを設定し、現実の水中環境におけるフォトンバジェットを模擬する。

レーザ発光ユニット制御（図2-1-14, 図2-1-15）：各RPLユニットのレンズ位置（ひいては照射角）を精密に設定可能とし、異なる距離やビーム拡散に対応するための座標値ガイド機能も備える（表2-1-2～表2-1-5 参照）。

相対位置設定（図2-1-16）：発光側と受光側のRPL間のX、Yオフセットを設定することで、位置ずれ状態を模擬し、結果として生じる光軸の傾きを計算する。

距離およびビーム範囲シミュレーション（図2-1-17, 図2-1-18）：水中航走体間の距離を設定し、計算されたレーザビームの照射範囲を確認する。有効ビーム範囲の閾値設定も可能である。

受光シミュレーションおよび重心計算（図2-1-19, 図2-1-20）：8基の各受光機における模擬フォトン数を表示し、計算された重心を示すことで、検出された位置ずれを可視化する。

位置ずれ補正シミュレーション（図2-1-21）：計算された補正角度を表示し、その方向への模擬的な移動を可能とする。

自動試験シナリオ（図2-1-22～図2-1-27）：試験画面の遷移操作を行い、RPL試験パターン設定を行う

照射パターン設定（図2-1-28, 図2-1-29）：近距離・遠距離の照射パターンのシーケンスを定義できる。試験パターンのロード・セーブ機能（図2-1-30～図2-1-32）も備え、再現性のある複雑な試験シーケンスの実行を支援する。

駆動パターン（図2-1-33～図2-1-36）：水中航走体間の様々な相対運動（矩形周回、円形周回、放射状、方眼状スキャンなど）を模擬し、トラッキングアルゴリズムの動的応答性を試験する。

ロギングおよび再生（図2-1-37～図2-1-41, 表2-1-6, 表2-1-7）：全てのパラメータとシミュレーションイベントを包括的に記録し、試験ログを再生・可視化する機能を持つ。これはデバッグおよび性能解析に不可欠である。

表 2-1-2 照射角と照射距離による照射範囲の計算表 10m～100m

No	座標	θ	$\sin\theta \times 2$	m	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
1	2427	2.862	0.099870	10.013	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0
5	2423	2.858	0.099705	10.030	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0
1211	1217	1.433	0.049999	20.001	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0
1616	812	0.954	0.033298	30.032	0.3	0.7	1.0	1.3	1.7	2.0	2.3	2.7	3.0	3.3
1818	610	0.715	0.024967	40.053	0.2	0.5	0.7	1.0	1.2	1.5	1.7	2.0	2.2	2.5
1939	489	0.572	0.019977	50.058	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0
2020	408	0.477	0.016636	60.110	0.2	0.3	0.5	0.7	0.8	1.0	1.2	1.3	1.5	1.7
2077	351	0.409	0.014285	70.003	0.1	0.3	0.4	0.6	0.7	0.9	1.0	1.1	1.3	1.4
2120	308	0.358	0.012512	79.926	0.1	0.3	0.4	0.5	0.6	0.8	0.9	1.0	1.1	1.3
2154	274	0.318	0.011109	90.015	0.1	0.2	0.3	0.4	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1
2181	247	0.286	0.009996	100.044	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
2203	225	0.260	0.009088	110.032	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
2222	206	0.238	0.008305	120.415	0.1	0.2	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.7	0.8
2237	191	0.220	0.007686	130.108	0.1	0.2	0.2	0.3	0.4	0.5	0.5	0.6	0.7	0.8
2250	178	0.205	0.007150	139.866	0.1	0.1	0.2	0.3	0.4	0.4	0.5	0.6	0.6	0.7
2262	166	0.191	0.006655	150.268	0.1	0.1	0.2	0.3	0.3	0.4	0.5	0.5	0.6	0.7
2272	156	0.179	0.006242	160.197	0.1	0.1	0.2	0.2	0.3	0.4	0.4	0.5	0.6	0.6
2281	147	0.168	0.005871	170.325	0.1	0.1	0.2	0.2	0.3	0.4	0.4	0.5	0.5	0.6
2289	139	0.159	0.005541	180.468	0.1	0.1	0.2	0.2	0.3	0.3	0.4	0.4	0.5	0.6
2296	132	0.150	0.005252	190.388	0.1	0.1	0.2	0.2	0.3	0.3	0.4	0.4	0.5	0.5
2302	126	0.143	0.005005	199.802	0.1	0.1	0.2	0.2	0.3	0.3	0.4	0.4	0.5	0.5
2308	120	0.136	0.004757	210.195	0.0	0.1	0.1	0.2	0.2	0.3	0.3	0.4	0.4	0.5
2313	115	0.130	0.004551	219.720	0.0	0.1	0.1	0.2	0.2	0.3	0.3	0.4	0.4	0.5
2318	110	0.124	0.004345	230.148	0.0	0.1	0.1	0.2	0.2	0.3	0.3	0.3	0.4	0.4
2322	106	0.120	0.004180	239.232	0.0	0.1	0.1	0.2	0.2	0.3	0.3	0.3	0.4	0.4
2326	102	0.115	0.004015	249.062	0.0	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3	0.4	0.4
2330	98	0.110	0.003850	259.735	0.0	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3	0.3	0.4
2334	94	0.106	0.003685	271.363	0.0	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.3	0.3	0.3	0.4
2337	91	0.102	0.003561	280.791	0.0	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3	0.4
2340	88	0.098	0.003438	290.898	0.0	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3	0.3
2343	85	0.095	0.003314	301.760	0.0	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3	0.3
	83	0.093	0.003231	309.463	0.0	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3	0.3
	81	0.090	0.003149	317.570	0.0	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3	0.3
	79	0.088	0.003066	326.114	0.0	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3
	76	0.084	0.002943	339.826	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3
	74	0.082	0.002860	349.627	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3
	72	0.080	0.002778	360.010	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3
	70	0.077	0.002695	371.029	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3
	68	0.075	0.002613	382.744	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3
	67	0.074	0.002571	388.883	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3
	65	0.071	0.002489	401.771	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2

照射角(θ)

照射範囲が1m
になる照射距離

表2-1-3 照射角と照射距離による照射範囲の計算表 110m～200m

No	座標	θ	$\sin\theta \times 2$	m	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200
1	2427	2.862	0.099870	10.013	11.0	12.0	13.0	14.0	15.0	16.0	17.0	18.0	19.0	20.0
5	2423	2.858	0.099705	10.030	11.0	12.0	13.0	14.0	15.0	16.0	16.9	17.9	18.9	19.9
1211	1217	1.433	0.049999	20.001	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	8.5	9.0	9.5	10.0
1616	812	0.954	0.033298	30.032	3.7	4.0	4.3	4.7	5.0	5.3	5.7	6.0	6.3	6.7
1818	610	0.715	0.024967	40.053	2.7	3.0	3.2	3.5	3.7	4.0	4.2	4.5	4.7	5.0
1939	489	0.572	0.019977	50.058	2.2	2.4	2.6	2.8	3.0	3.2	3.4	3.6	3.8	4.0
2020	408	0.477	0.016636	60.110	1.8	2.0	2.2	2.3	2.5	2.7	2.8	3.0	3.2	3.3
2077	351	0.409	0.014285	70.003	1.6	1.7	1.9	2.0	2.1	2.3	2.4	2.6	2.7	2.9
2120	308	0.358	0.012512	79.926	1.4	1.5	1.6	1.8	1.9	2.0	2.1	2.3	2.4	2.5
2154	274	0.318	0.011109	90.015	1.2	1.3	1.4	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0	2.1	2.2
2181	247	0.286	0.009996	100.044	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0
2203	225	0.260	0.009088	110.032	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.5	1.6	1.7	1.8
2222	206	0.238	0.008305	120.415	0.9	1.0	1.1	1.2	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7
2237	191	0.220	0.007686	130.108	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.2	1.3	1.4	1.5	1.5
2250	178	0.205	0.007150	139.866	0.8	0.9	0.9	1.0	1.1	1.1	1.2	1.3	1.4	1.4
2262	166	0.191	0.006655	150.268	0.7	0.8	0.9	0.9	1.0	1.1	1.1	1.2	1.3	1.3
2272	156	0.179	0.006242	160.197	0.7	0.7	0.8	0.9	0.9	1.0	1.1	1.1	1.2	1.2
2281	147	0.168	0.005871	170.325	0.6	0.7	0.8	0.8	0.9	0.9	1.0	1.1	1.1	1.2
2289	139	0.159	0.005541	180.468	0.6	0.7	0.7	0.8	0.8	0.9	0.9	1.0	1.1	1.1
2296	132	0.150	0.005252	190.388	0.6	0.6	0.7	0.7	0.8	0.8	0.9	0.9	1.0	1.1
2302	126	0.143	0.005005	199.802	0.6	0.6	0.7	0.7	0.8	0.8	0.9	0.9	1.0	1.0
2308	120	0.136	0.004757	210.195	0.5	0.6	0.6	0.7	0.7	0.8	0.8	0.9	0.9	1.0
2313	115	0.130	0.004551	219.720	0.5	0.5	0.6	0.6	0.7	0.7	0.8	0.8	0.9	0.9
2318	110	0.124	0.004345	230.148	0.5	0.5	0.6	0.6	0.7	0.7	0.7	0.8	0.8	0.9
2322	106	0.120	0.004180	239.232	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8
2326	102	0.115	0.004015	249.062	0.4	0.5	0.5	0.6	0.6	0.6	0.7	0.7	0.8	0.8
2330	98	0.110	0.003850	259.735	0.4	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6	0.7	0.7	0.7	0.8
2334	94	0.106	0.003685	271.363	0.4	0.4	0.5	0.5	0.6	0.6	0.6	0.7	0.7	0.7
2337	91	0.102	0.003561	280.791	0.4	0.4	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6	0.6	0.7	0.7
2340	88	0.098	0.003438	290.898	0.4	0.4	0.4	0.5	0.5	0.6	0.6	0.6	0.7	0.7
2343	85	0.095	0.003314	301.760	0.4	0.4	0.4	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6	0.6	0.7
	83	0.093	0.003231	309.463	0.4	0.4	0.4	0.5	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6	0.6
	81	0.090	0.003149	317.570	0.3	0.4	0.4	0.4	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6	0.6
	79	0.088	0.003066	326.114	0.3	0.4	0.4	0.4	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6	0.6
	76	0.084	0.002943	339.826	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6
	74	0.082	0.002860	349.627	0.3	0.3	0.4	0.4	0.4	0.5	0.5	0.5	0.5	0.6
	72	0.080	0.002778	360.010	0.3	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.5	0.5	0.6
	70	0.077	0.002695	371.029	0.3	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.5	0.5	0.5
	68	0.075	0.002613	382.744	0.3	0.3	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.5	0.5
	67	0.074	0.002571	388.883	0.3	0.3	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.5	0.5
	65	0.071	0.002489	401.771	0.3	0.3	0.3	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.5

表 2-1-4 照射角と照射距離による照射範囲の計算表 210m～300m

No	座標	θ	$\sin\theta \times 2$	m	210	220	230	240	250	260	270	280	290	300
1	2427	2.862	0.099870	10.013	21.0	22.0	23.0	24.0	25.0	26.0	27.0	28.0	29.0	30.0
5	2423	2.858	0.099705	10.030	20.9	21.9	22.9	23.9	24.9	25.9	26.9	27.9	28.9	29.9
1211	1217	1.433	0.049999	20.001	10.5	11.0	11.5	12.0	12.5	13.0	13.5	14.0	14.5	15.0
1616	812	0.954	0.033298	30.032	7.0	7.3	7.7	8.0	8.3	8.7	9.0	9.3	9.7	10.0
1818	610	0.715	0.024967	40.053	5.2	5.5	5.7	6.0	6.2	6.5	6.7	7.0	7.2	7.5
1939	489	0.572	0.019977	50.058	4.2	4.4	4.6	4.8	5.0	5.2	5.4	5.6	5.8	6.0
2020	408	0.477	0.016636	60.110	3.5	3.7	3.8	4.0	4.2	4.3	4.5	4.7	4.8	5.0
2077	351	0.409	0.014285	70.003	3.0	3.1	3.3	3.4	3.6	3.7	3.9	4.0	4.1	4.3
2120	308	0.358	0.012512	79.926	2.6	2.8	2.9	3.0	3.1	3.3	3.4	3.5	3.6	3.8
2154	274	0.318	0.011109	90.015	2.3	2.4	2.6	2.7	2.8	2.9	3.0	3.1	3.2	3.3
2181	247	0.286	0.009996	100.044	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9	3.0
2203	225	0.260	0.009088	110.032	1.9	2.0	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.5	2.6	2.7
2222	206	0.238	0.008305	120.415	1.7	1.8	1.9	2.0	2.1	2.2	2.2	2.3	2.4	2.5
2237	191	0.220	0.007686	130.108	1.6	1.7	1.8	1.8	1.9	2.0	2.1	2.2	2.2	2.3
2250	178	0.205	0.007150	139.866	1.5	1.6	1.6	1.7	1.8	1.9	1.9	2.0	2.1	2.1
2262	166	0.191	0.006655	150.268	1.4	1.5	1.5	1.6	1.7	1.7	1.8	1.9	1.9	2.0
2272	156	0.179	0.006242	160.197	1.3	1.4	1.4	1.5	1.6	1.6	1.7	1.7	1.8	1.9
2281	147	0.168	0.005871	170.325	1.2	1.3	1.4	1.4	1.5	1.5	1.6	1.6	1.7	1.8
2289	139	0.159	0.005541	180.468	1.2	1.2	1.3	1.3	1.4	1.4	1.5	1.6	1.6	1.7
2296	132	0.150	0.005252	190.388	1.1	1.2	1.2	1.3	1.3	1.4	1.4	1.5	1.5	1.6
2302	126	0.143	0.005005	199.802	1.1	1.1	1.2	1.2	1.3	1.3	1.4	1.4	1.5	1.5
2308	120	0.136	0.004757	210.195	1.0	1.0	1.1	1.1	1.2	1.2	1.3	1.3	1.4	1.4
2313	115	0.130	0.004551	219.720	1.0	1.0	1.0	1.1	1.1	1.2	1.2	1.3	1.3	1.4
2318	110	0.124	0.004345	230.148	0.9	1.0	1.0	1.0	1.1	1.1	1.2	1.2	1.3	1.3
2322	106	0.120	0.004180	239.232	0.9	0.9	1.0	1.0	1.0	1.1	1.1	1.2	1.2	1.3
2326	102	0.115	0.004015	249.062	0.8	0.9	0.9	1.0	1.0	1.0	1.1	1.1	1.2	1.2
2330	98	0.110	0.003850	259.735	0.8	0.8	0.9	0.9	1.0	1.0	1.0	1.1	1.1	1.2
2334	94	0.106	0.003685	271.363	0.8	0.8	0.8	0.9	0.9	1.0	1.0	1.0	1.1	1.1
2337	91	0.102	0.003561	280.791	0.7	0.8	0.8	0.9	0.9	0.9	1.0	1.0	1.0	1.1
2340	88	0.098	0.003438	290.898	0.7	0.8	0.8	0.8	0.9	0.9	0.9	1.0	1.0	1.0
2343	85	0.095	0.003314	301.760	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8	0.9	0.9	0.9	1.0	1.0
	83	0.093	0.003231	309.463	0.7	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8	0.9	0.9	0.9	1.0
	81	0.090	0.003149	317.570	0.7	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8	0.9	0.9	0.9	0.9
	79	0.088	0.003066	326.114	0.6	0.7	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8	0.9	0.9	0.9
	76	0.084	0.002943	339.826	0.6	0.6	0.7	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8	0.9	0.9
	74	0.082	0.002860	349.627	0.6	0.6	0.7	0.7	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8	0.9
	72	0.080	0.002778	360.010	0.6	0.6	0.6	0.7	0.7	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8
	70	0.077	0.002695	371.029	0.6	0.6	0.6	0.6	0.7	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8
	68	0.075	0.002613	382.744	0.5	0.6	0.6	0.6	0.7	0.7	0.7	0.7	0.8	0.8
	67	0.074	0.002571	388.883	0.5	0.6	0.6	0.6	0.6	0.7	0.7	0.7	0.7	0.8
	65	0.071	0.002489	401.771	0.5	0.5	0.6	0.6	0.6	0.6	0.7	0.7	0.7	0.7

表2-1-5 照射角と照射距離による照射範囲の計算表 310m～400m

No	座標	θ	$\sin\theta \times 2$	m	310	320	330	340	350	360	370	380	390	400
1	2427	2.862	0.099870	10.013	31.0	32.0	33.0	34.0	35.0	36.0	37.0	38.0	38.9	39.9
5	2423	2.858	0.099705	10.030	30.9	31.9	32.9	33.9	34.9	35.9	36.9	37.9	38.9	39.9
1211	1217	1.433	0.049999	20.001	15.5	16.0	16.5	17.0	17.5	18.0	18.5	19.0	19.5	20.0
1616	812	0.954	0.033298	30.032	10.3	10.7	11.0	11.3	11.7	12.0	12.3	12.7	13.0	13.3
1818	610	0.715	0.024967	40.053	7.7	8.0	8.2	8.5	8.7	9.0	9.2	9.5	9.7	10.0
1939	489	0.572	0.019977	50.058	6.2	6.4	6.6	6.8	7.0	7.2	7.4	7.6	7.8	8.0
2020	408	0.477	0.016636	60.110	5.2	5.3	5.5	5.7	5.8	6.0	6.2	6.3	6.5	6.7
2077	351	0.409	0.014285	70.003	4.4	4.6	4.7	4.9	5.0	5.1	5.3	5.4	5.6	5.7
2120	308	0.358	0.012512	79.926	3.9	4.0	4.1	4.3	4.4	4.5	4.6	4.8	4.9	5.0
2154	274	0.318	0.011109	90.015	3.4	3.6	3.7	3.8	3.9	4.0	4.1	4.2	4.3	4.4
2181	247	0.286	0.009996	100.044	3.1	3.2	3.3	3.4	3.5	3.6	3.7	3.8	3.9	4.0
2203	225	0.260	0.009088	110.032	2.8	2.9	3.0	3.1	3.2	3.3	3.4	3.5	3.5	3.6
2222	206	0.238	0.008305	120.415	2.6	2.7	2.7	2.8	2.9	3.0	3.1	3.2	3.2	3.3
2237	191	0.220	0.007686	130.108	2.4	2.5	2.5	2.6	2.7	2.8	2.8	2.9	3.0	3.1
2250	178	0.205	0.007150	139.866	2.2	2.3	2.4	2.4	2.5	2.6	2.6	2.7	2.8	2.9
2262	166	0.191	0.006655	150.268	2.1	2.1	2.2	2.3	2.3	2.4	2.5	2.5	2.6	2.7
2272	156	0.179	0.006242	160.197	1.9	2.0	2.1	2.1	2.2	2.2	2.3	2.4	2.4	2.5
2281	147	0.168	0.005871	170.325	1.8	1.9	1.9	2.0	2.1	2.1	2.2	2.2	2.3	2.3
2289	139	0.159	0.005541	180.468	1.7	1.8	1.8	1.9	1.9	2.0	2.1	2.1	2.2	2.2
2296	132	0.150	0.005252	190.388	1.6	1.7	1.7	1.8	1.8	1.9	1.9	2.0	2.0	2.1
2302	126	0.143	0.005005	199.802	1.6	1.6	1.7	1.7	1.8	1.8	1.9	1.9	2.0	2.0
2308	120	0.136	0.004757	210.195	1.5	1.5	1.6	1.6	1.7	1.7	1.8	1.8	1.9	1.9
2313	115	0.130	0.004551	219.720	1.4	1.5	1.5	1.5	1.6	1.6	1.7	1.7	1.8	1.8
2318	110	0.124	0.004345	230.148	1.3	1.4	1.4	1.5	1.5	1.6	1.6	1.7	1.7	1.7
2322	106	0.120	0.004180	239.232	1.3	1.3	1.4	1.4	1.5	1.5	1.5	1.6	1.6	1.7
2326	102	0.115	0.004015	249.062	1.2	1.3	1.3	1.4	1.4	1.4	1.5	1.5	1.6	1.6
2330	98	0.110	0.003850	259.735	1.2	1.2	1.3	1.3	1.3	1.4	1.4	1.5	1.5	1.5
2334	94	0.106	0.003685	271.363	1.1	1.2	1.2	1.3	1.3	1.3	1.4	1.4	1.4	1.5
2337	91	0.102	0.003561	280.791	1.1	1.1	1.2	1.2	1.2	1.3	1.3	1.4	1.4	1.4
2340	88	0.098	0.003438	290.898	1.1	1.1	1.1	1.2	1.2	1.2	1.3	1.3	1.3	1.4
2343	85	0.095	0.003314	301.760	1.0	1.1	1.1	1.1	1.2	1.2	1.2	1.3	1.3	1.3
	83	0.093	0.003231	309.463	1.0	1.0	1.1	1.1	1.1	1.2	1.2	1.2	1.3	1.3
	81	0.090	0.003149	317.570	1.0	1.0	1.0	1.1	1.1	1.1	1.2	1.2	1.2	1.3
	79	0.088	0.003066	326.114	1.0	1.0	1.0	1.0	1.1	1.1	1.1	1.2	1.2	1.2
	76	0.084	0.002943	339.826	0.9	0.9	1.0	1.0	1.0	1.1	1.1	1.1	1.1	1.2
	74	0.082	0.002860	349.627	0.9	0.9	0.9	1.0	1.0	1.0	1.1	1.1	1.1	1.1
	72	0.080	0.002778	360.010	0.9	0.9	0.9	0.9	1.0	1.0	1.0	1.1	1.1	1.1
	70	0.077	0.002695	371.029	0.8	0.9	0.9	0.9	0.9	1.0	1.0	1.0	1.1	1.1
	68	0.075	0.002613	382.744	0.8	0.8	0.9	0.9	0.9	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0
	67	0.074	0.002571	388.883	0.8	0.8	0.8	0.9	0.9	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0
	65	0.071	0.002489	401.771	0.8	0.8	0.8	0.8	0.9	0.9	0.9	0.9	1.0	1.0

表2-1-6

ログ項目	単位	内容
No		通番(R1～R8が変化したタイミングを記録する)
Time	秒	記録時間(ログ開始からの時間で表現)
P1～P8	4μm座標	レンズ位置
距離	m	照射距離
E1～E8	cm	照射範囲
位置 x、y	cm	受光機的位置座標
方位	deg	ずれの光軸方向
ずれ	cm	ずれの光軸距離
傾き	deg	ずれの光軸傾き
R1～R8	光量	受光量(フォトン数の総量)
補正方向	deg	解析結果(位置ずれを補正する方向)

表2-1-7

No	Time	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	距離	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	位置x	位置y	方位	ずれ	傾き	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	補正	
1	0.001	1925	341	1925	341	1925	341	1925	341	10	79.2	13.9	79.2	13.9	79.2	13.9	79.2	13.9	0	0	0.0	0.00	0.000	1	3	1	3	1	3	1	3		
2	12.926	1925	341	1925	341	1925	341	1925	341	10	79.2	13.9	79.2	13.9	79.2	13.9	79.2	13.9	10	0	0.0	10.00	0.573	1	1	1	1	1	1	1	1		
3	13.021	1925	341	1925	341	1925	341	1925	341	10	79.2	13.9	79.2	13.9	79.2	13.9	79.2	13.9	40	0	0.0	40.00	2.291	0	0	0	0	0	1	0	1	180.00	
4	13.136	1925	341	1925	341	1925	341	1925	341	10	79.2	13.9	79.2	13.9	79.2	13.9	79.2	13.9	70	0	0.0	70.00	4.004	0	0	0	0	0	3	1	3	180.00	
5	13.177	1925	341	1925	341	1925	341	1925	341	10	79.2	13.9	79.2	13.9	79.2	13.9	79.2	13.9	80	0	0.0	80.00	4.574	0	0	0	0	0	1	1	1	180.00	
6	13.283	1925	341	1925	341	1925	341	1925	341	10	79.2	13.9	79.2	13.9	79.2	13.9	79.2	13.9	110	0	0.0	110.00	6.277	0	0	0	0	0	0	1	0	180.00	
7	13.372	1925	341	1925	341	1925	341	1925	341	10	79.2	13.9	79.2	13.9	79.2	13.9	79.2	13.9	140	0	0.0	140.00	7.970	0	0	0	0	0	0	0	0		
8	13.622	1925	341	1925	341	1925	341	1925	341	10	79.2	13.9	79.2	13.9	79.2	13.9	79.2	13.9	0	0	0.0	0.00	0.000	1	3	1	3	1	3	1	3		
9	13.659	1925	341	1925	341	1925	341	1925	341	10	79.2	13.9	79.2	13.9	79.2	13.9	79.2	13.9	9	-2	12.5	9.22	0.528	1	1	1	1	1	1	1	1		
10	13.737	1925	341	1925	341	1925	341	1925	341	10	79.2	13.9	79.2	13.9	79.2	13.9	79.2	13.9	27	-6	12.5	27.66	1.584	1	0	1	1	1	1	1	1	-135.00	
11	13.767	1925	341	1925	341	1925	341	1925	341	10	79.2	13.9	79.2	13.9	79.2	13.9	79.2	13.9	36	-8	12.5	36.88	2.112	1	0	1	1	2	1	1	1	-112.50	
12	13.800	1925	341	1925	341	1925	341	1925	341	10	79.2	13.9	79.2	13.9	79.2	13.9	79.2	13.9	45	-10	12.5	46.10	2.639	0	0	0	1	0	1	0	1	-135.00	
13	13.830	1925	341	1925	341	1925	341	1925	341	10	79.2	13.9	79.2	13.9	79.2	13.9	79.2	13.9	54	-12	12.5	55.32	3.166	0	0	0	0	0	1	2	1	-151.32	
14	13.861	1925	341	1925	341	1925	341	1925	341	10	79.2	13.9	79.2	13.9	79.2	13.9	79.2	13.9	63	-14	12.5	64.54	3.693	0	0	0	0	1	1	2	1	-163.68	
15	13.892	1925	341	1925	341	1925	341	1925	341	10	79.2	13.9	79.2	13.9	79.2	13.9	79.2	13.9	72	-16	12.5	73.76	4.218	0	0	0	0	0	1	1	1	180.00	
16	13.923	1925	341	1925	341	1925	341	1925	341	10	79.2	13.9	79.2	13.9	79.2	13.9	79.2	13.9	81	-18	12.5	82.98	4.743	0	0	0	0	0	1	1	0	-157.50	
17	14.097	1925	341	1925	341	1925	341	1925	341	10	79.2	13.9	79.2	13.9	79.2	13.9	79.2	13.9	126	-28	12.5	129.07	7.355	0	0	0	0	0	0	0	1	0	180.00
18	14.128	1925	341	1925	341	1925	341	1925	341	10	79.2	13.9	79.2	13.9	79.2	13.9	79.2	13.9	135	-30	12.5	138.29	7.874	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
19	14.428	1925	341	1925	341	1925	341	1925	341	10	79.2	13.9	79.2	13.9	79.2	13.9	79.2	13.9	0	0	0.0	0.00	0.000	1	3	1	3	1	3	1	3		
20	14.473	1925	341	1925	341	1925	341	1925	341	10	79.2	13.9	79.2	13.9	79.2	13.9	79.2	13.9	8	-4	26.6	8.94	0.512	1	0	1	1	1	2	1	1	-135.00	
21	14.517	1925	341	1925	341	1925	341	1925	341	10	79.2	13.9	79.2	13.9	79.2	13.9	79.2	13.9	16	-8	26.6	17.89	1.025	1	0	1	1	1	1	1	1	-135.00	
22	14.580	1925	341	1925	341	1925	341	1925	341	10	79.2	13.9	79.2	13.9	79.2	13.9	79.2	13.9	32	-16	26.6	35.78	2.049	1	0	1	1	3	1	2	1	-122.24	
23	14.622	1925	341	1925	341	1925	341	1925	341	10	79.2	13.9	79.2	13.9	79.2	13.9	79.2	13.9	40	-20	26.6	44.72	2.561	0	0	0	1	1	1	1	1	-135.00	
24	14.715	1925	341	1925	341	1925	341	1925	341	10	79.2	13.9	79.2	13.9	79.2	13.9	79.2	13.9	56	-28	26.6	62.61	3.583	0	0	0	0	1	1	1	1	-157.50	
25	14.810	1925	341	1925	341	1925	341	1925	341	10	79.2	13.9	79.2	13.9	79.2	13.9	79.2	13.9	72	-36	26.6	80.50	4.602	0	0	0	0	1	1	1	1	-135.00	
26	14.933	1925	341	1925	341	1925	341	1925	341	10	79.2	13.9	79.2	13.9	79.2	13.9	79.2	13.9	96	-48	26.6	107.33	6.126	0	0	0	0	0	1	0	0	-135.00	
27	15.042	1925	341	1925	341	1925	341	1925	341	10	79.2	13.9	79.2	13.9	79.2	13.9	79.2	13.9	120	-60	26.6	134.16	7.641	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
28	15.281	1925	341	1925	341	1925	341	1925	341	10	79.2	13.9	79.2	13.9	79.2	13.9	79.2	13.9	0	0	0.0	0.00	0.000	1	3	1	3	1	3	1	3		
29	15.330	1925	341	1925	341	1925	341	1925	341	10	79.2	13.9	79.2	13.9	79.2	13.9	79.2	13.9	7	-7	45.0	9.90	0.567	1	0	1	1	1	2	1	1	-135.00	
30	15.423	1925	341	1925	341	1925	341	1925	341	10	79.2	13.9	79.2	13.9	79.2	13.9	79.2	13.9	28	-28	45.0	39.60	2.268	0	0	0	1	1	0	1	1	-135.00	
31	15.515	1925	341	1925	341	1925	341	1925	341	10	79.2	13.9	79.2	13.9	79.2	13.9	79.2	13.9	49	-49	45.0	69.30	3.964	0	0	0	1	1	2	1	1	-135.00	
32	15.549	1925	341	1925	341	1925	341	1925	341	10	79.2	13.9	79.2	13.9	79.2	13.9	79.2	13.9	56	-56	45.0	79.20	4.528	0	0	0	0	1	2	1	0	-135.00	
33	15.663	1925	341	1925	341	1925	341	1925	341	10	79.2	13.9	79.2	13.9	79.2	13.9	79.2	13.9	70	-70	45.0	98.99	5.654	0	0	0	0	1	3	1	0	-135.00	
34	15.703	1925	341	1925	341	1925	341	1925	341	10	79.2	13.9	79.2	13.9	79.2	13.9	79.2	13.9	77	-77	45.0	108.89	6.215	0	0	0	0	1	0	1	0	-135.00	
35	15.739	1925	341	1925	341	1925	341	1925	341	10	79.2	13.9	79.2	13.9	79.2	13.9	79.2	13.9	84	-84	45.0	118.79	6.775	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
36	16.078	1925	341	1925	341	1925	341	1925	341	10	79.2	13.9	79.2	13.9	79.2	13.9	79.2	13.9	0	0	0.0	0.00	0.000	1	3	1	3	1	3	1	3		
37	16.111	1925	341	1925	341	1925	341	1925	341	10	79.2	13.9	79.2	13.9	79.2	13.9	79.2	13.9	5	-8	58.0	9.43	0.541	1	0	1	1	1	2	1	1	-135.00	
38	16.140	1925	341	1925	341	1925	341	1925	341	10	79.2	13.9	79.2	13.9	79.2	13.9	79.2	13.9	10	-16	58.0	18.87	1.081	1	0	1	1	1	1	1	1	-135.00	
39	16.204	1925	341	1925	341	1925	341	1925	341	10	79.2	13.9	79.2	13.9	79.2	13.9	79.2	13.9	20	-32	58.0	37.74	2.161	1	0	1	1	2	1	3	1	-147.76	
40	16.236	1925	341	1925	341	1925	341	1925	341	10	79.2	13.9	79.2	13.9	79.2	13.9	79.2	13.9	25	-40	58.0	47.17	2.701	0	0	0	1	1	0	1	1	-135.00	
41	16.291	1925	341	1925	341	1925	341	1925	341	10	79.2	13.9	79.2	13.9	79.2	13.9	79.2	13.9	30	-48	58.0	56.60	3.240	0	0	0	1	1	1	1	1	-135.00	
42	16.328	1925	341	1925	341	1925	341	1925	341	10	79.2	13.9	79.2	13.9	79.2	13.9	79.2	13.9	35	-56	58.0	66.04	3.778	0	0	0	1	1	1	1	1	-112.50	
43	16.392	1925	341	1925	341	1925	341	1925	341	10	79.2	13.9	79.2	13.9	79.2	13.9	79.2	13.9	45	-72	58.0	84.91	4.853	0	0								

②－２．リングパルスレーザ装置の水中航走体センシング用レーザ光源およびフォトン受信機の研究開発

②－２－１．概要

リングパルスレーザ（RPLと略す）装置のブロック図を図2-2-1に示す。

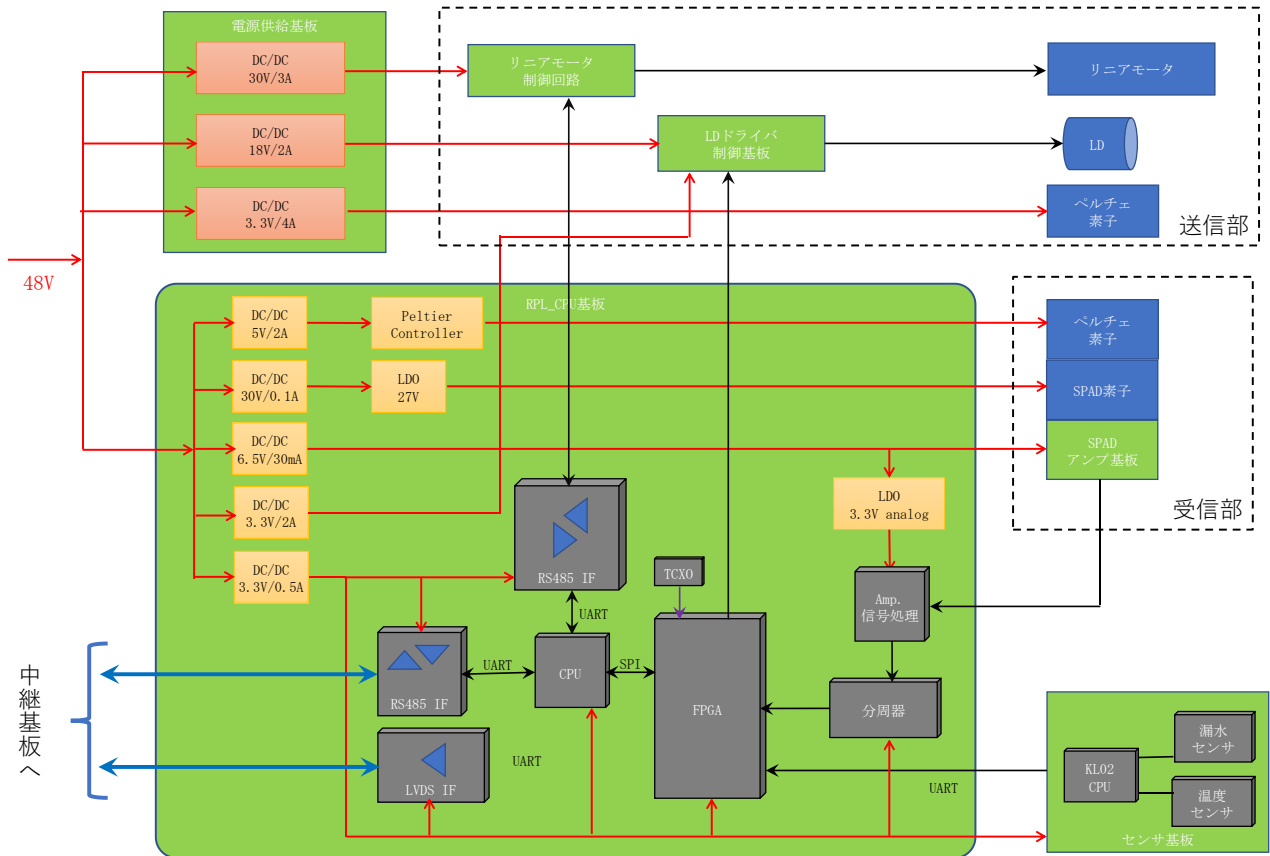


図2-2-1 RPLブロック図

RPLを使用したROV制御システム（粗追尾機構）はソフトバンク及び株式会社アイエスピーで開発され、RPL装置はその制御システムの構成要素である。RPL装置は送信部、受信部、センサ基板、中継基板とのインターフェースであるRPL_CPU基板及び電源供給ボードから成り、RPL装置は副耐圧容器に収納されROV本体に装着される。RPL送信光はOCC用途でも使用される。近距離においてはOCCカメラが受信部として機能し、途中RPL受信部に切り替わってROVの制御用信号検出を行う。受信部の光検出器にSPAD arrayを当初検討していたが、本プロジェクト期間中に入手が困難な事が判明したため、SPADセンサを検出器に用いる事とした。成果を表2-2-1に纏める。

表2-2-1

項目	目標値	成果
LDドライバ開発	1 WクラスLDでRPLパターン周期24msec、発光時間3msec、消灯時間21msecの変調を実現	出力1WのLDで500Mbpsが可能となった これより粗追尾用レーザ光源仕様を満足するドライバが開発できた
光路検討1	ビーム径可変機構の検討	リレーレンズをリニアモータで駆動する方式を開

		発した
光路検討2	海中300mでビーム径1mの時の受光量検討 ※RPLパターン時有効最小photon数は120	RPLパターンで1nW受光時のphoton数は約3400個(約35pWで約120個)となり、想定海域での300m先におけるRPL制御用光源光路開発が出来た

粗追尾機構からのRPL装置へのハードウェア、ファームウェアの要求仕様

【ハードウェア要求仕様】

- ・LD光量はピークで最低1Wである事
- ・OCCパターン発光、RPLパターン発光が仕様通り発光でき、PCより発光パターンが制御出来る事
- ・出射光のビーム径が連続で段階的に可変出来る事
8個のRPLの内4個を近距離用、残り4個を長距離用の2グループを構成して、ビーム径の可変が異なる様にする。
- ・副耐圧容器内光学ブロック部の漏水センサ及びレーザ温度センサを装備

【ファームウェア要求仕様】

- ・制御ソフト仕様の内RPL関連仕様を転記し表2-2-2に示す。

表2-2-2

<u>コマンド</u>	<u>方向</u>	<u>内容</u>
<u>RPLユニット開始</u>	<u>受信</u>	<u>RPL受発光開始</u>
<u>RPLユニット停止</u>	<u>受信</u>	<u>RPL受発光停止</u>
<u>RPLデータ</u>	<u>送信</u>	<u>受光量</u>
<u>RPLユニット環境</u>	<u>送信</u>	<u>LD温度、漏水情報</u>
<u>RPLパターン設定</u>	<u>受信</u>	<u>RPL発光設定</u>

②-2-2. RPLレーザ光源の研究開発

レーザ光源として波長450nmで発光量1W以上のLDを使用する。RPLパターン、OCCパターンとも変調周波数が低くLDドライバは精追尾および通信用レーザ光源とは異なり、 i_L のみのコントロールを行っている。また実装上RPL用LDドライバ基板サイズが制限されている事から、必要最小限の部品点数となる様に回路設計を行った。

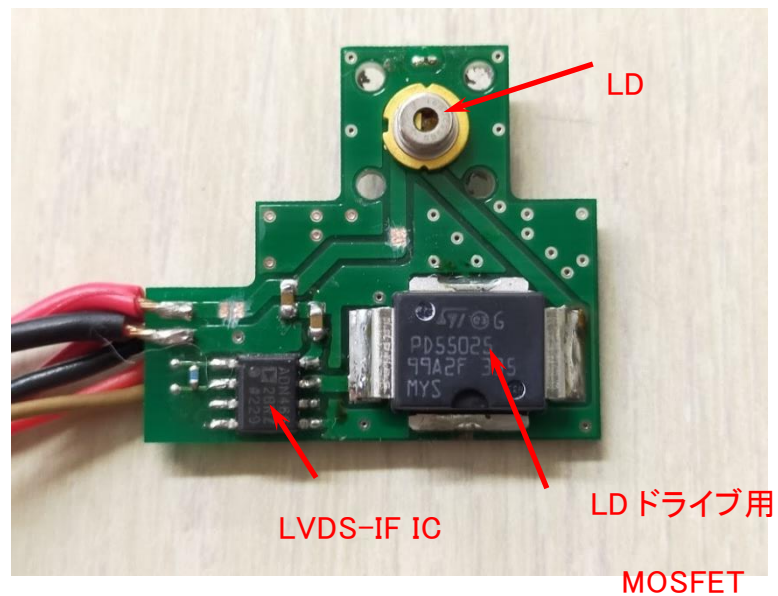


図2-2-2

光源原理試作機に粗迫尾原理試作機に搭載されているSPAD基板を用いて、LDドライブ回路の評価を行った。図2-2-3にRPL原理試作機を示す。

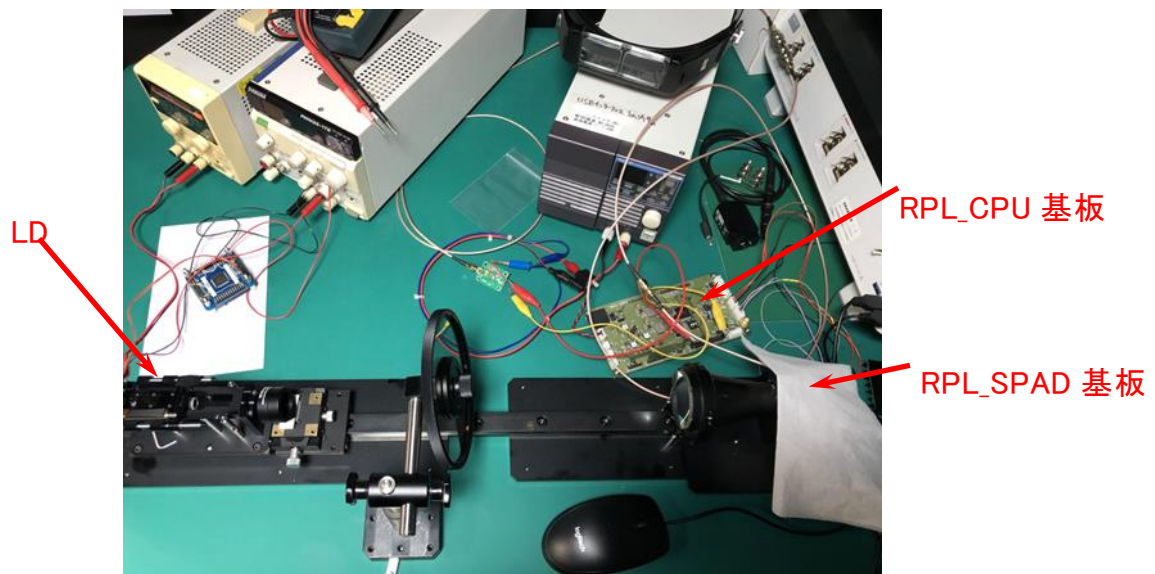


図2-2-3

図2-2-4に評価結果を示す。パターンはRPLパターンでLD発光時間は3msec、LD消灯期間は21msecで周期は24msecである。黄色の信号はSPAD出力信号でマゼンタ色の信号はLD発光期間（LOW区間）を示す信号でSPAD出力信号から検出されている。

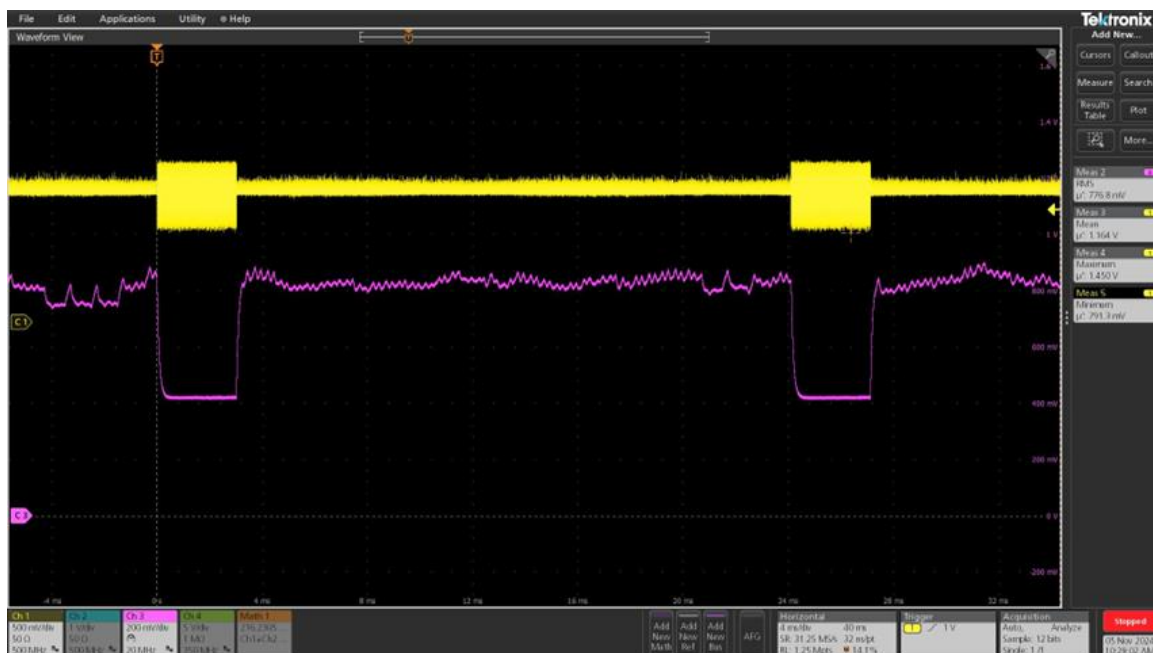


図2-2-4

②－２－３．RPLフォトン受信機の研究開発

１．送信部

１－１．光学系

出射光のビーム径が連続で段階的に可変する方法として、図2-2-5に示されている様にリレーレンズ位置をリニアモータを用いて可変する事により実現している。

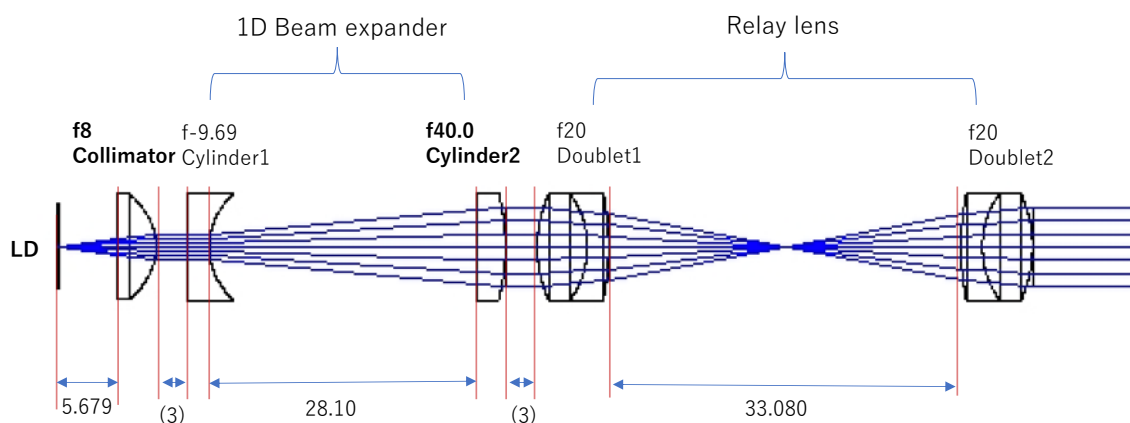


図2-2-5

ビーム径は放射角度から求められる為、水中におけるリレーレンズ位置と放射角度の関係及びリレーレンズ移動距離と移動時間を実験とシミュレーションにより求めた。

結果を表2-2-3に示し、リレーレンズ位置と放射角度の関係を図2-2-6に、リレーレンズ移動距離と移動時間を図2-2-7に示す。

表2-2-3

ポジション	角度(°)	レンズ位置(mm)	レンズ移動量(mm)	移動時間(msec)
1	2.862	7.30	3.64	49.9
2	1.432	3.66	1.21	24.4
3	0.955	2.44	0.61	15.6
4	0.716	1.84	0.61	15.6
5	0.477	1.23	0.30	9.9
6	0.358	0.93	0.18	7.1
7	0.286	0.74	0.17	6.8
8	0.22	0.57	0.10	5.0
9	0.179	0.47	0.09	4.6
10	0.143	0.38	0.07	3.9
11	0.115	0.31		
	7msecの移動距離		0.18	7.0

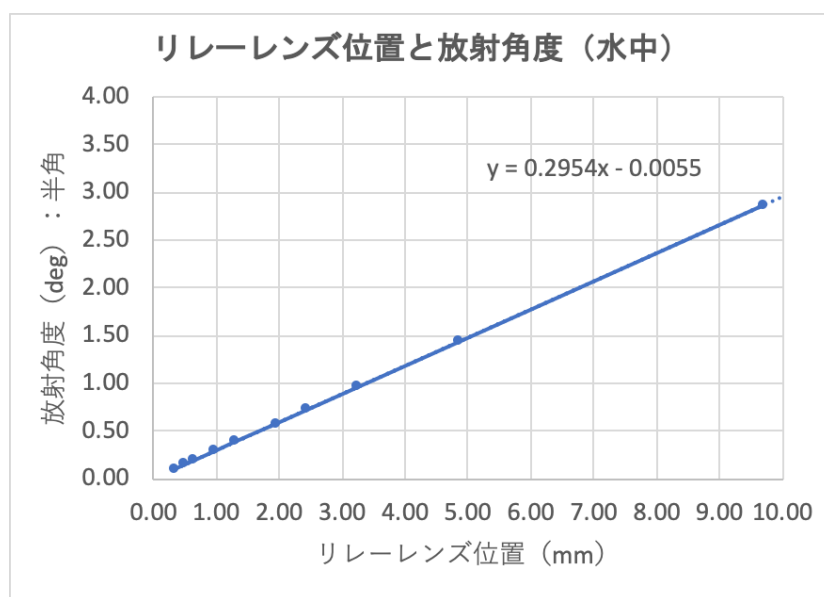


図2-2-6

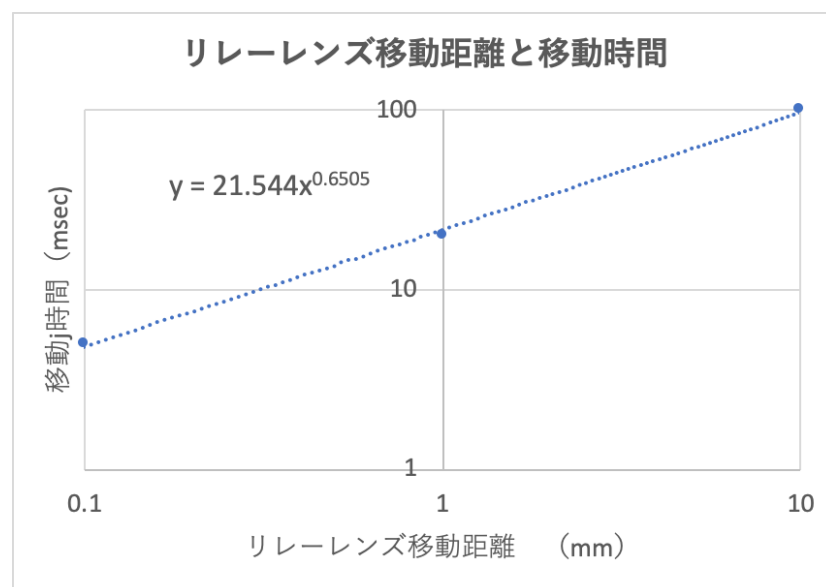


図2-2-7

1 - 2. 送信部リニアモータ

リニアモータ制御プログラムを作成して図2-2-8に示す原理試作機を用いて、動作試験を行った。

リニアDCモーター
ハウルパー製
LM0830-015-01

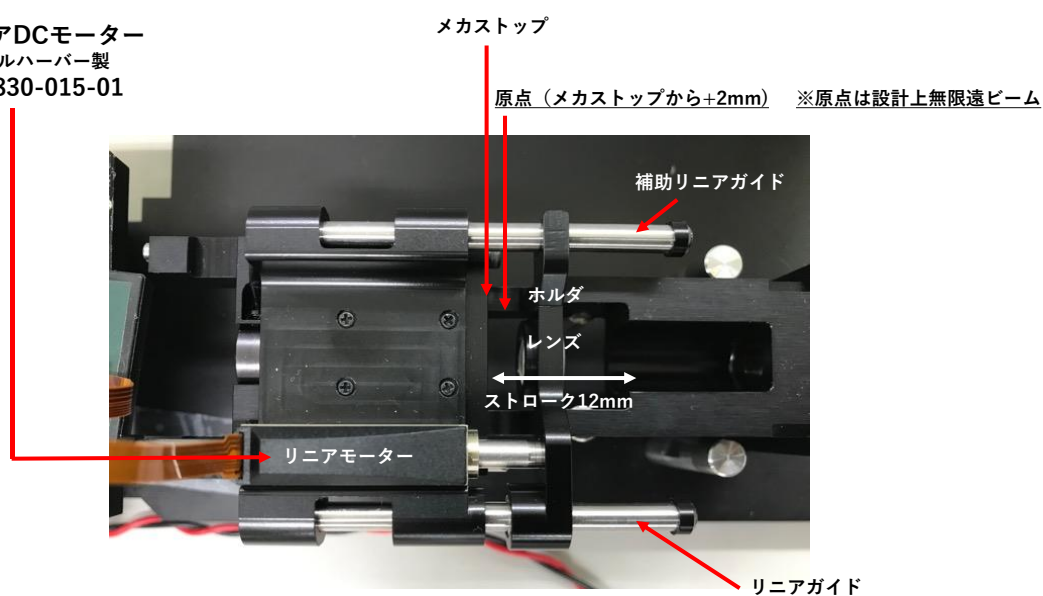


図2-2-8

表2-2-3近距離用、遠距離用のリレーレンズ位置の仕様を示す。

表2-2-4

ステップ番号	近距離用位置仕様値	遠距離用位置仕様値
	mm (原点からの距離)	mm (原点からの距離)
0	7.70	1.404
1	6.74	1.232

2	5.78	1.044
3	4.82	0.864
4	4.34	0.740
5	3.86	0.644
6	3.38	0.576
7	2.90	0.508
8	2.42	0.444
9	1.94	0.396
10	1.46	0.356

仕様に基づきステップ番号0から1へ、1から2へとステップ送りをした時の誤差を測定した。リニアモーターメーカー提供のソフトウェアによって計測を行った。測定結果を表2-2-6に示す。

表2-2-5

ステップ番号	近距離用位置仕様値	誤差
	mm (原点からの距離)	μ m
0	7.70	72
1	6.74	34
2	5.78	2
3	4.82	-2
4	4.34	2
5	3.86	10
6	3.38	18
7	2.90	22
8	2.42	22
9	1.94	22
10	1.46	18

表2-2-6

ステップ番号	遠距離用位置仕様値	誤差
	mm (原点からの距離)	μ m
0	1.404	17
1	1.232	22
2	1.044	15
3	0.864	12
4	0.740	10
5	0.644	8
6	0.576	10
7	0.508	3
8	0.444	3
9	0.396	8
10	0.356	12

No. 0からNo. 10、No. 10からNo. 0への各ステップへ移動した時の状態を、前記ソフトウェアによって計測したグラフで、近距離移動及び遠距離移動の結果を図2-2-9及び図2-2-10に示す。

各グラフにおいて、緑のラインは目標位置を示し、赤のラインは移動した位置を示す。グラフ左側の表は近距離用及び遠距離用の仕様を転記したもので、No. 0の位置からNo. 10の位置に移動して、No. 10からNo. 0に戻るリニアモータの動作を矢印で示している。

表及びグラフ中に使用されている” inc.” は1inc. = $4\mu\text{m}$ を表している。

ステップ応答は主にリニアモータに装着されているレンズの重量やリニアモータの駆動力、制動力で決まる。リニアモータの仕様及びレンズ重量からほぼ限界値と考えられる。

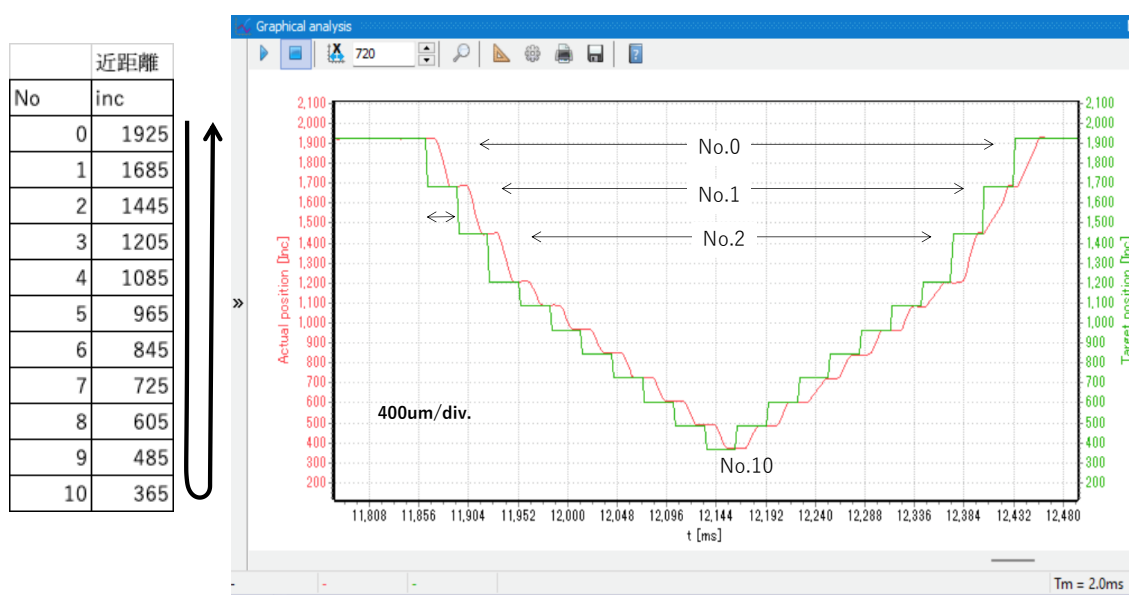


図2-2-9

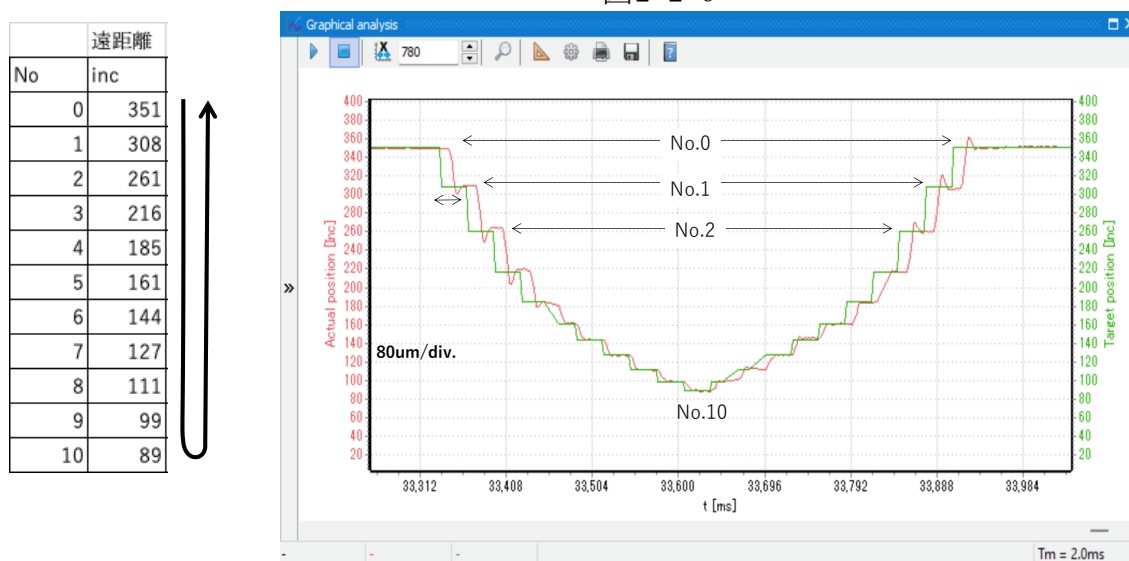


図2-2-10

2. 受信部

ROV全体のバランスからRPL本体は小型軽量が求められた。受光部としては出来るだけ多くの光を集められることが望ましいが、前記要求より直径50mm、有効径45mmのレンズとし、光学系はシンプルにBPF(Band Pass Filter)と受光素子のSPADという構成になっている。図2-2-11に受光部を示す。

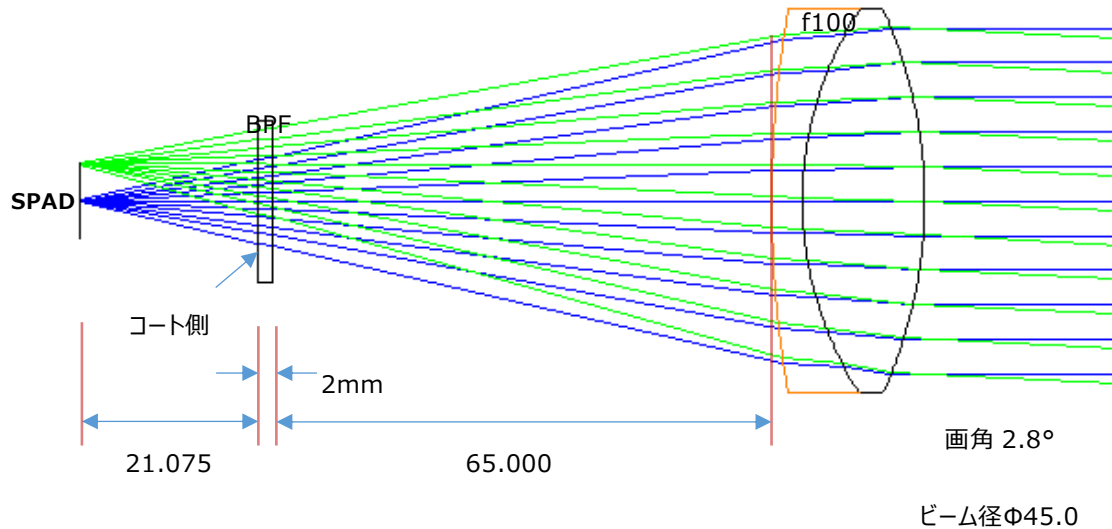


図2-2-11

この光学系において、レンズ前の光量及び送信光ビーム径をパラメータとして、上記レンズで受光した場合のphoton数を求めた。送信光の変調は周期24msec、発光時間3msec、消光時間21msecのRPLパターンを用いた。レーザ波長は450nmで450nm時のSPADの変換効率は0.25としている。

表2-2-7

条件 レンズ45mmΦ、レーザ波長450nm、変換効率0.25、発光時間3msec

光束径(mm)	1mW	1μW	1nW	1pW
200	8.6013.E+10	8.6013.E+07	8.6013.E+04	8.6013.E+01
400	2.1503.E+10	2.1503.E+07	2.1503.E+04	2.1503.E+01
600	9.5570.E+09	9.5570.E+06	9.5570.E+03	9.5570.E+00
800	5.3758.E+09	5.3758.E+06	5.3758.E+03	5.3758.E+00
1000	3.4405.E+09	3.4405.E+06	3.4405.E+03	3.4405.E+00
1200	2.3892.E+09	2.3892.E+06	2.3892.E+03	2.3892.E+00
1400	1.7554.E+09	1.7554.E+06	1.7554.E+03	1.7554.E+00
1600	1.3439.E+09	1.3439.E+06	1.3439.E+03	1.3439.E+00
1800	1.0619.E+09	1.0619.E+06	1.0619.E+03	1.0619.E+00
2000	8.6013.E+08	8.6013.E+05	8.6013.E+02	8.6013.E-01
2200	7.1085.E+08	7.1085.E+05	7.1085.E+02	7.1085.E-01
2400	5.9731.E+08	5.9731.E+05	5.9731.E+02	5.9731.E-01
2600	5.0895.E+08	5.0895.E+05	5.0895.E+02	5.0895.E-01
2800	4.3884.E+08	4.3884.E+05	4.3884.E+02	4.3884.E-01
3000	3.8228.E+08	3.8228.E+05	3.8228.E+02	3.8228.E-01

送信光のビーム径を1mとすると1nWで約3400個のphotonが検出できる。今回使用したSPADのdark countは500cps(counts per second)となっている。Dark countからRPLパターンでの有効最小photon数は120個と考えられる。Photon数120個は表2-2-7のphoton数計算でビーム径1000mmの時約35pWとなる。1nW未満でもRPLシステムが成り立つと考えられ受光部としては問題無いと考える。

3. RPL_CPU基板及び電源供給基板

3-1. RPL_CPU基板及び電源供給

- ・中継基板とのインターフェース機能

図2-2-1が示す様にRS485とLVDSで接続されている。低速データ転送にRS485が高速データ転送にはLVDSが用いられている。

- ・制御PCから送られてくるコマンドの実行

「②-2-1 概要 【ファームウェア要求仕様】」を参照の事。

- ・制御PCへ中継基板を介してデータの送信

「②-2-1 概要 【ファームウェア要求仕様】」を参照の事

- ・各回路への電源供給

ROV本体から水中ケーブル、水中コネクタを経由して48V電源が供給される。48V電源は電源供給基板及びRPL_CPU基板に供給される。

電源供給基板はDC-DCコンバータでリニアモータ用に30V、LDドライバ用に18V、LD冷却ペルチェ素子用に3.3Vが生成される。CPR_CPU基板ではSPAD内ペルチェ素子コントローラ用として5V電源、SPAD用として28V電源、SPAD基板用及びRPL_CPU基板アナログ回路用LD0用として6.5V、LDドライバ制御基板用として3.3V、RPL_CPU基板デジタル回路用として3.3VがDC-DCコンバータにより生成される。

- ・SPAD内ペルチェ素子用温度コントローラ、photon数計測FPGA及びLDの温度信号、漏水検知信号から成るRPL内センサ基板からの信号処理及びこれらの情報を処理するCPUを有している。

SPAD内ペルチェ素子用温度コントローラ用SPAD内蔵サーミスタを用いてSPADデバイス温度が-30℃になる様に制御している。計測されたphoton数は中継基板経由で制御PCに送られROV制御に使用される。CPUはRPL内センサ基板のLD温度情報をCPU内12ビットADコンバータによりデジタルデータとして中継基板に送出し、また60℃を超えた場合はLD保護の為LDドライバ供給電源のシャットダウンを行う。漏水検知信号もCPU内ADコンバータでデジタルデータにして中継基板に送出される。

4. 原理試作機

原理試作機では個別で検討してきた課題解決方法の確認と実機作成に向けての調整方法、組立方法の検討を行った。個別に検討してきた課題に対して原理試作機で問題となるものは無かった。ここではシリンドリカルレンズによるビームプロファイル補正と全体の機能を動作させた時の温度評価結果について記述する。

原理試作機の写真を図2-2-12に示す。

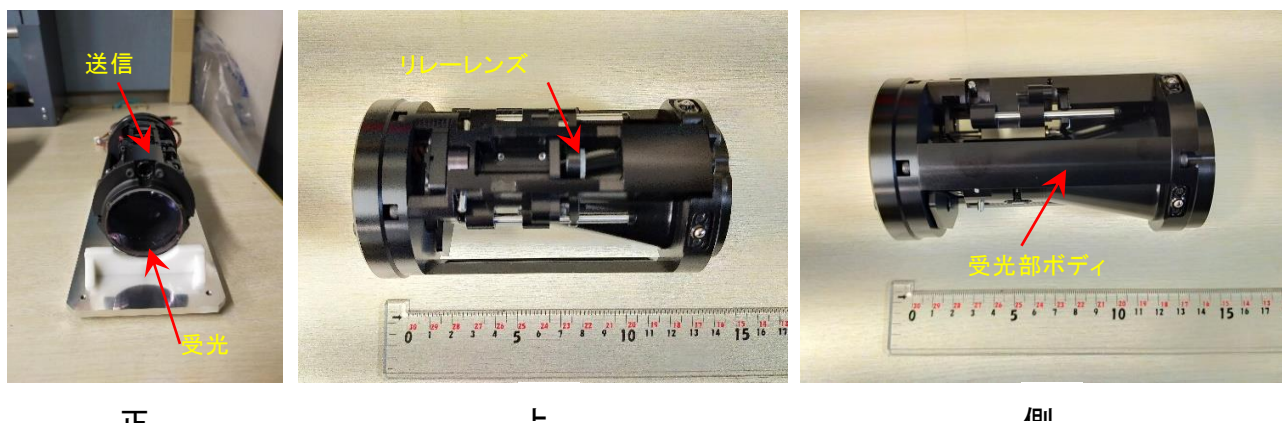


図2-2-12

ワット級LDのビームプロファイルは縦がトップハット（平坦分布）横はガウシアン分布（図2-2-11）になっている。シリンドリカルレンズを用いて出来るだけ $1/e^2$ において強度が等しく成る様にする。シリンドリカルレンズ後の強度分布を図2-2-12に示

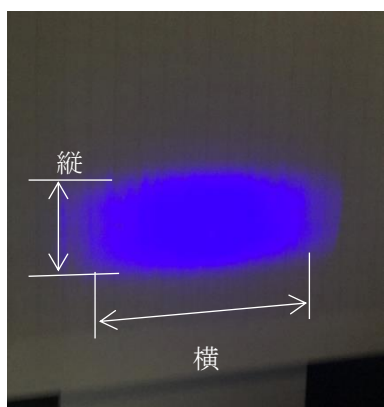


図2-2-13

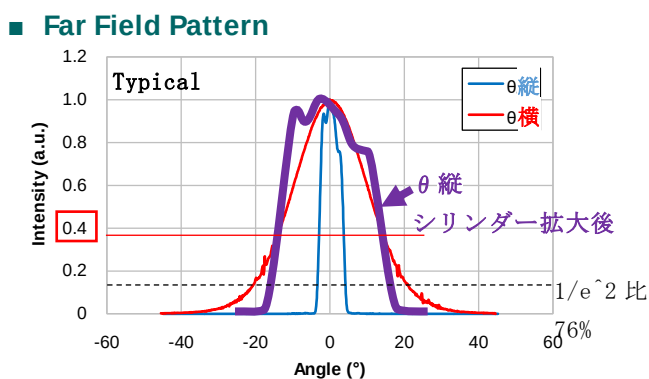


図2-2-14

す。

実測においては $1/e^2$ では横に対して76%になっている。

次に副耐圧容器サンプルをお借りして原理試作機を副耐圧容器に収納し、原理試作機の各熱源a) LD近傍、b) SPAD近傍、c) リニアモータ近傍に熱電対をセットし、副耐圧容器内側及び原理試作機後端にも熱電対をセットした。温度観測ポイントは全部で5カ所となっている。

原理試作機が収納された副耐圧容器を恒温槽内に設置し、25℃で凡そ4時間弱全てを動作させた状態で温度変化を観測した。図2-2-15に恒温槽設置状態を図2-2-16に測定結果を示す。

副耐圧容器内温度は50℃と想定した。

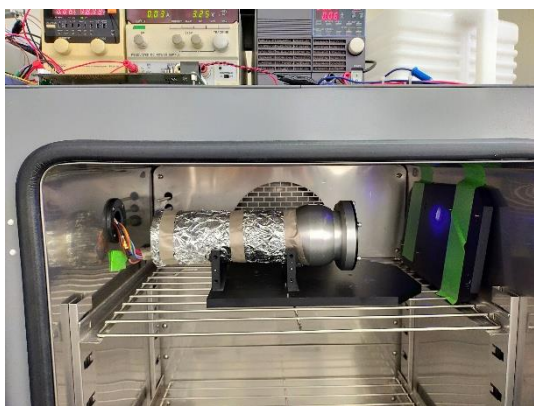


図2-2-15

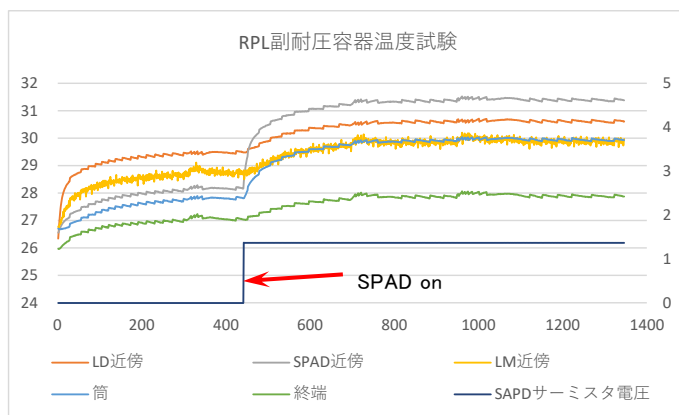


図2-2-16

測定開始から凡そ1時間10分まではSPADは動作させない状態では緩やかに温度上昇をしているが、その後SPADを動作させると全体的に急に上昇する。4時間弱の終了時点ではほぼ平衡状態になっていて最も温度が高いのはSPAD近傍の31.5℃である。これはSPADを-30℃に冷却するためのペルチェによるものと考えられる。当初想定した50℃までの温度上昇は無いものと考えられる。

原理試作機での調整方法の確立及び組立方法の検討により実機16台は無事完成した。

③－１．精追尾および粗追尾の協調アルゴリズムならびに制御ソフトウェアの研究開発

③－１－１．研究開発の概要と主要成果

本研究項目は、精追尾システムと粗追尾システム間のシームレスな連携を実現するための協調アルゴリズムおよび制御ソフトウェアの開発に焦点を当てた。その目標は、水中航走体が移動中であつたり、外乱を受けていたりする状況下でも、頑健かつ継続的な光軸整合を可能にすることであつた。

本研究開発における主要な成果は以下の通りである。

1. 精追尾機能（光学ユニット内のミラーおよびジンバル制御）と粗追尾機能（RPL情報に基づく水中航走体本体の姿勢制御）を効果的に協調動作させるアルゴリズムを開発した。このアルゴリズムにより、精追尾システムの動作範囲の限界を粗追尾システムが補償し、広範囲かつ高精度な光軸維持を可能とする統合的な枠組みを構築した。
2. 精追尾制御ソフトウェアのインタフェース仕様を策定し、光学ユニットのミラー角度をリアルタイムで監視し、ミラーの角度が限界に達した際にはジンバルを用いてニュートラル位置へ補正する制御を実現した。
3. 粗追尾制御ソフトウェアのインタフェース仕様を策定し、RPLシステムによる解析結果に基づいて水中航走体のスラストへ適切な制御指令を発行する機能を実装した。
4. 精追尾と粗追尾の複雑な協調動作を机上で検証するための「シナリオ再現エミュレータ」を開発した。このエミュレータは、水中航走体の動特性や各種センサの応答を模擬することにより、統合制御ロジックの評価とデバッグを効率的に行うことを可能にした。

これらの成果を通じて、移動する水中航走体間での安定した光通信リンク確立に不可欠となる、精追尾と粗追尾の連携制御システムの基盤を確立した。

本プロジェクトは、精追尾光学系、ジンバル機構、RPLシステム、水中航走体スラスト制御系といった複数の複雑なサブシステムから構成されており、これらの開発は研究実施機関3社が連携・協調して行っている。このような分散開発環境において、明確に定義され、頑健で、かつ十分に文書化されたインタフェースは、システム統合を成功させるための絶対的な前提条件となる。本セクションで詳述されているミラー角度受信プロトコル（表3-1-1）、ジンバル制御プロトコル（表3-1-2、表3-1-3）、スラスト制御プロトコル（表3-1-4）などのインタフェース仕様の策定は、それ自体が重要な技術的達成である。これらの明確なインタフェース定義は、各サブシステムの独立した開発と試験を可能にし、統合時の信頼性の高い通信を保証し、データ提供とコマンド実行に関する責任範囲を明確化することで、システム全体の協調動作を実現する。この協調アルゴリズムは、これらのインタフェースなしには確実に実装できなかったものである。従つて、これらのインタフェース仕様の開発は、協調追尾戦略全体を実現するための鍵となる要素である。さらに、「シナリオ再現エミュレータ」（③-1-4）は、これらの定義済インタフェースを活用することで、模擬環境における統合試験を可能にし、開発の効率と信頼性を一層高めている。

③－１－２．精追尾・粗追尾協調アルゴリズム

精追尾・粗追尾協調アルゴリズムは、異なる特性を持つ二つの追尾システムを連携させることで、全体として高性能な光軸追尾を実現する。精追尾は高い精度を提供する一方でその追尾可能な角度範囲は限定的であり、対照的に粗追尾は広範囲な角度に対応できるものの精度は相対的に低い。水中航走体の大きな動きや外部からの擾乱によって精追尾システムがその動作限界に達する可能性があるため、両者の協調が不可欠となる。

協調メカニズムは以下のように動作する（図3-1-1～図3-1-5 参照）。この連続的な相互作用により、システムは高い応答性と広い追尾範囲の両立を達成する。この協調戦略の主要な利点は、高精度な精追尾機構が常にその最適な動作範囲内で運用されることを保証しつつ、より大きな偏差は粗追尾機構が処理することで、全体として頑健かつ機敏な追尾能力を実現することにある。

1. 位置ずれの発生

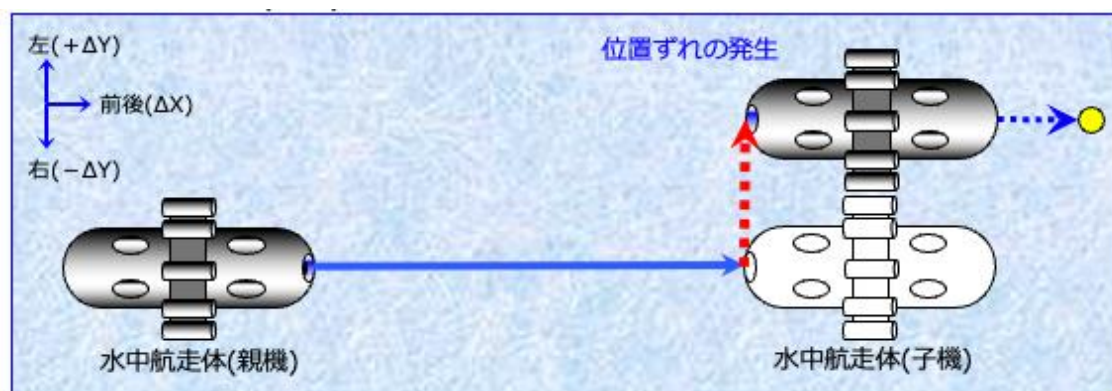


図3-1-1 位置ずれ発生

2. 位置ずれの補正

2-1. 精追尾の補正動作

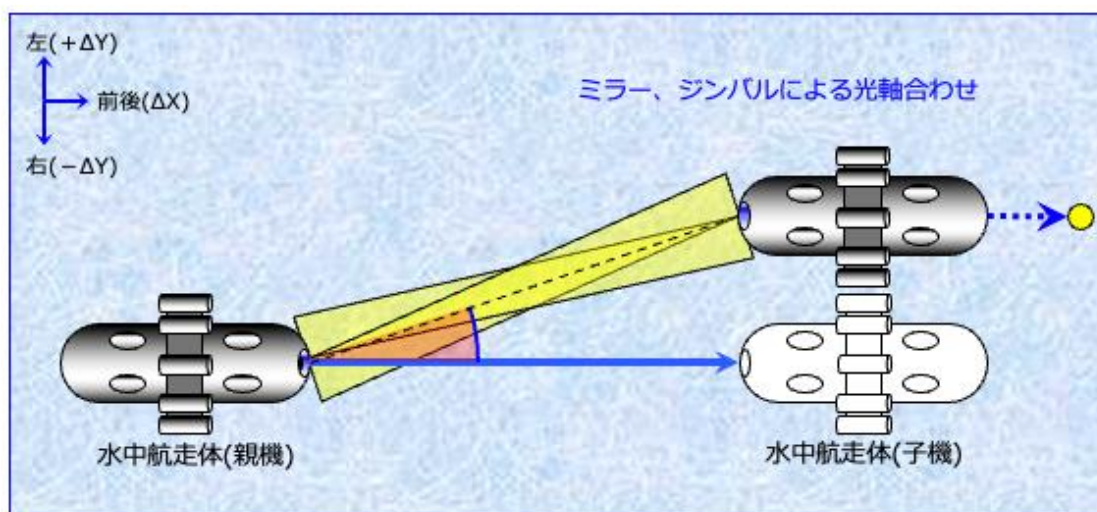


図3-1-2 精追尾の補正動作

2-2. 粗追尾の補正動作

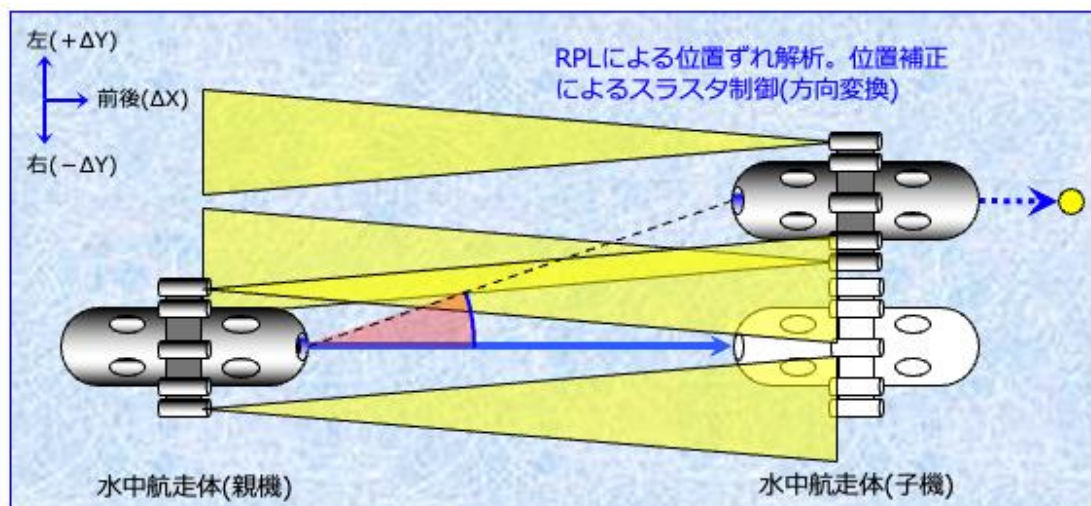


図3-1-3 粗追尾の補正動作

3. 精追尾および粗追尾の協調

3-1. 精追尾の補正

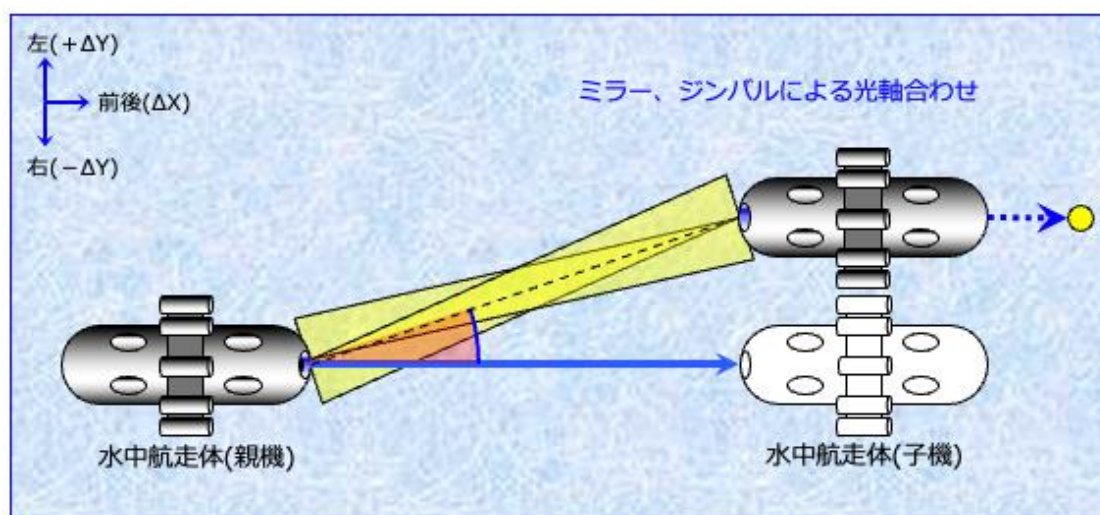


図3-1-4 精追尾の補正動作

3-2. 粗追尾の補正による協調動作

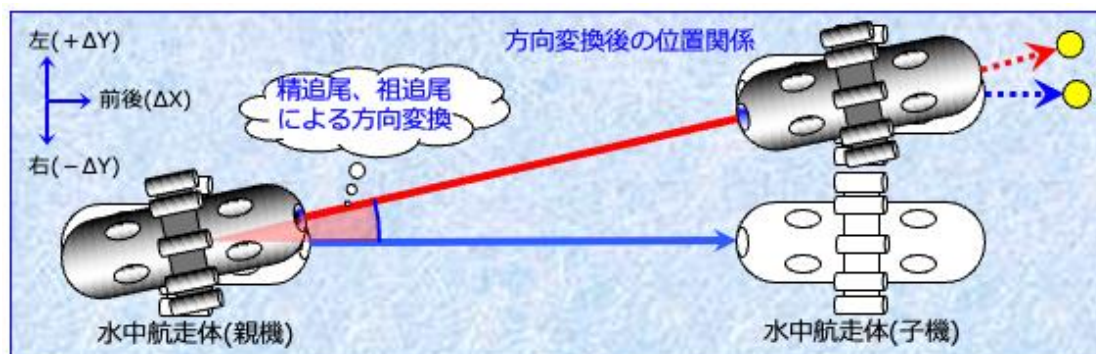


図3-1-5 粗追尾の補正による協調動作

③－１－３．協調制御ソフトウェアの設計

協調制御ソフトウェアは、精追尾、粗追尾、およびそれらの連携を管理するコンポーネントから構成され、明確に定義されたインタフェースを介して通信する分散型アーキテクチャを採用している。

1. 精追尾制御ソフトウェア

精追尾制御ソフトウェアは、光学ユニット内の高速ミラーおよびジンバルを制御し、微細な光軸調整を担当する。

1-1. ミラー角度の監視：光学ユニットから、表3-1-1 に定義されたインタフェースを介してミラー角度データを連続的に受信する。これにより、システムは精追尾ポインティングメカニズムの現在状態を常に把握する。

2-1. ジンバル制御：主な目的は「ニュートラル補正」であり、ミラーが角度限界に近づいた場合に、それを内包するジンバルを調整してミラーを中央位置に戻すことである。制御フロー（図3-1-6）に従い、ミラー角度が閾値を超えるとジンバル制御コマンドが発行される。具体的なコマンド（位置決め、原点復帰、状態取得など）およびメッセージフォーマットは、表3-1-2および表3-1-3 に規定されている。

表3-1-1 ミラー角度受信I/Fプロトコル

Port	S/R	header	seqno	data			
	受信			rsi	array	mirror	
20030	1ms	1			X Y	X Y	

No	Name	Type	Mean	Value	Discription
	header	int	通信ヘッダー	1	
	seqno	int	シーケンスNo	0～4095	12Bitカウンタで約4秒
1	rsi	int	信号強度	0～4095	
2	array	X int	受光位置 X座標	-256～255	SPAD Array 座標 有効値(8bit)：-256～255
3		Y int	受光位置 Y座標	-256～255	
4	mirror	X int	X軸角度	-8192～8191	有効値(14bit)：0～16383 角度の単位：22μrad 0.00396000000000982285deg
5		Y int	Y軸角度	-8192～8191	
			角度の有効値 14bit	-8192～8191	-32.4403200000804687872～ 32.43636000008045896435

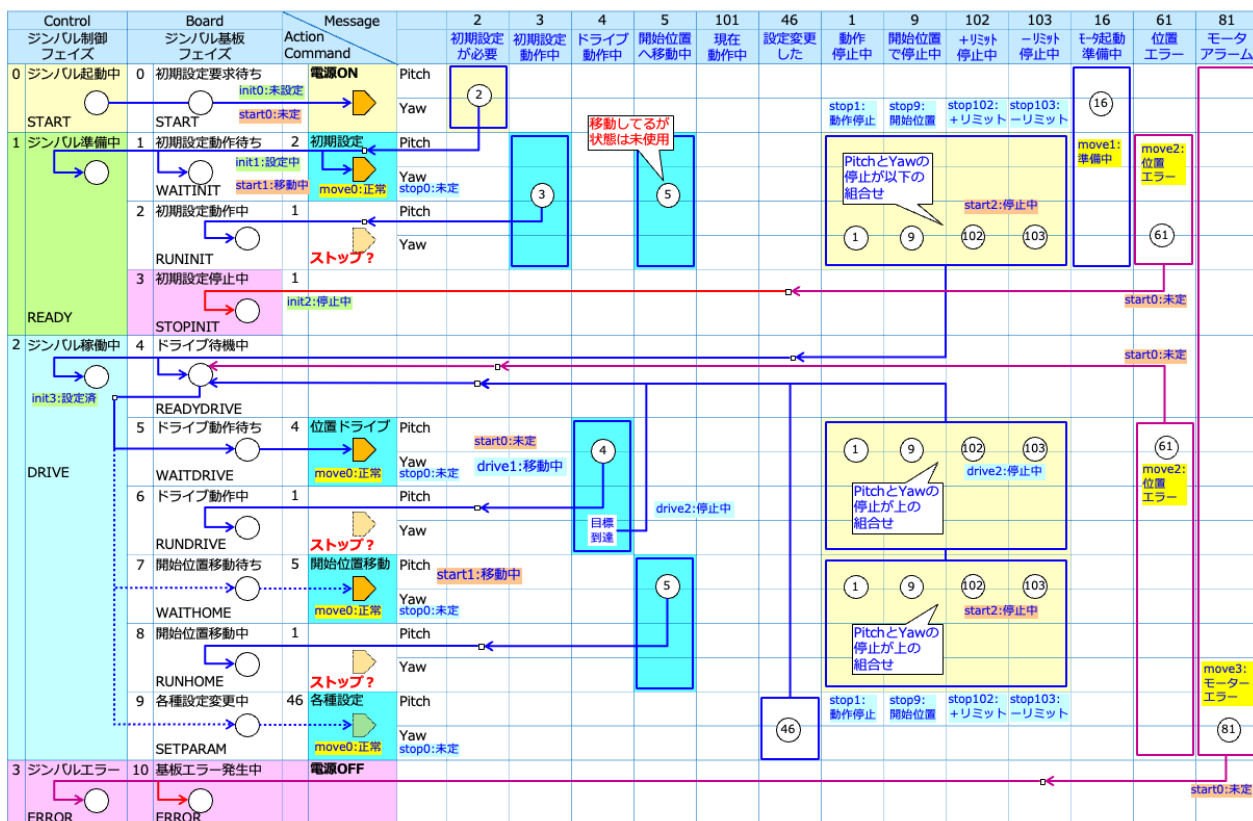


図3-1-6 ジンバル制御フロー

表3-1-2 ジンバル制御I/Fプロトコル

番号	Name	内容	コマンド		データ1		データ2		速度	Discription
			pitch	yaw	pitch	yaw	pitch	yaw		
			3	4	5-8	9-12	13-16	17-20	21	
0	nop	ノーオペ	0	0	0	0	0	0	0	
1	stop	ストップ	1	1	0	0	0	0	0	
2	init	初期設定 ※開始位置も 同時指定可	2	0	開始 ±500	開始 ±500	角度 limit 1~50	角度 limit 1~50	速度 limit 1~100	開始:0.01deg 角度:0.1deg 速度:%
4	drive	位置ドライブ	4	4	±500	±500	0	0	1~100	角度:0.01deg 速度:%
5	return	開始位置へ 移動	5	0	0	0	0	0	1~100	速度:%
21	realtime start	リアルタイム ドライブ開始	21	0	0	0	0	0	0	使用しない。
22	realtime data	リアルタイム データ送信	22	0	±3000	±3000	0	0	0	相対角度 0.001deg x1000
23	realtime end	リアルタイム ドライブ終了	23	0	0	0	0	0	0	
46	setup	各種設定	46	0	0	0	角度 limit 1~50	角度 limit 1~50	速度 limit 1~100	角度:0.1deg 速度:%

表3-1-3 ジンバル制御メッセージフォーマット

番号	Name	内容	メッセージ		角度		Discription
			pitch	yaw	pitch	yaw	
			3	4	5-8	9-12	
0	clear	メッセージクリア	0	0	0	0	角度未確認
1	stop	停止中	1	1	0	0	角度未確認
2	need init	初期設定が必要	2	2	0	0	
3	run init	初期設定中	3	3	0	0	
4	run drive	位置ドライブ中	4	4	±500	±500	
5	run home	開始位置へ移動中	5	5	±500	±500	角度未確認
9	stop home	開始位置で停止中	9	9	0	0	
16	boot motor	モータ起動準備中	16	16	0	0	※電源投入直後に安定を待つ。2~3秒
22	realtime	リアルタイム中	22	22	±500	±500	使用しない。
46	change	設定変更した	46	46	0	0	角度未確認
61	data error	位置データのエラー	61	61	0	0	角度未確認
81	motor alarm	モータアラーム	81	81	0	0	電源OFF要求
101	moving	現在動作中	101	101	±500	±500	※移動中に送ったコマンドの応答
102	stop plus	+リミット停止中	102	102	500	500	
103	stop minus	-リミット停止中	103	103	-500	-500	

2. 粗追尾制御ソフトウェア

粗追尾制御ソフトウェアは、RPLシステムからの情報に基づいて水中航走体全体の姿勢を制御し、大まかな光軸合わせを行う。

2-1. RPL受光パターン解析に基づく制御：②－1で詳述したRPLシステムが、対向する水中航走体の方向に関するデータを提供する。本ソフトウェアコンポーネントは、この方向情報をスラストへの具体的なコマンドへと変換する。

2-2. スラスト制御：水中航走体（親機または子機）の向きを変更し、粗大な位置ずれを補正する。表3-1-4に示されるインタフェースプロトコルを介して、水中航走体の制御PCへコマンドが送信される。これには、光トラッキングにおける軸合わせに重要なY軸移動（スウェイ）、Z軸移動（ヒープ）、およびZ軸回転（ヨー）の指令が含まれる。水中航走体の制御パラメータ（目標速度、旋回率など）は、表3-1-5（親機）および表3-1-6（子機）、ならびに関連する図3-1-7、図3-1-8に示される。

これらの個別のソフトウェアモジュールとそれらのインタフェースの成功裡な設計および仕様策定は、開発された協調制御システムの中核を成し、モジュール性とシステム運用における明確な責任分担を可能にした点で、重要な達成と言える。

表3-1-4 水中航走体 制御PCへのスラスト制御コマンド

Port	S/R	header	data							sum	delimiter
	送信	\$OPTCMD	u	y	z	yow	x	roll	pitch	*XX	¥r¥n
20025			±Δ	±Δ	±Δ	±Δ	±Δ	±Δ	±Δ		

No	Name	Type	小数	Mean	Value		Discription
	header			通信ヘッダー			"\$OPTCMD"
1	u	double	3	前後移動速度	0～±5.00	m/s	前後移動速度を増(+)減(-)する
2	y	double	3	スウェイ(Y軸)移動	0～±1.00	m	左(+)右(-)に移動する
3	z	double	3	ヒープ(Z軸)移動	0～±1.00	m	上(+)下(-)に移動する
4	yow	double	3	ヨー(Z軸)回転	0～±180	deg	右回りが(+) 左回りが(-)に回転
5	x	double	3	サージ(X軸)移動	0～±1.00	m	前(+)後(-)に移動する
6	roll	double	3	ロール(X軸)回転	0～±180	deg	右傾斜が(+) 左傾斜が(-)に回転
7	pitch	double	3	ピッチ(Y軸)回転	0～±180	deg	機首上げ(+) 機首下げ(-)に回転

表3-1-5 水中航走体親機制御パラメータ

水中航走体【親機】の制御	
u	水中航走体本体の前後移動の速度 1ノットは約0.5m/s。
y	水中航走体本体を左右に動かす
z	水中航走体本体を上下する
yow	水中航走体本体を左右に回転する
X	水中航走体本体を前後に動かす 基本、親機は動かさない
roll	水中航走体本体を左右に傾斜する 基本、使う目的がない
pitch	水中航走体本体の機首を上げ下げする

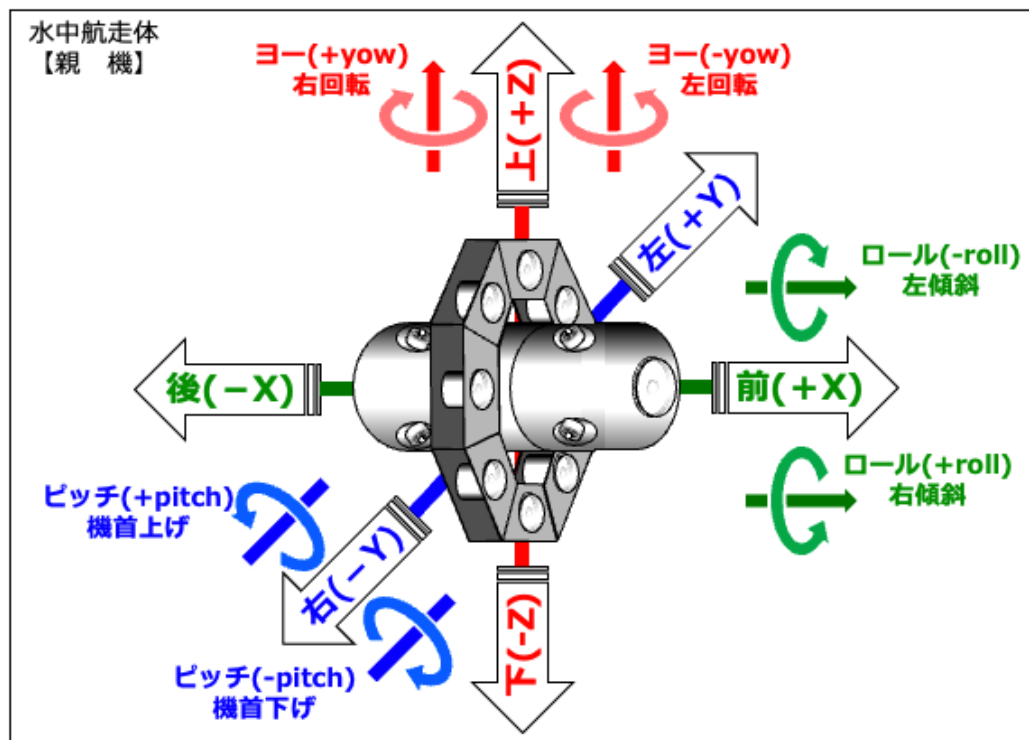


図3-1-7 水中航走体親機

表3-1-6 水中航走体子機制御パラメータ

水中航走体【子機】の制御	
親機と同じ制御 1ノットで300mの移動時間は10分	u
左右の移動方向は親機と逆になる	y
親機と同じ制御	z
左右の回転方向は親機と逆になる	yaw
親機と同じ制御 子機の移動は主に後退(-)のみ 傾斜する方向は親機と逆になる	x
	roll
機首が逆向きなので姿勢は親機の逆	pitch

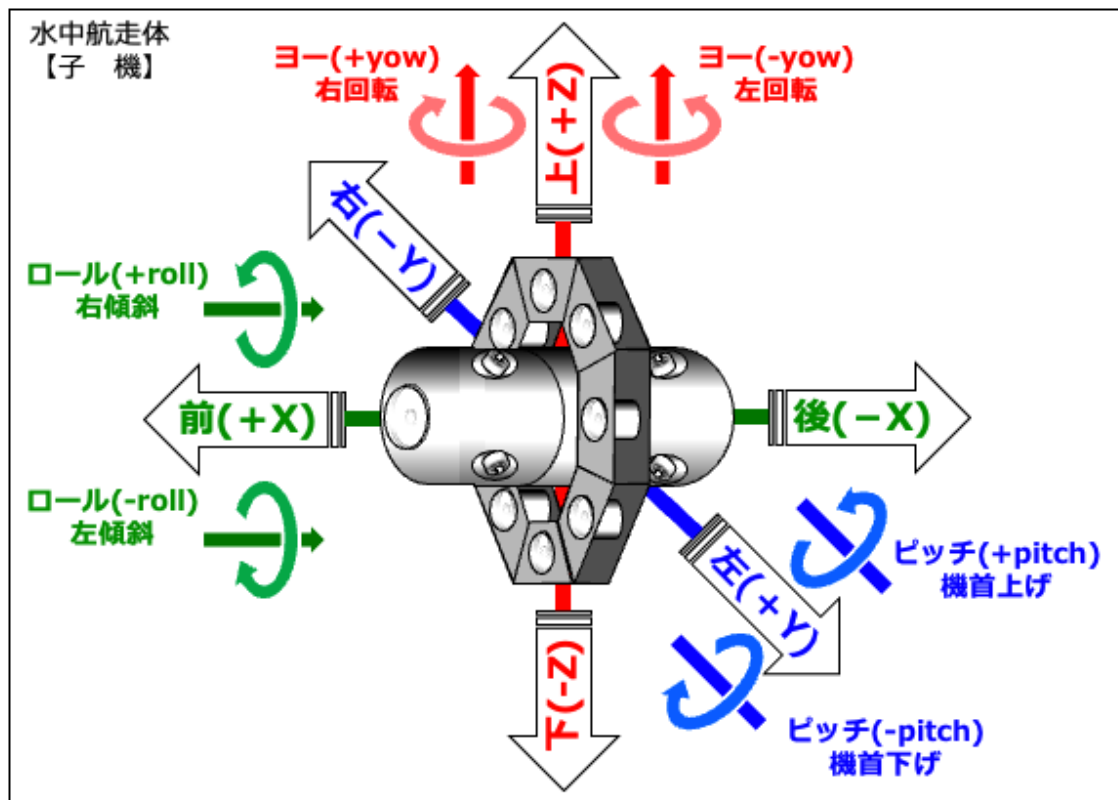


図3-1-8 水中航走体子機

③-1-4. シナリオ再現エミュレータ

精追尾、粗追尾、および水中航走体制御ソフトウェア間の複雑な相互作用を、実際の水中航走体への統合前にデスクトップ環境で検証しデバッグするために、シナリオ再現エミュレータが開発された。これは、協調アルゴリズムの妥当性を確認する上で極めて重要である。

エミュレータのアーキテクチャ（図3-1-9）は、水中航走体エミュレータ、光学ユニットエミュレータ、ジンバルエミュレータ、RPLエミュレータといった主要コンポーネントの模擬動作を可能にし、これらが実際の制御プログラムおよびシナリオコントローラと連携する。このエミュレータ（図3-1-10）を用いることで、水中航走体の移動や各種追尾コンポーネントの応答を含む様々なシナリオをシミュレーションし、協調制御ロジックの有効性を試験することができる。

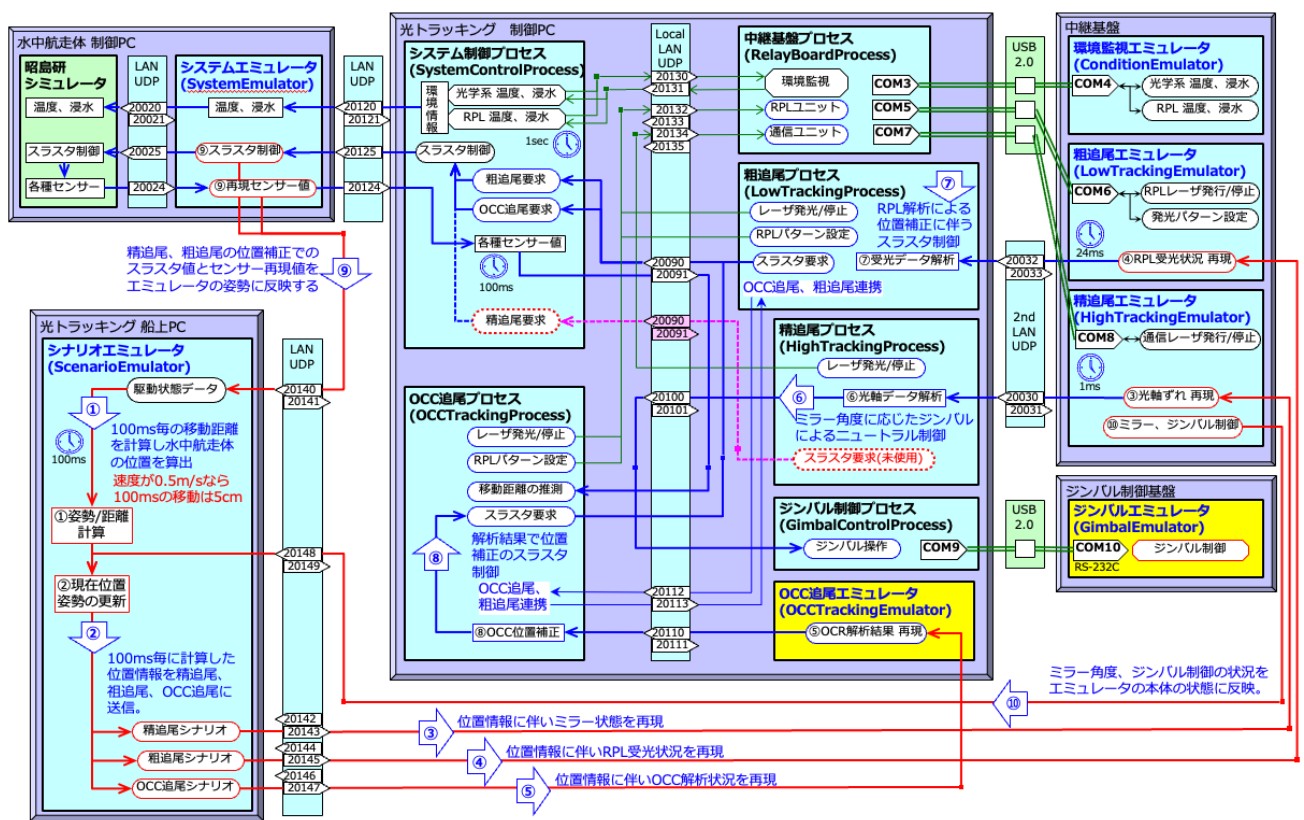


図3-1-9 シナリオ再現エミュレータプロセス構成

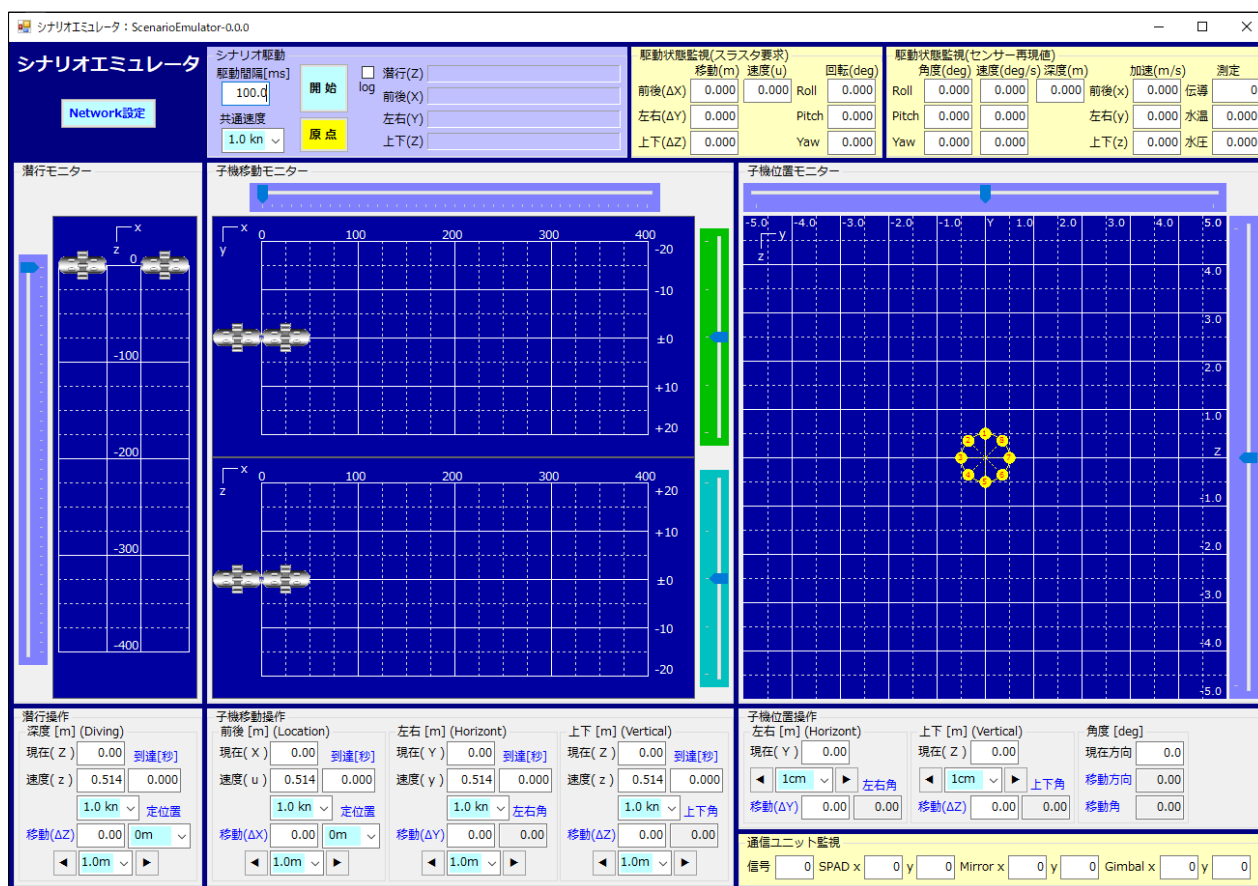


図3-1-10 シナリオ再現エミュレータソフト画面

本エミュレータの開発は、協調制御ソフトウェアの開発、試験、および改良を効率的に推進する上で鍵となる成果である。開発者は、様々な模擬ミッションシナリオ下でのシステム挙動を観察・分析することにより、初期開発段階における高価で複雑な物理試験への依存を低減することが可能となった。

③－２．OCC 用画像解析アルゴリズムの開発および信号変復調ソフトウェアの開発
前節③-1では、OCCシステムの基本構成の構築とその実証実験について述べた。これを踏まえ、本節③-2では、OCC用画像解析アルゴリズムおよび信号変復調ソフトウェアの開発について詳述する。

③－２－１ 概要

本研究項目では、長距離トラッキング用の精追尾・粗追尾システムを補完し、特にフォトンカウンティングによるRPLを動作させるには光強度が強すぎる数mから数十m程度の極近距離における水中航走体同士の初期位置合わせおよび通信を実現するため、Optical Camera Communication (OCC) とカメラベースのトラッキング技術を組み合わせたシステムの開発を行った。具体的には、一方の水中航走体に搭載されたリングパルスレーザ（RPL）装置の特定ユニットまたは専用の可視光LEDを光源として利用し、他方の水中航走体に搭載されたカメラでこれを撮像・解析することで、相対位置の推定と低速データ通信を行うための画像解析アルゴリズムおよび信号変復調ソフトウェアの開発を目標とした。

③－２－２ OCC用画像解析アルゴリズムの開発

OCC はカメラの撮像素子で捉えた点光源の明滅から信号を取り出す技術であり、伝送速度は極めて低い(数10～数kbps)、点光源が撮像素子のどのピクセルに写っているか画像認識することで水中航走体同士が正対するように位置合わせを行うことが可能である。本研究では、極近距離におけるロバストな光源検出と高精度な相対位置推定を実現するため、以下の画像解析アルゴリズムの開発および検証を行った。

1. 光源検出アルゴリズム: 水中という散乱・減衰の大きい環境下でも、微弱な光源や背景ノイズの中から確実に光源 (RPLの特定ユニットまたはOCC用LED) を検出するため、輝度閾値処理、ノイズ除去フィルタリング、およびラベリング処理を組み合わせたアルゴリズムを検討した。セクション⑥－２－１で詳述する実験水槽でのレーザ光撮影検証 (図6-2-1～図6-2-4参照) では、この基本的なアプローチにより、汎用Webカメラで最大20m、産業用カメラでは最大35m先のレーザ光点を安定して視認・検出できることを確認した。
2. 光源位置推定アルゴリズム: 検出された光源の画像内座標から相手水中航走体の相対的な方位角および俯仰角を高精度に推定するため、以下の手法を開発・評価した。
 - ・単一光源利用時: 検出された光源の画像中心からの変位量に基づき、カメラの画角とレンズパラメータを考慮して相対角度を算出する。
 - ・RPLユニットの一部 (二光点など) 利用時: RPL装置の既知の幾何学的配置を利用し、カメラ画像内で検出された複数の光点 (例: RPLの特定の2ユニットを発光させた場合の二光点) の相対位置関係と画像内座標から、より高精度に相手航走体の3次元的な相対位置・姿勢を高精度に推定するアルゴリズムを検討した。⑥－２－１の実験では、散乱光を含むレーザ光の軌跡から光源位置を推定する手法 (バウンディングボックス分割と最大輝度領域判定) の有効性も確認されており (図6-2-6参照)、これを応用することで、単なる点光源としてだけでなく、光源周辺の光学的特徴を利用した位置推定の可能性も探求した。

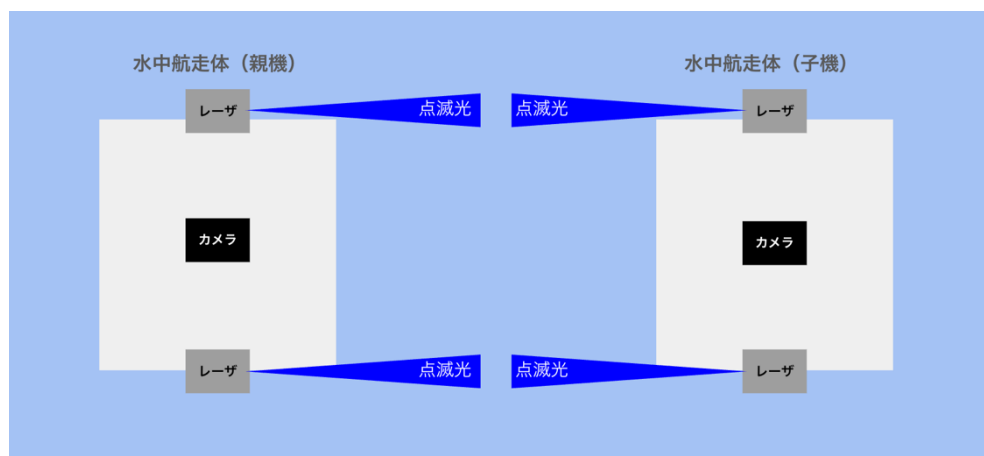


図3-2-2 OCC構成

本研究では、水中航走体に搭載したリングパルスレーザのうち対角線上に配置した二つの発光部のみを30Hzで点滅させ、対向の水中航走体のカメラ映像から得られる光パターンを用いてOCC通信を行う。各フレームに対して大津の二値化を適用し、輝度の高い連結成分を光源候補として抽出するような一般的な方法を採用するが、太陽光などの外乱光も同時に検出される可能性が高い。そこで、抽出された光源ごとにユニークな追跡IDを割り当て、連続フレーム間で重心座標のユークリッド距離を最小化する対応付けによってIDを維持しつつ、各IDに対して一定フレーム分の輝度時系列（信号履歴）を保存する。保存された履歴に機体IDとデリミタの信号が定義どおりに出現しているかを検証し、仕様どおりの点滅パターンを示さない光源を通信対象から除外することで、外乱光の影響を排除する。さらに、複数の光源が同一信号を発していると判断された場合は、最も信号SNRが高いIDを残し、他を抑制する重複除去機構を設けて誤判定を低減する。この一連の処理により、外乱光を含む複雑な環境下でも、リングパルスレーザ由来の通信信号のみを高信頼で検出・追跡できることが期待される。

さらに、OCCは通信機能に加えて初期位置合わせのトラッキング制御にも利用する。具体的には、カメラ画角中心と相手機体中心とのピクセル偏差を比例（P）、積分（I）、微分（D）の各成分で演算するPID制御則に基づき、必要な回転角を算出する。ここで相手機体中心とは、画像処理で抽出した二つのレーザ発光点の中点座標と定義する。偏差が大きい場合には出力回転角も大きく、偏差が小さい場合には回転角が抑えられるため、過不足なくスムーズな追尾が可能となる。算出された回転角情報は即座に水中航走体の制御系へ送信され、スラスタ制御に反映することで、画角中心と相手機体中心が一致するように機体姿勢が自律的に補正される。

これらの画像解析アルゴリズムは、実験水槽での基礎データ取得を通じてその有効性が確認され、OCCトラッキングシステムの実現に向けた基盤技術となった。

③-2-3. 信号変復調ソフトウェアおよび通信プロトコルの開発

OCCを用いた初期位置合わせ時の情報交換（例：機体IDの交換、RPL追尾への移行指示など）を実現するため、以下の信号変復調ソフトウェアコンポーネントおよび通信プロトコルの設計・開発を行った。

1. 信号変調方式の検討：カメラのフレームレートや画像処理能力を考慮し、光源の点滅パターン（On-Off Keying: OOKベース）による低速ながらも確実なデータ伝送方式を基本とした。光源の点灯時間、消灯時間、輝度レベルなどをパラメータとして変調を行う。
2. 信号復調ソフトウェアの開発：カメラで連続的に取得される画像フレームから、光源領域の輝度変化を時系列で解析し、点滅パターンを抽出してデジタルデータに復調するソフトウェアモジュールの基本設計を行った。画像処理による光源検出の安定性が復調性能に直結するため、前述の画像解析アルゴリズムとの連携を重視した。
3. OCC通信プロトコルおよびパケットフォーマットの設計：初期位置合わせシーケンスに必要な情報交換のための通信仕様を設計した。これには、通信の開始・終了を示すヘッダ・デリミタ、機体識別情報、制御コマンド（PING、RPL粗追尾開始指示、OCC停止指示など）、および簡易なエラー検出機能が含まれる。これらの情報は、表3-2-3に示すOCC通信仕様として定義された。リングパルスレーザ（送信機）は初期位置合わせの際、本仕様に従って点滅を行う。送受信パケットは「ヘッダー機体

ID—制御コマンド—受光レベル—パリティ符号—デリミタ」で構成され、機体IDからパリティ符号までの各ビットは誤り耐性を高めるため冗長化する。具体的には、ビット0を00、ビット1を11に展開し、たとえば0101は00110011に変換される。デリミタは冗長化ストリーム中に出現し得ない固有の4bitパターンとなり、受信側はストリームを確実に解析できる。以上の構成により、外乱光や単一ビット誤りが存在しても安定したパケット認識が可能となり、水中航走体間におけるOCC通信を確保できる。

No	データ	ビット数	データ範囲
1	ヘッダ	3	110固定
2	機体ID	6※	0～7
3	制御コマンド	8※	0001:PING 1011:RPL粗追尾開始 0110:OCC停止
4	受光レベル	6※	0～7
5	パリティ符号	2※	0～1
6	デリミタ	4	1010固定

※冗長化あり

表3-2-3 OCC通信仕様

4. OCCからRPLへの切り替えシーケンス制御ソフトウェアの開発:OCCによる初期位置合わせが完了した後、より長距離に対応可能なRPL粗追尾システムへスムーズに移行するための制御シーケンス（図3-2-3参照）を定義し、これを実行するためのソフトウェアロジックを開発した。このシーケンスには、PINGパケットによる相互確認（STARTフェーズ）、カメラ画像からの二光点追尾とスラスト制御による離隔（TRACKフェーズ）、RPL粗追尾開始コマンド送信と発光パターン切り替え（CHANGEフェーズ）、RPL受光量確認（CHECKフェーズ）、そしてOCC制御停止（STOPフェーズ）が含まれる。この一連の動作を管理する状態遷移型のソフトウェアモジュールとして設計した。

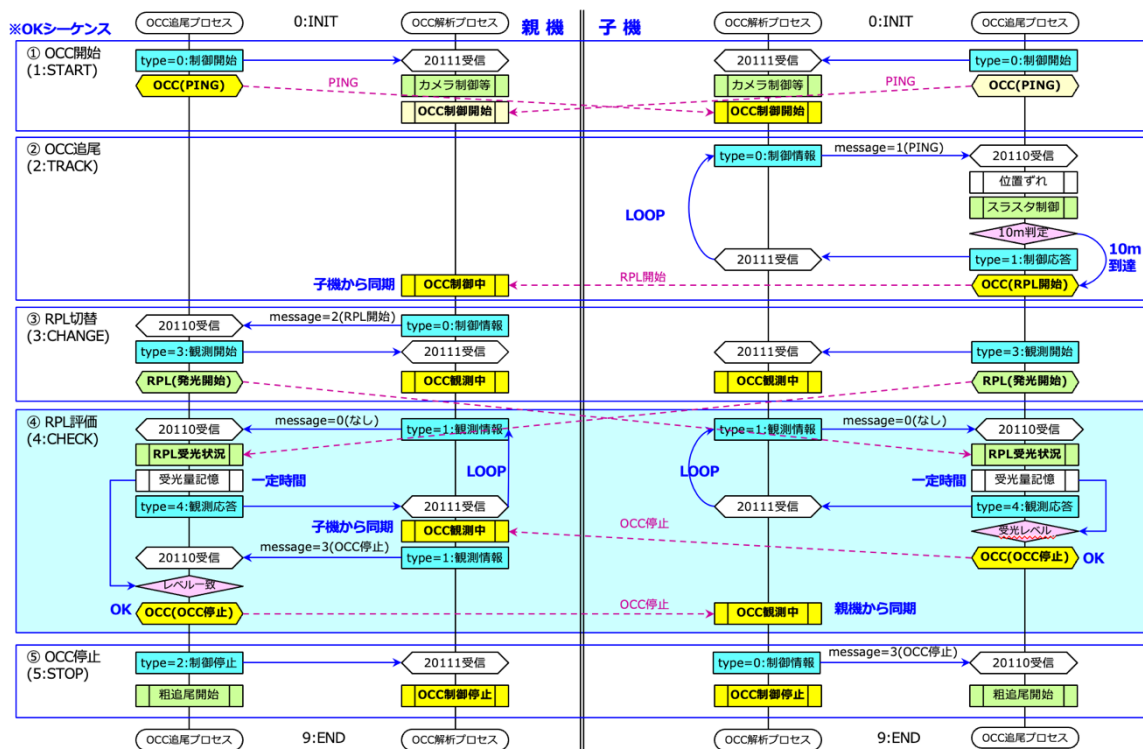


図3-2-3 OCC位置合わせ→RPL粗追尾への切り替えシーケンス

OCC による初期位置合わせからリングパルスレーザ（RPL）粗追尾への移行は、前述の通りSTART・TRACK・CHANGE・CHECK・STOPの五段階で構成される。まず STARTフェーズでは、お互いの水中航走体が OCCによりPING packetsを相互送信し、通信リンクの状態を確認すると同時に、水中航走体が正対していることを検証する。続くTRACKフェーズでは、各機の画像解析アルゴリズムがカメラ映像からリングパルスレーザの二光点を抽出し、その中点と画角中心との偏差をPID制御の入力として算出されたスラスタ回転角により向き合った姿勢を維持したまま子機は後進し距離を離していく。子機側の慣性航法センサが移動量10mを検知すると、子機はOCC経由で「RPL 粗追尾開始」を示す制御コマンドを親機へ送信し、両機の発光パターンをOCC仕様からRPL仕様へ切り替える。このCHANGEフェーズによりRPL粗追尾が起動する。

CHECKフェーズでは、両機のRPL受信機が検出した受光量（フォトン数）を記録し、OCCで互いに記録した情報を通信する。両機とも受光量があらかじめ設定した閾値を超えた場合、光軸整合が成立したと判定し、RPL粗追尾が成功したと判定する。RPL粗追尾が確立した時点でOCCによる通信および位置合わせは不要となるため、両機はOCC制御を停止し、以降は RPLによる粗追尾へ完全移行する。

④－１．実海域における海水の光吸収・散乱係数および外乱調査

【目的】

粗追尾および精追尾技術開発のための海水の光吸収・散乱係数および外乱調査を実施し、また水中航走体を用いた光トラッキング試験の実施に向けて、試験に適した海域および時期に関する情報を収集する。

【調査方法】

１．RINKOプロファイラによる深度、水温、電気伝導度、塩分濃度、クロロフィル濃度、濁度、溶存酸素濃度の計測

プロファイラを釣り竿のラインに取り付けて海中に投入し、釣り竿の電動リールを用いてラインを巻き出しおよび巻取ること、下降および上昇中に連続的に深度、水温、電気伝導度、塩分濃度、クロロフィル濃度、濁度、溶存酸素濃度を計測する。プロファイラは全長50cm、直径15cm、空中重量2kg、水中重量1kg で、電池で駆動し約1秒間隔で内蔵メモリにデータを記録する。

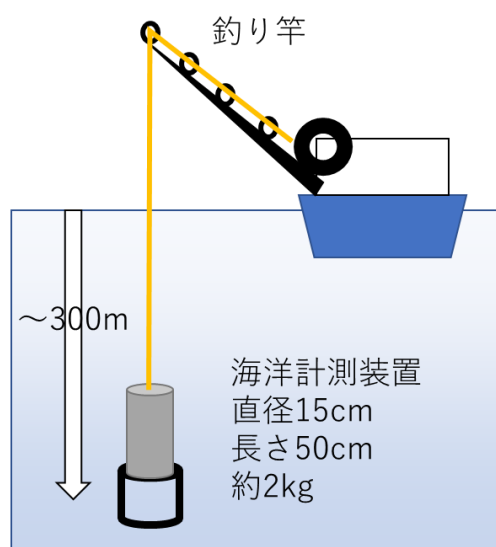


図4-1-1 実験模式図

リール：シマノ製電動リールBeastMaster9000(最大巻き上げ力25kgf)

ライン：PE 製12 号長さ400m (破断強度78.5kgf)



図4-1-2 RINKO プロファイラ

空中重量：2kg

最大使用深度：1000m

計測項目：深度、水温、電気伝導度、塩分濃度、クロロフィル濃度、濁度、溶存酸素濃度

2. 海域基礎データ取得装置による深度、水温、透過及び反射強度の計測

取得装置を船舶搭載のAフレームとウインチによって海中に下ろし、下降および上昇中に連続的に深度、水温、光波長毎の透過および反射強度を計測する。取得装置は全長約1.5m、幅および高さ約0.4m、空中重量約50kg、水中重量約35kgである。電池で駆動し、スタンドアロンにてあらかじめ設定した計測パターンにてデータを取得し、内蔵ハードディスクに記録する。

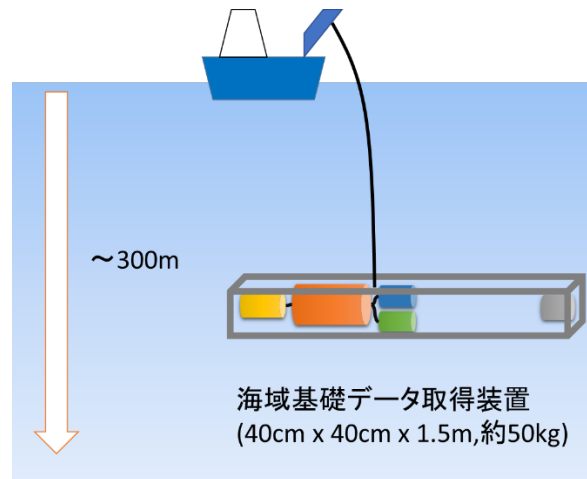
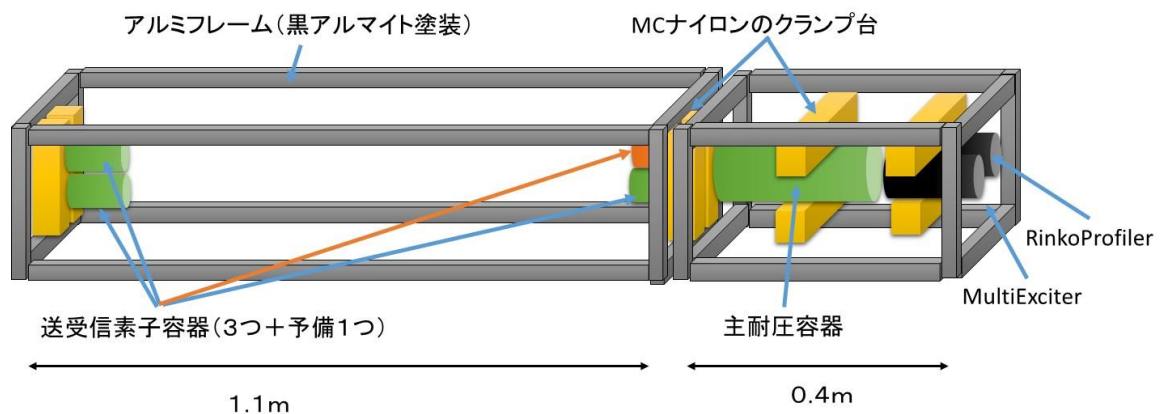


図4-1-3 実験模式図



- ・二つの立方体フレームを連結(将来的な分離利用のため)
- ・フレームはアングル材
- ・スリングで吊り上げ、吊点は重心に合わせて変更可能

図4-1-4 海域基礎データ取得装置概略

【調査実施海域】

- ・静岡県下田沖合 (図4-1-5 ①)

水深：～300m

A: (34° 42' N 139° 01' E)、B: (34° 37' N 139° 01' E)、

C: (34° 37' N 138° 53' E)、D: (34° 42' N 138° 53' E)

の各点を順に結んだ範囲(陸域除く)

- 東京都大島沖合（図4-1-5 ②）
水深：～300m
E: ($34^{\circ} 44' N$ $139^{\circ} 24' E$)、F: ($34^{\circ} 38' N$ $139^{\circ} 24' E$)、
G: ($34^{\circ} 38' N$ $139^{\circ} 20' E$)、H: ($34^{\circ} 44' N$ $139^{\circ} 20' E$)
の各点を順に結んだ範囲(陸域除く)
- 北海道石狩湾古平沖合（図4-1-6）
水深：～300m
A: ($43.27375 N$ $140.68089 E$)、B: ($43.27386 N$ $140.68495 E$)
C: ($43.26762 N$ $140.68487 E$)、D: ($43.26751 N$ $140.68013 E$)
の各点を順に結んだ範囲
- 神奈川県三浦市三崎港沖合（図4-1-7）
水深：～170m
 $35^{\circ} 08' N$ $139^{\circ} 33' E$ を中心とする半径約1km の範囲

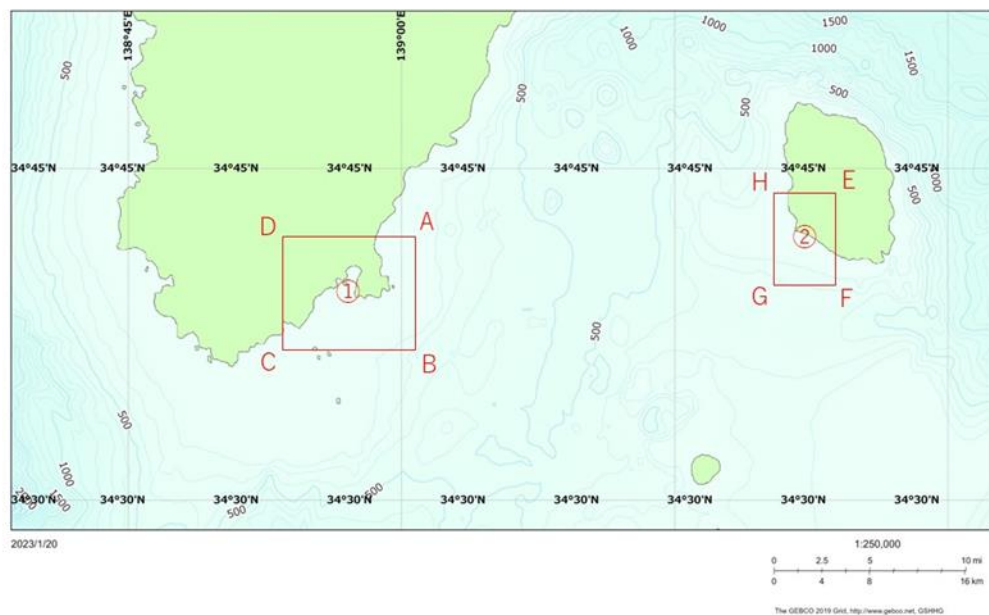


図4-1-5 海域図（静岡県下田沖、東京都大島沖合）

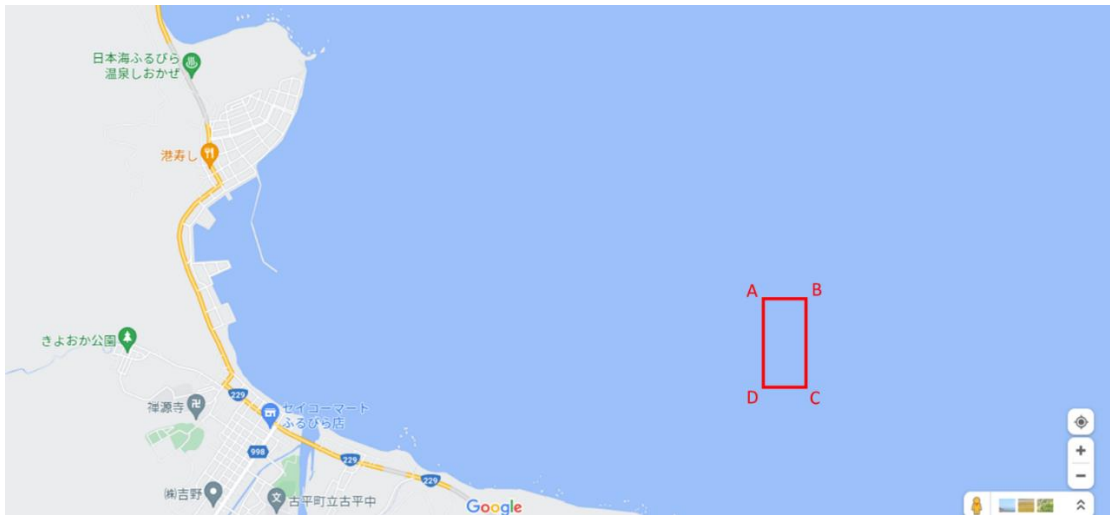


図4-1-6 海域図（北海道石狩湾古平沖合）

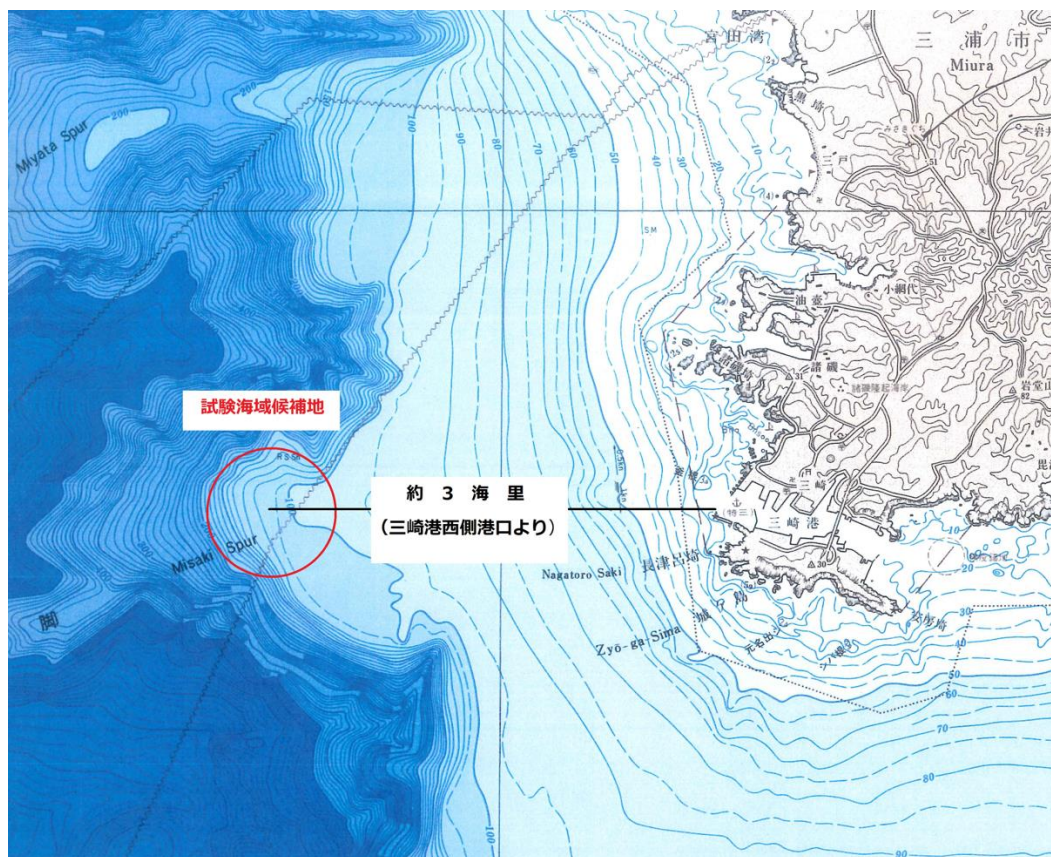


図4-1-7 海域図（神奈川県三浦市三崎港沖合）

図4-1-8～図4-1-11は各海域での深度ごとの濁度に関する図である。伊豆下田沖は水深50mで0.2FTU以下であり（図4-1-8）、透明度は比較的高く、波浪と潮流は許容範囲である。大島沖は水深50m-150m で0.1FTU 以下であり（図4-1-9）、透明度は比較的高いが、波浪が高く、海象不良により運用出来ない日が多いと予想する。小樽沖は水深30m で0.2FTU 以下であり（図4-1-10）、透明度は比較的高く、小樽沖の石狩湾は10km 以上沖まで100m 深度の遠浅であり、波浪および潮流は良好である。城ヶ島沖は水深50m-170m で0.2FTU 以下であり（図4-1-11）、透明度は比較的高く、波浪と潮流は許容範囲である。

上記の調査結果からいずれも光無線通信試験を実施するにあたって十分な濁度であることが確認されたが、波浪及び潮流等を考慮した場合、伊豆下田沖、小樽沖、城ヶ島沖が試験候補地として挙げられる。

本項では、最終的に光通信に最適な海域を選定することを主要な目標としていた。この目標達成のためには、各海域の環境計測結果をもとに光通信性能を予測・評価し、通信環境に最も適した条件を有する海域を明らかにすることが求められる。その一環として、複数の海域において濁度の計測を実施し、海水中における濁度や透過率等の基礎的なデータを取得した。当初の計画では、翌年度にこれらのデータに加えて散乱係数等の計測も行うことを想定していた。

しかしながら、水中航走体の設計・試作といった開発工程に注力する必要性が生じたため、それらを優先し、散乱係数の計測は見送る判断に至った。なお、海水中での光通信性能の予測に必要なパラメータについては、実施した各海域での濁度計測をはじめ、これまでに取得したデータを用いて性能評価が可能であり、更なる計測による予測精度の向上は不要と判断した。

また、光通信装置自体の出力特性や受信感度などの装置固有の性能が十分検証された段階においては、今回取得した濁度等の海水中のデータと照らし合わせることで、各海域における実効的な通信性能、たとえば通信可能距離や減衰特性の予測を行うことが可能となる。これらの検証を通じて、海域での通信試験環境として最も適した海域の選定をより高い精度で実現することが可能である。

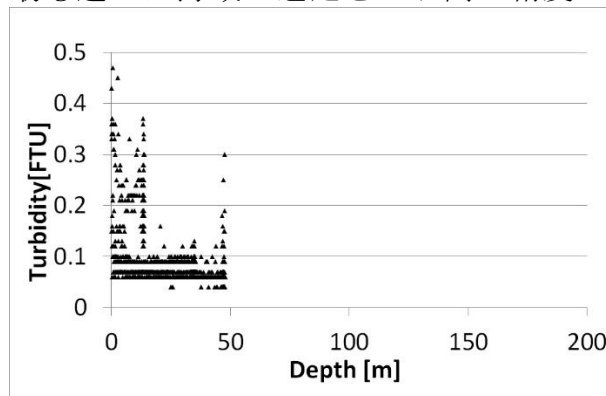


図4-1-8 伊豆下田沖濁度

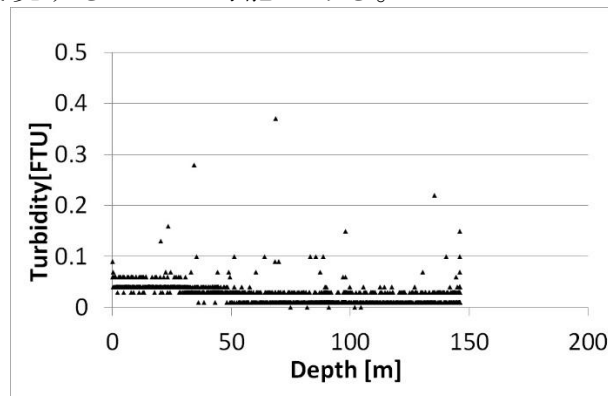


図4-1-9 大島沖

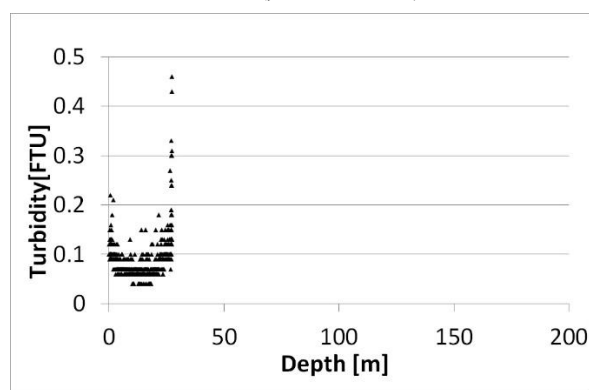


図4-1-10 小樽沖濁度

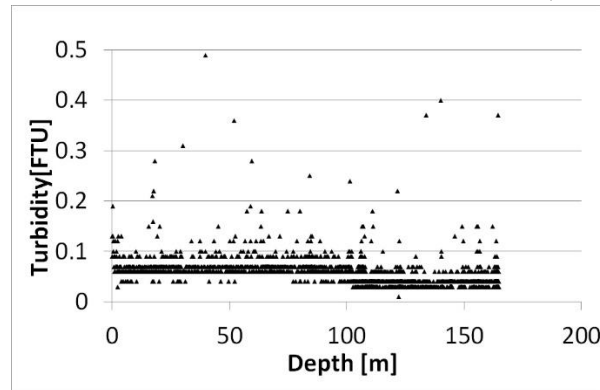
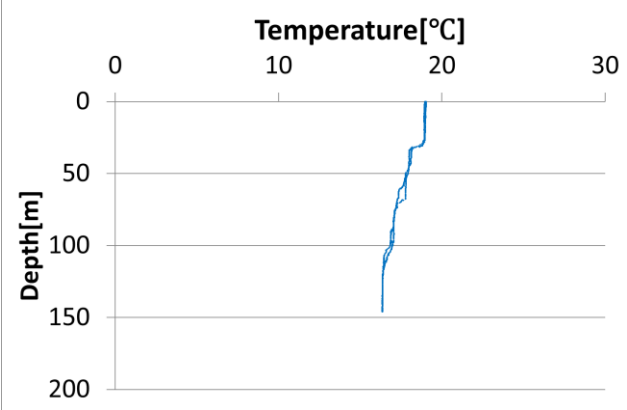
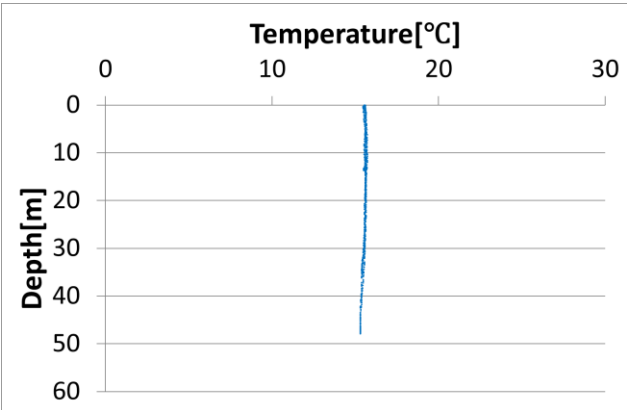


図4-1-11 城ヶ島沖濁度

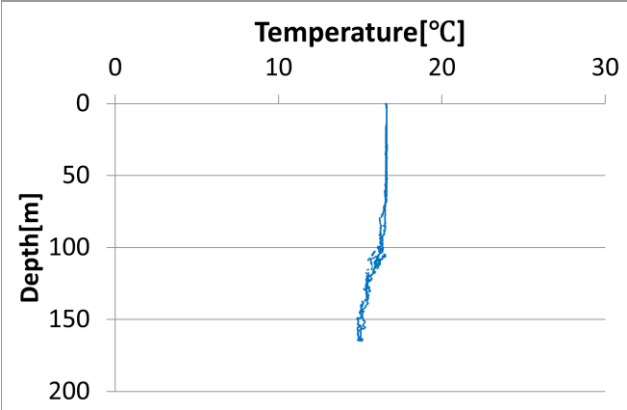
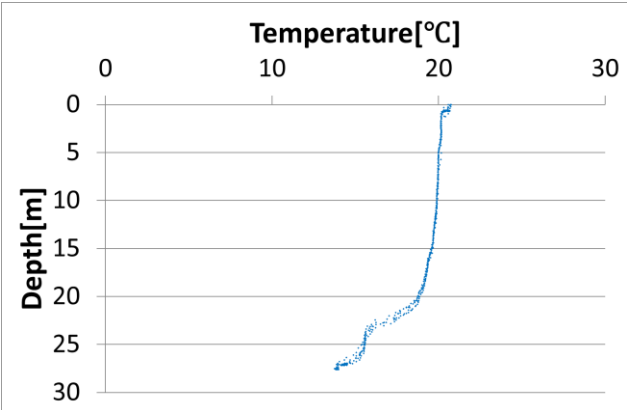
度

本調査時に取得したその他のデータを以下にまとめる



伊豆下田沖

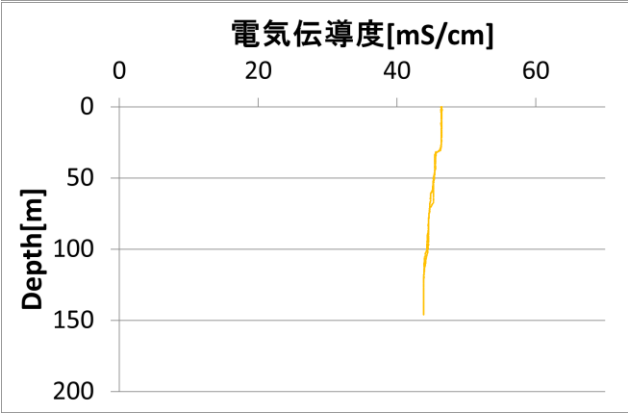
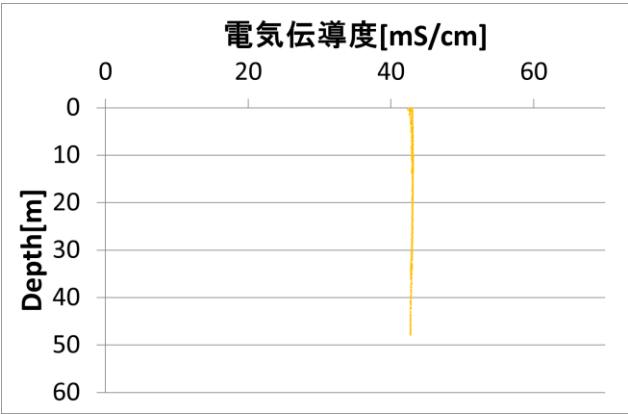
大島沖



小樽沖

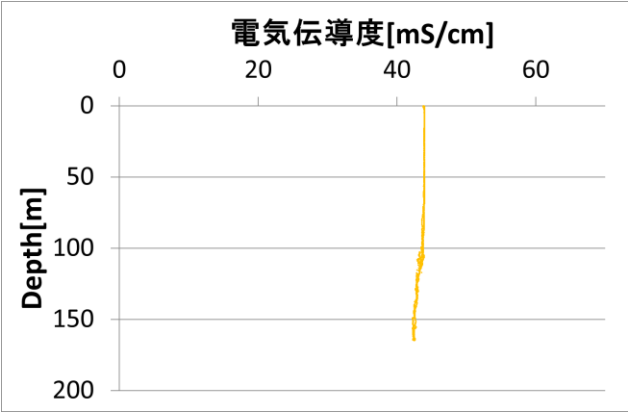
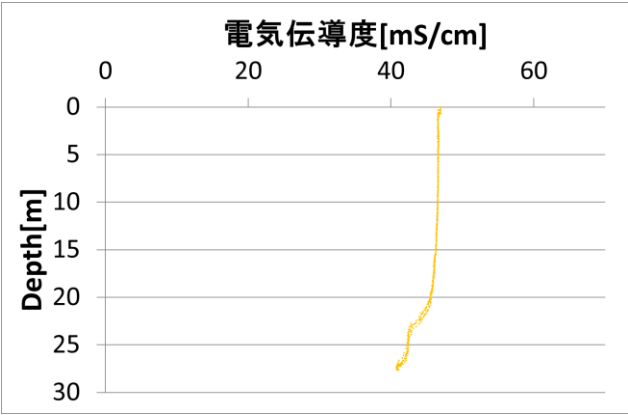
城ヶ島沖

図4-1-12 水温



伊豆下田沖

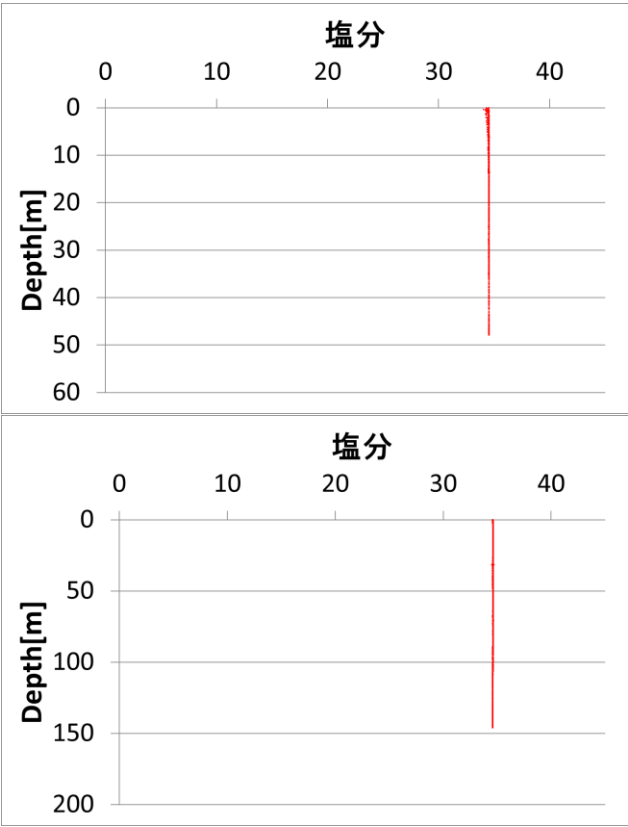
大島沖



小樽沖

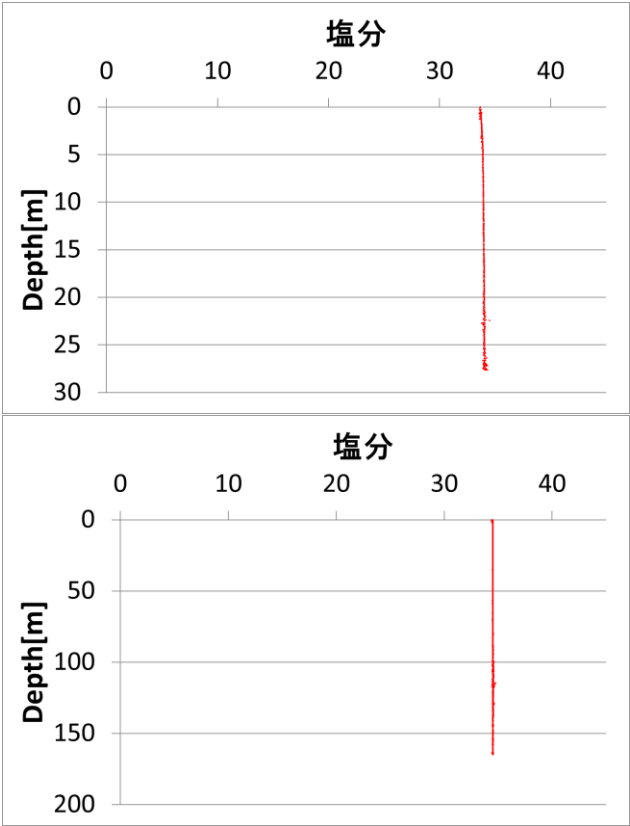
城ヶ島沖

図4-1-13 電気伝導度



伊豆下田沖

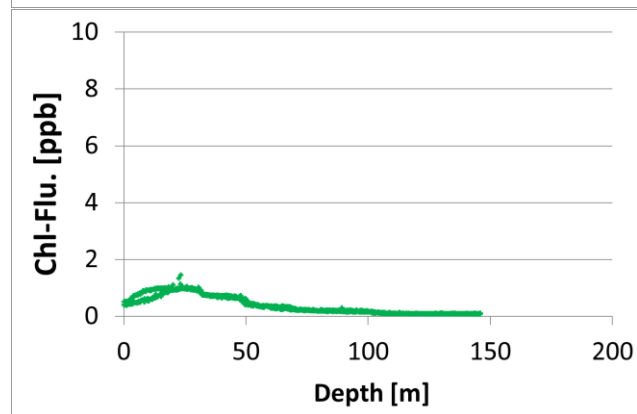
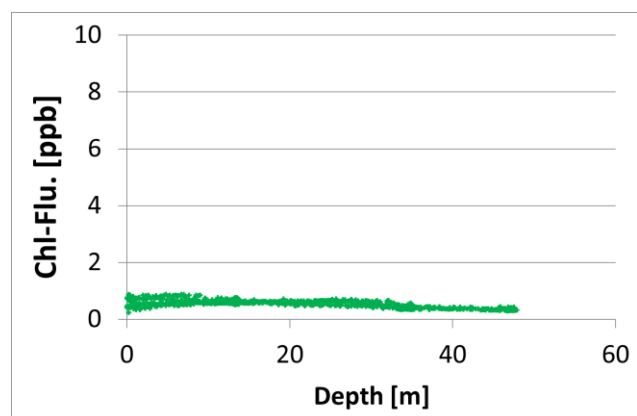
大島沖



小樽沖

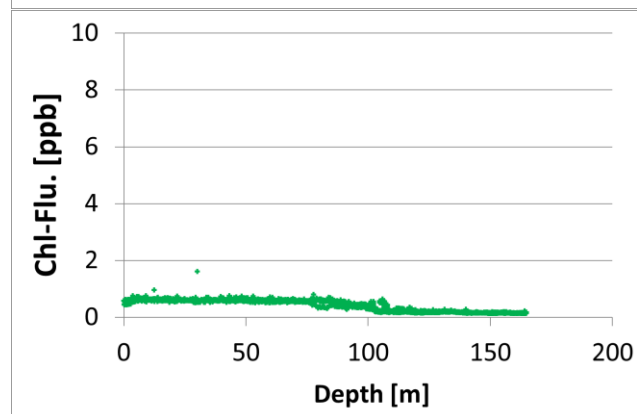
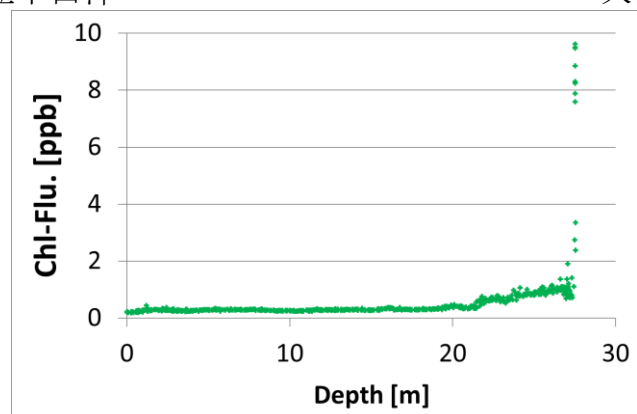
城ヶ島沖

図4-1-14 塩分



伊豆下田沖

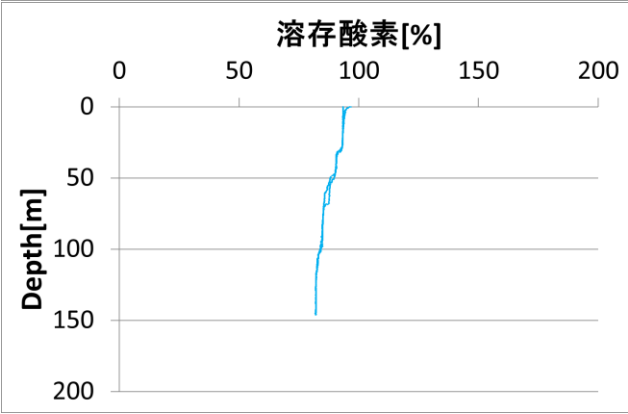
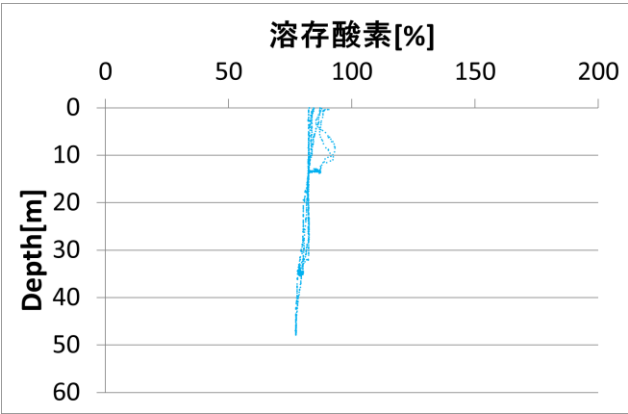
大島沖



小樽沖

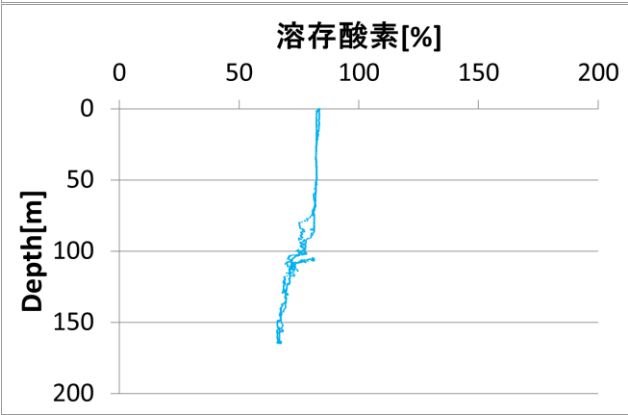
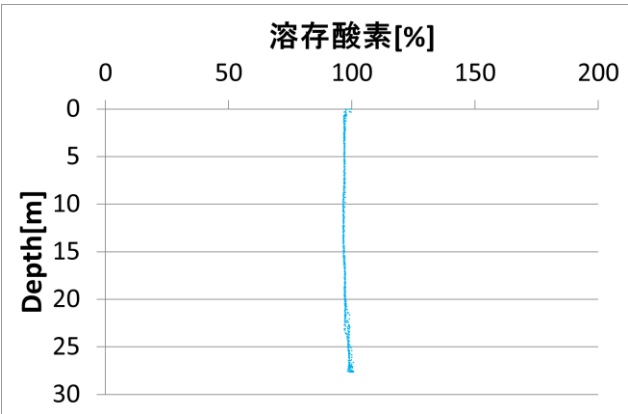
城ヶ島沖

図4-1-15 クロロフィル濃度



伊豆下田沖

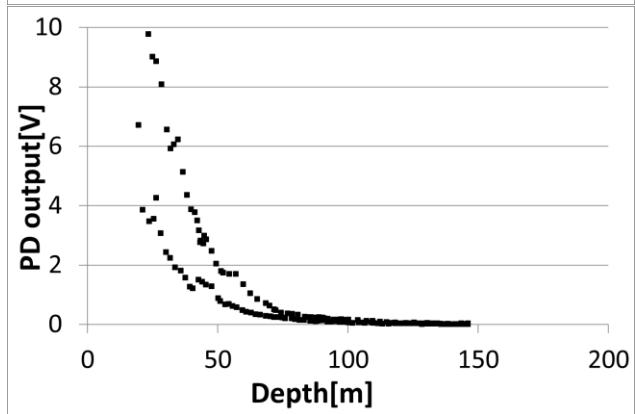
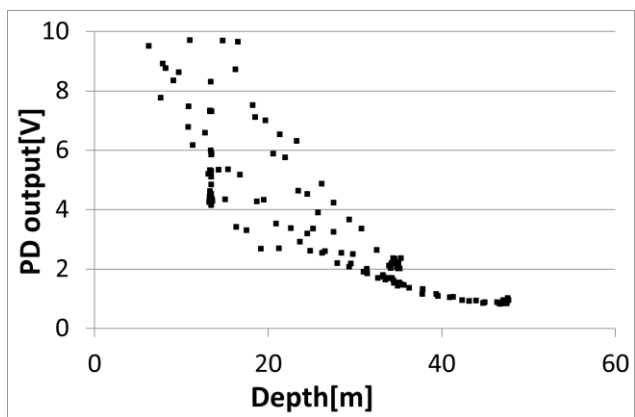
大島沖



小樽沖

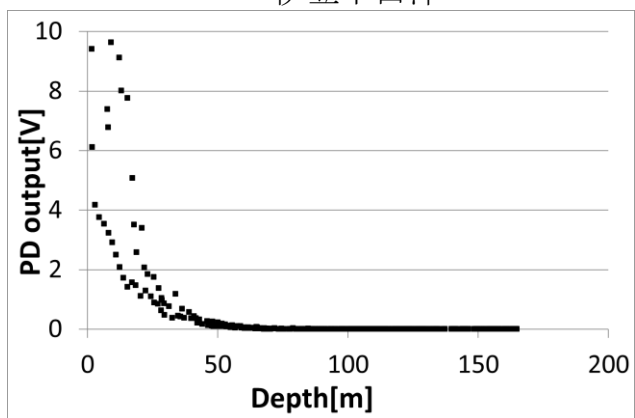
城ヶ島沖

図4-1-16 溶存酸素



伊豆下田沖

大島沖



城ヶ島沖

図4-1-17 周囲の光強度

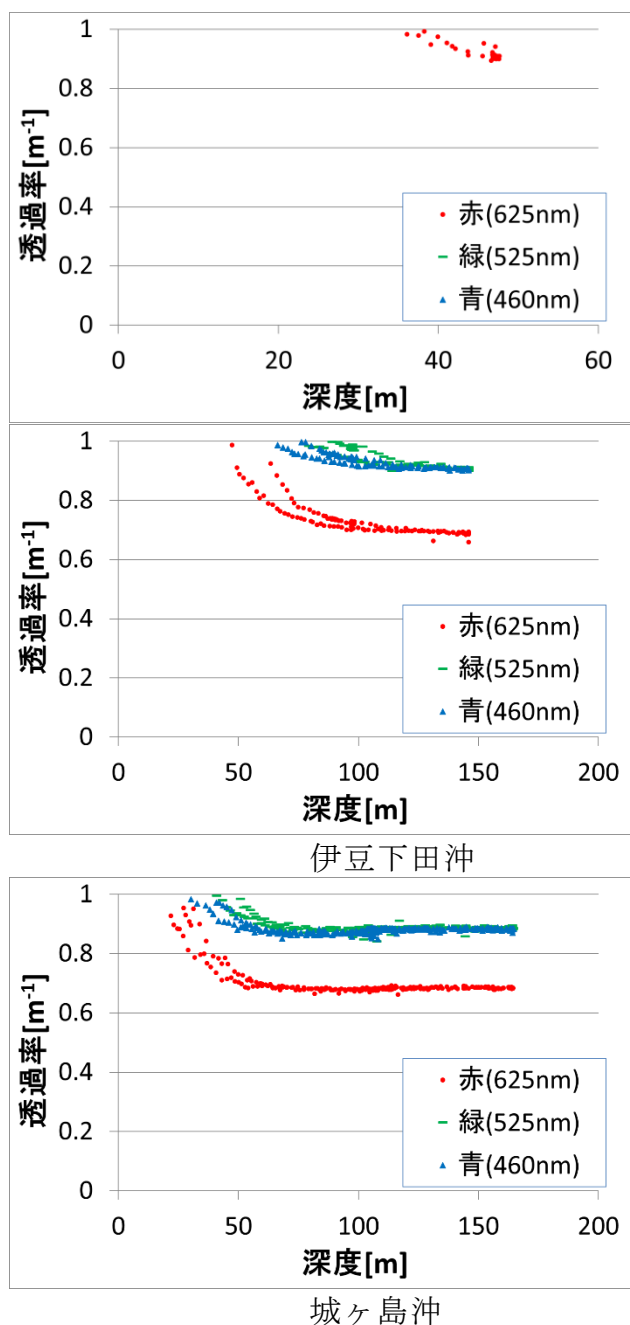


図4-1-18 透過率

④－２．基礎実験の実施に適した条件の海域および時期の調査

前項及び⑦-1項の船舶の検討から、城ヶ島沖合を実験海域とした。同海域を時期毎に海域調査を実施し、試験実施に適した時期を選定することを令和6年度の実施事項としていたが、同年度は水中航走体の設計製作に本項に用いる予算及び時間を用いたため、時期を選定するための海域調査を実施することが困難であった。時期については計測していない以上経験則にはなるが、一般的に夏の時期は濁度が増加する傾向にあり、冬の時期は夏に比べて濁度が減少する傾向にあるため、冬の時期に実施することが望ましい。試験海域とした城ヶ島沖の濁度計測を実施したのは1月であり、この時期に実施することで同等の環境で試験を実施することが可能と推察される。

⑤－１．水中航走体および制御則の開発

【流体試験】

水中航走体制御ソフトウェアの調整に必要な水中航走体の操縦流体力を把握するため、模型の取り付け向きを変更した２種類の曳航状態において、抵抗試験・斜航試験・PMM試験（Planar Motion Mechanism試験：船舶の操縦性能を推定するための試験）を実施し、操縦性微係数を用いた流体力モデルを求めた。供試模型には樹脂製の物を用いた。

供試模型の主要目は下記の通りである。

- ・縮 尺：1/1.5
- ・模型長(L)×模型幅(B)：1.073m×0.500m（1.610m×0.750m 相当）
- ・付加物：センサ、スラスタ

模型の寸法を表5-1-1及び図5-1-1に、供試模型の外観を写真1に示す。

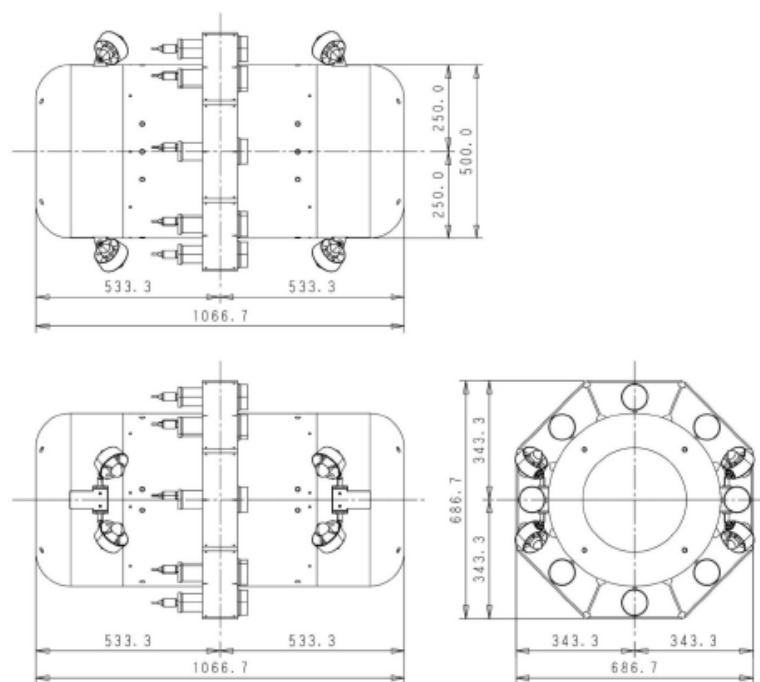


図5-1-1 供試模型外観寸法

表5-1-1 主要目等

項目	記号	単位	実機	模型
縮 尺	α	－	1	1.5
機体長	L	m	1.610	1.073
機体幅 ^{*2}	B	m	0.750	0.500
排水量	∇	kg	711.1	210.7
慣動半径	K_{zz}^{*1}	m (%L)	0.397 24.7	0.265 24.7
質量	m^*	$Kg \cdot s^2/m$	－	21.92
慣性モーメント	I_{zz}^*	$Kg \cdot m \cdot s^2$	－	1.54

無次元値	m^*	-	-	0.7484
	I'_{zz*}	-	-	0.0456

*1 : K_{yy} の計測値で代用

なお、慣動半径計測は、模型内部の隙間に水が充填されている状態の空中重量を計算し、模型内部に水相当分のウェイトを置くことで空中重量を合わせて計測を行った。

*2 : 模型空中重量計測値からの実船換算値

なお、事前に慣動半径を計測した。慣動半径計測は、模型内部の隙間に水が充填されている状態の空中重量を計算し、模型内部に水相当分のウェイトを設置することで空中重量を合わせて計測を行った。

試験は株式会社三井造船昭島研究所小水槽にて実施した。水槽概要は下記の通りである。

・水槽の寸法 : 長さ100m×幅5m×深さ2.65m、水深2.15m

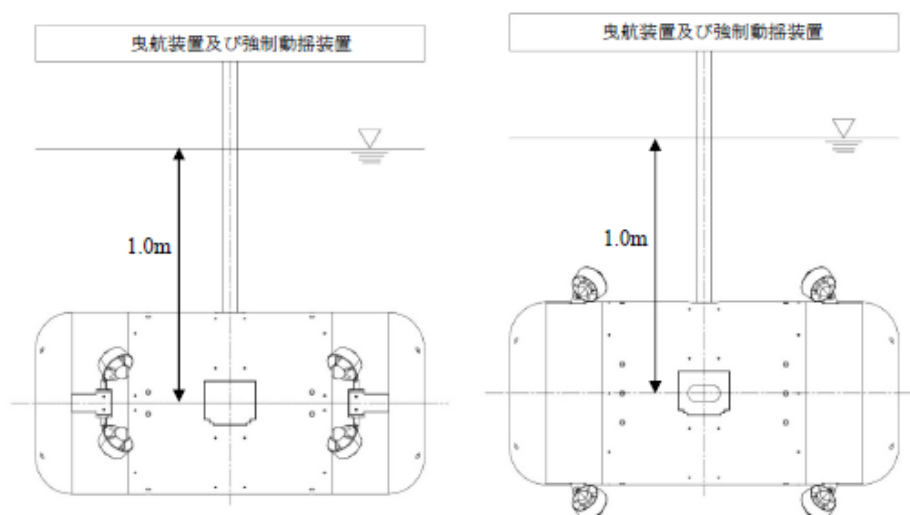
・曳引車 : 最高速度4m/s

試験では、曳引車上に設置した PMM 試験装置に模型を水中で固定し、以下の曳航状態で試験を実施した。

・曳航状態 1 : 模型を装置に横向きに取り付けた状態

・曳航状態 2 : 模型を装置に縦向きに取り付けた状態

各曳航状態での模型取り付け概略図を図5-1-2 に、PMM 試験装置及び模型の取り付け状況を写真2 に示す。なお模型の没水深度は、模型中心において1 mとした。



曳航状態 1 取り付け向き：横

曳航状態 2 取り付け向き：縦

図5-1-2 模型取付状態概略図

曳航状態 1 計測運動 : Sway・Yaw、計測力 : F_x (前後力)・ F_y (横力)・ M_z (回頭モーメント)

曳航状態 2 計測運動 : Heave・Pitch、計測力 : F_x (前後力)・ F_z (上下力)・ M_y (縦揺れモーメント)

試験では、各曳航状態において、抵抗試験、斜航試験、周期的な強制運動を与える PMM (PlanarMotion Mechanism) 試験を実施した。各曳航状態において実施した試験を以下に示す。また、各曳航状態における PMM 試験の運動モードの概略図を図5-1-3 に示す。

【曳航状態 1】

- ・抵抗試験
- ・斜航試験
- ・PureSway 試験（停船試験も実施）
- ・PureYaw 試験（停船試験も実施）
- ・Yaw&Drift 試験
- ・PureSurge試験（停船試験のみ実施）

【曳航状態 2】

- ・抵抗試験
- ・斜航試験
- ・PureHeave試験（停船試験も実施）
- ・PurePitch試験（停船試験も実施）

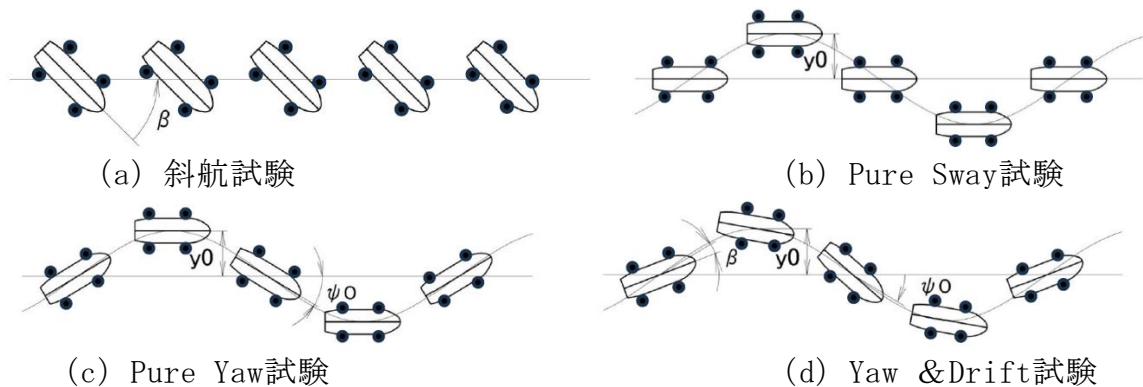


図5-1-3 運動モード

実施した試験状態は表5-1-2に対応する時系列ファイル番号で示す。なお、斜航試験及びPMM試験における模型の曳航速度は、回頭角速度及び運動周波数を考慮して、 $Fn=0.12$ ($U0=0.389m/s$) で実施した。

表5-1-2 試験実施状態
抵抗試験

$U0$	β
m/s	deg
-0.900	0.0
-0.800	
-0.700	
-0.600	
-0.500	

-0.389	
-0.195	
-0.097	
0.000	
0.097	
0.195	
0.389	
0.500	
0.600	
0.700	
0.800	
0.900	

斜航試験

U0	β
m/s	deg
0.389	-5.0
	0.0
	2.5
	5.0
	7.5
	10.0
	15.0
	20.0
	30.0
	45.0
	60.0
	75.0
	90.0
	105.0
	120.0
	135.0
	150.0
	160.0
	165.0
	170.0
	172.5
	175.0
	177.5
	180.0
	185.0

Pure Sway試験 (Pure Heave試験)

U0	$\omega 0$	β	v	vd
----	------------	---------	---	----

m/s	rad/s	rad	m/s	m/s ²
0.389	0.400	---	0.120	0.048
		---	0.180	0.072
		---	0.240	0.096

U0	ω_0	β	v	vd
m/s	rad/s	rad	m/s	m/s ²
0.000	0.400	---	0.120	0.048
		---	0.180	0.072
		---	0.240	0.096

U0	ω_0	β	v	vd
m/s	rad/s	rad	m/s	m/s ²
-0.389	0.400	---	0.120	0.048
		---	0.180	0.072
		---	0.240	0.096

U0	ω_0	β	v	vd
m/s	rad/s	rad	m/s	m/s ²
0.389	0.250	---	0.075	0.019
		---	0.113	0.028
		---	0.150	0.038

U0	ω_0	β	v	vd
m/s	rad/s	rad	m/s	m/s ²
0.000	0.250	---	0.075	0.019
		---	0.113	0.028
		---	0.150	0.038

U0	ω_0	β	v	vd
m/s	rad/s	rad	m/s	m/s ²
-0.389	0.250	---	0.075	0.019
		---	0.113	0.028
		---	0.150	0.038

Pure Yaw試験 (Pure Pitch試験)

U0	ω_0	β	r	rd
m/s	rad/s	rad	m/s	m/s ²
0.389	0.400	0.000	0.109	0.044
		0.000	0.163	0.065
		0.000	0.199	0.080

U0	ω_0	B	r	rd
m/s	rad/s	Rad	m/s	m/s ²

0.000	0.400	0.000	0.070	0.028
		0.000	0.140	0.056
		0.000	0.209	0.084

U0	$\omega 0$	β	r	rd
m/s	rad/s	rad	m/s	m/s ²
-0.389	0.400	0.000	0.109	0.044
		0.000	0.163	0.065
		0.000	0.199	0.080

U0	$\omega 0$	β	r	rd
m/s	rad/s	rad	m/s	m/s ²
0.389	0.250	0.000	0.036	0.009
		0.000	0.063	0.016
		0.000	0.091	0.023

U0	$\omega 0$	β	r	rd
m/s	rad/s	rad	m/s	m/s ²
0.000	0.250	0.000	0.044	0.011
		0.000	0.087	0.022
		0.000	0.131	0.033

U0	$\omega 0$	β	r	rd
m/s	rad/s	rad	m/s	m/s ²
-0.389	0.250	0.000	0.036	0.009
		0.000	0.063	0.016
		0.000	0.091	0.023

Yaw & Drift試験

U0	$\omega 0$	β	r	rd
m/s	rad/s	rad	m/s	m/s ²
0.389	0.400	0.524	0.109	0.044
		0.785	0.109	0.044
		1.047	0.109	0.044

U0	$\omega 0$	β	r	rd
m/s	rad/s	rad	m/s	m/s ²
0.389	0.400	0.524	0.163	0.065
		0.785	0.163	0.065
		1.047	0.163	0.065

U0	$\omega 0$	β	r	rd
m/s	rad/s	rad	m/s	m/s ²
0.389	0.400	0.524	0.199	0.080

		0.785	0.199	0.080
		1.047	0.199	0.080

U0	$\omega 0$	β	r	rd
m/s	rad/s	rad	m/s	m/s ²
0.389	0.250	0.524	0.036	0.009
		0.785	0.036	0.009
		1.047	0.036	0.009

U0	$\omega 0$	β	r	rd
m/s	rad/s	rad	m/s	m/s ²
0.389	0.250	0.524	0.063	0.016
		0.785	0.063	0.016
		1.047	0.063	0.016

U0	$\omega 0$	β	r	rd
m/s	rad/s	rad	m/s	m/s ²
0.389	0.250	0.524	0.091	0.023
		0.785	0.091	0.023
		1.047	0.091	0.023

U0	$\omega 0$	β	r	rd
m/s	rad/s	rad	m/s	m/s ²
-0.389	0.400	0.524	0.109	0.044
		0.785	0.109	0.044
		1.047	0.109	0.044

U0	$\omega 0$	β	r	rd
m/s	rad/s	rad	m/s	m/s ²
-0.389	0.400	0.524	0.163	0.065
		0.785	0.163	0.065
		1.047	0.163	0.065

U0	$\omega 0$	β	r	rd
m/s	rad/s	rad	m/s	m/s ²
-0.389	0.400	0.524	0.199	0.080
		0.785	0.199	0.080
		1.047	0.199	0.080

U0	$\omega 0$	β	r	rd
m/s	rad/s	rad	m/s	m/s ²
-0.389	0.250	0.524	0.036	0.009
		0.785	0.036	0.009
		1.047	0.036	0.009

U0	$\omega 0$	β	r	rd
m/s	rad/s	rad	m/s	m/s ²
-0.389	0.250	0.524	0.063	0.016
		0.785	0.063	0.016
		1.047	0.063	0.016

U0	$\omega 0$	β	r	rd
m/s	rad/s	rad	m/s	m/s ²
-0.389	0.250	0.524	0.091	0.023
		0.785	0.091	0.023
		1.047	0.091	0.023

Pure Surge試験

U0	$\omega 0$	β	u	ud
m/s	rad/s	rad	m/s	m/s ²
0.000	0.400	---	0.080	0.032
		---	0.120	0.048
		---	0.160	0.064

U0	$\omega 0$	β	u	ud
m/s	rad/s	rad	m/s	m/s ²
0.000	0.250	---	0.075	0.019
		---	0.113	0.028
		---	0.150	0.038

本試験においては、曳引車上に設置したPMM 試験装置に模型を水中で固定し、以下に示す項目を計測した。

曳航状態1

- ・前後力：X、横力：Y、回頭モーメント：N
- ・運動振幅：Sway、Yaw

曳航状態2

- ・前後力：X、上下力：Z、縦揺れモーメント：M
- ・運動振幅：Heave、Pitch

前後力、横力（上下力）及び回頭モーメント（縦揺れモーメント）は模型内部の中央に取り付けた3分力計により計測した。また、運動振幅はPMM 試験装置のポテンシオメーターにより計測した。使用した3分力計の仕様を以下に示す。

定格負荷：Fx±50kg、Fy±50kg、Mz±5kg-m

非直線性：±1%FS

ヒステリシス：±1%FS

なお、PMM 試験における運動中心は模型中央とし、計測される流体力についても模型中央を原点とした座標系で整理した。計測時の座標系を図5-1-4、図5-1-5 に示す。

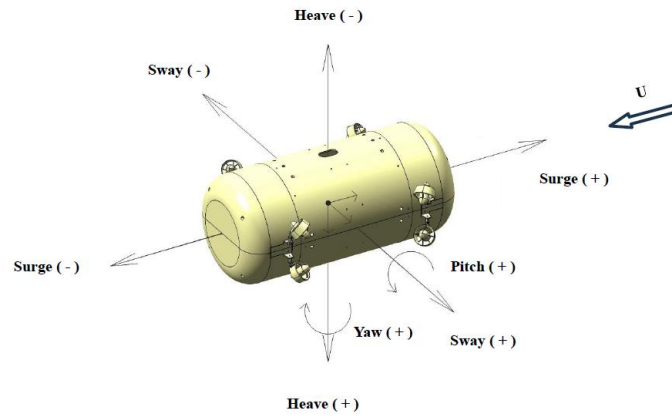
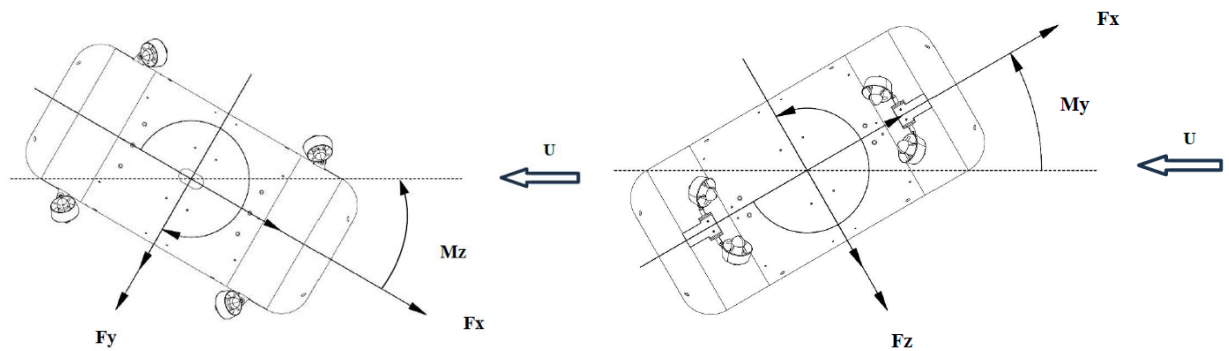


図5-1-4 座標系（艇体運動）



曳航状態1（取り付け方向：横）

曳航状態2（取り付け方向：縦）

図5-1-5 座標系（検力方向）

各試験で得られた流体力を解析して、運動パラメータを整理した。なお、解析に使用した記号につき表5-1-3にまとめる。

表5-1-3 記号

U (m/s)	曳航速度
∇ (m ³)	排水量
RT (kgf)	抵抗
u (m/s)	船速の X 軸方向成分
v (m/s)	船速の Y 軸方向成分
w (m/s)	船速の Z 軸方向成分
p (rad/s)	X 軸まわりの角速度
q (rad/s)	Y 軸まわりの角速度
r (rad/s)	回頭角速度
m (kgf・s ² /m)	質量
m_x (kgf・s ² /m)	X 軸方向の付加質量
m_y (kgf・s ² /m)	Y 軸方向の付加質量
m_z (kgf・s ² /m)	Z 軸方向の付加質量
I_{xx} (kgf・m・s ²)	X 軸まわりの慣性モーメント
J_{xx} (kgf・m・s ²)	X 軸まわりの付加慣性モーメント

I_{yy} (kgf・m・s ²)	ント
J_{yy} (kgf・m・s ²)	Y 軸まわりの慣性モーメント
I_{zz} (kgf・m・s ²)	Y 軸まわりの付加慣性モーメント
J_{zz} (kgf・m・s ²)	ント
X (kgf)	Z 軸まわりの慣性モーメント
Y (kgf)	Z 軸まわりの付加慣性モーメント
Z (kgf)	ント
L (kgf・m)	X 軸方向の力
M (kgf・m)	Y 軸方向の力
N (kgf・m)	Z 軸方向の力
ρ (kgf・s ² /m ⁴)	X 軸まわりのモーメント
	Y 軸まわりのモーメント
	Z 軸まわりのモーメント
	水の密度

(1) 抵抗試験

抵抗試験で得られた曳航速度に対する前後力（X軸方向の力）の結果を図5-1-6に示す。

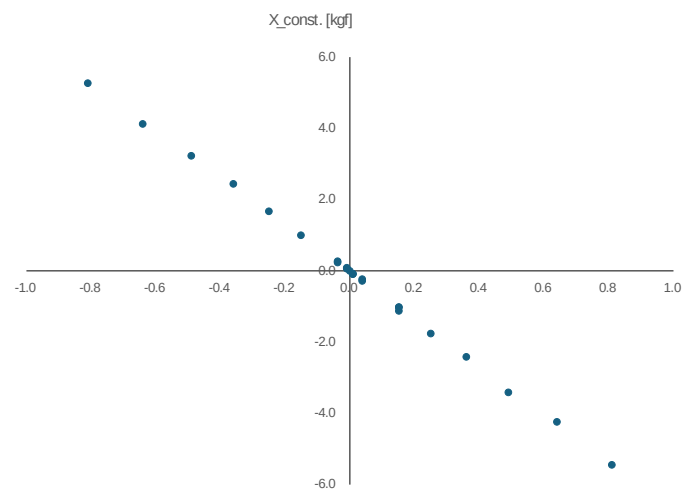


図5-1-6 抵抗試験結果

(2) 斜航試験

斜航試験で得られた斜航角に対する、各曳航状態における前後力、横力（上下力）及びモーメントの計測結果を図5-1-7、図5-1-8に示す。

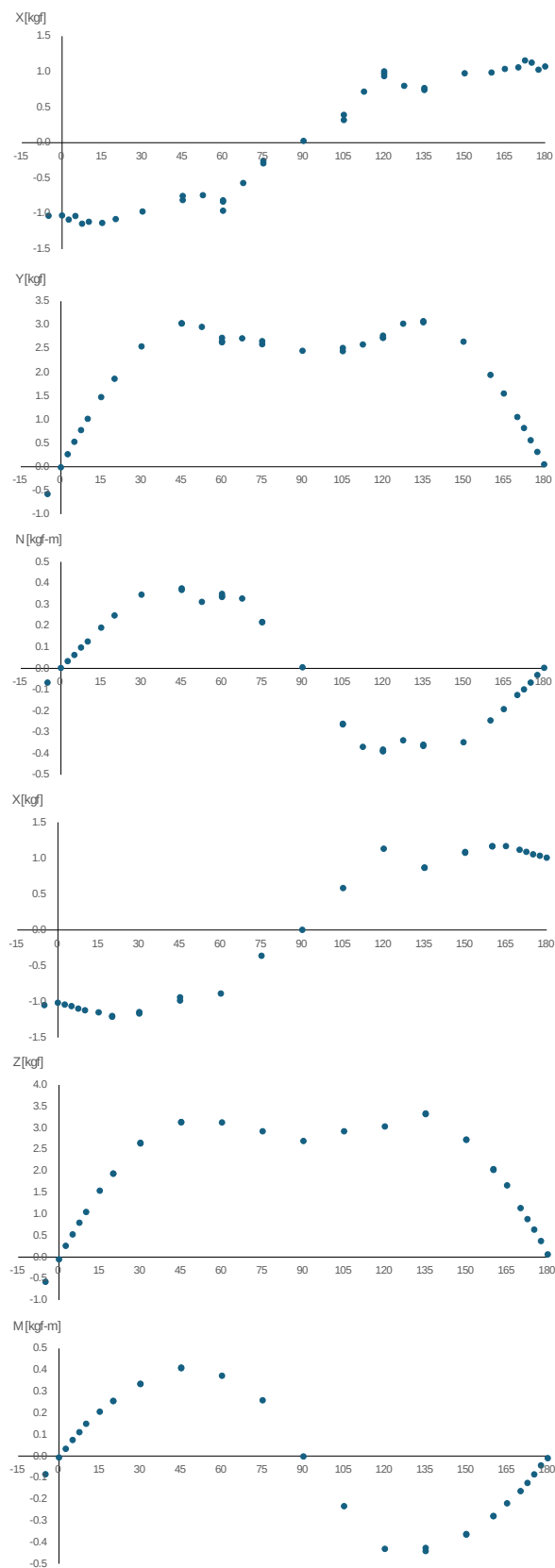


図5-1-7 斜航試験結果

図5-1-8 斜航試験結果

(3) PureSurge試験

PureSurge試験で得られた前後力に関する計測結果（慣性項）を、図5-1-9に示す。

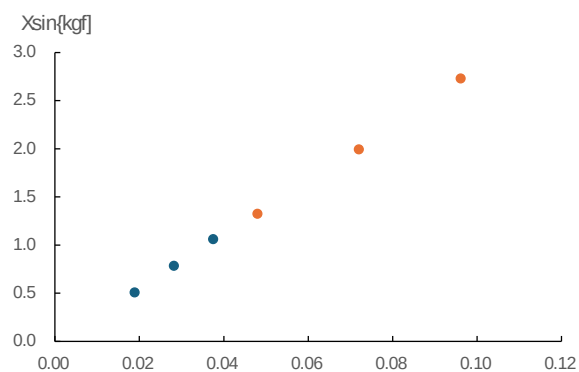


図5-1-9 PureSurge試験結果

（４） PureSway試験（PureHeave試験）

PureSway試験（PureHeave試験）で得られた横力（上下力）及びモーメントに関する計測結果（慣性項）を図5-1-10、図5-1-11に示す。

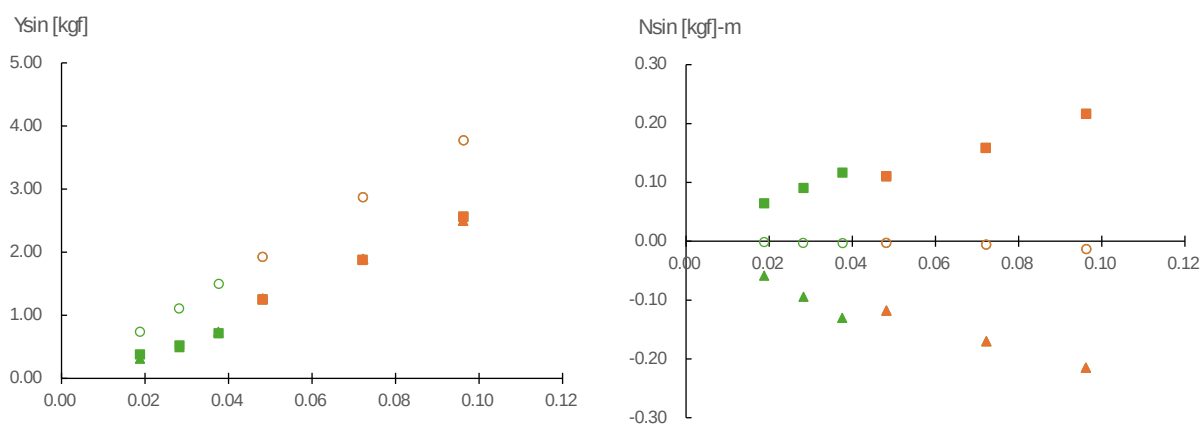


図5-1-10 PureSway試験結果

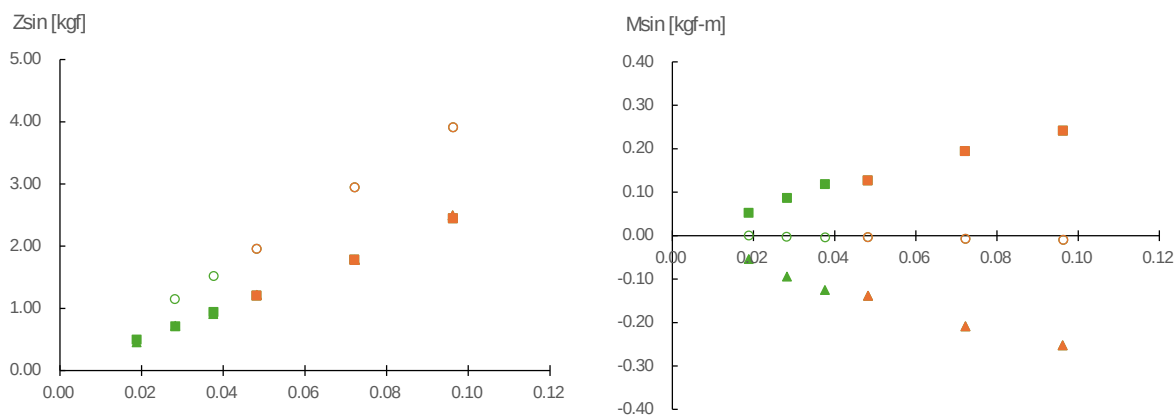


図5-1-11 PureHeave試験結果

(5) PureYaw試験 (PurePitch試験)

PureYaw試験 (PurePitch試験) で得られた横力 (上下力) 及びモーメントに関する計測結果を図5-1-12～図5-1-13、図5-1-14～図5-1-15に示す。また、計測結果の内減衰項に関する計測結果を図5-1-12、図5-1-14に、慣性項に関する計測結果を図5-1-13、図5-1-15にそれぞれ示す。

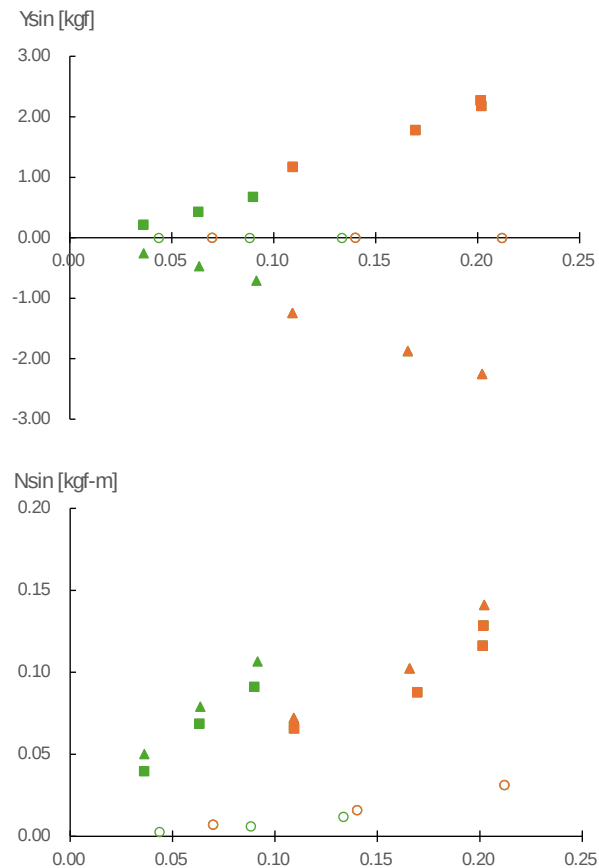


図5-1-12 PureYaw試験結果-1

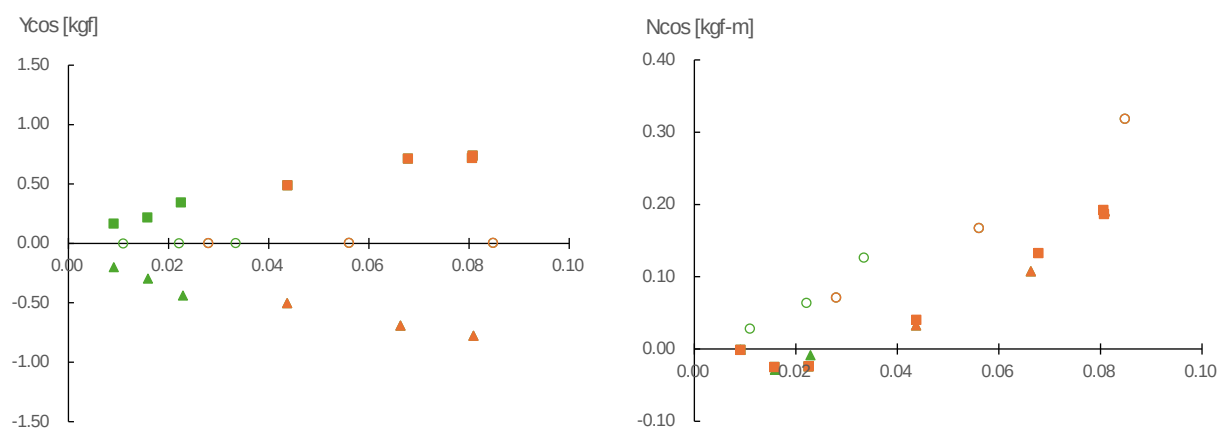


図5-1-13 PureYaw試験結果-2

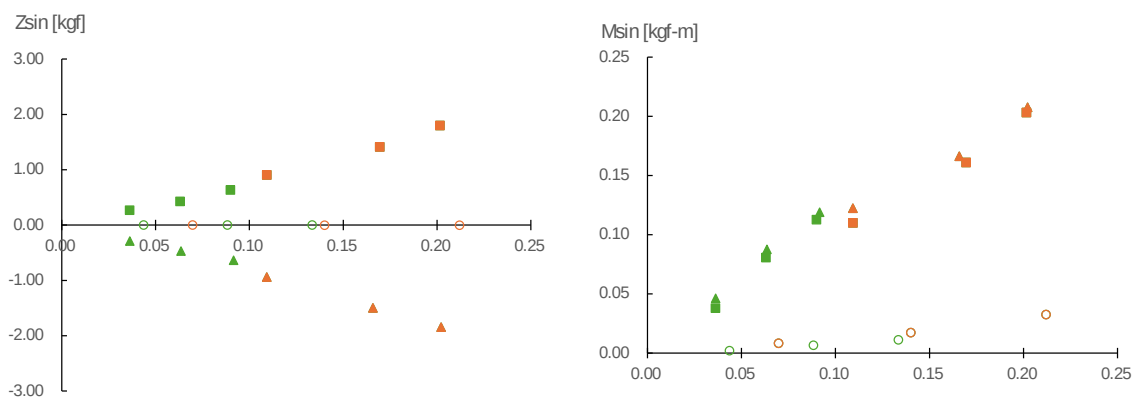


図5-1-14 PurePitch試験結果-1

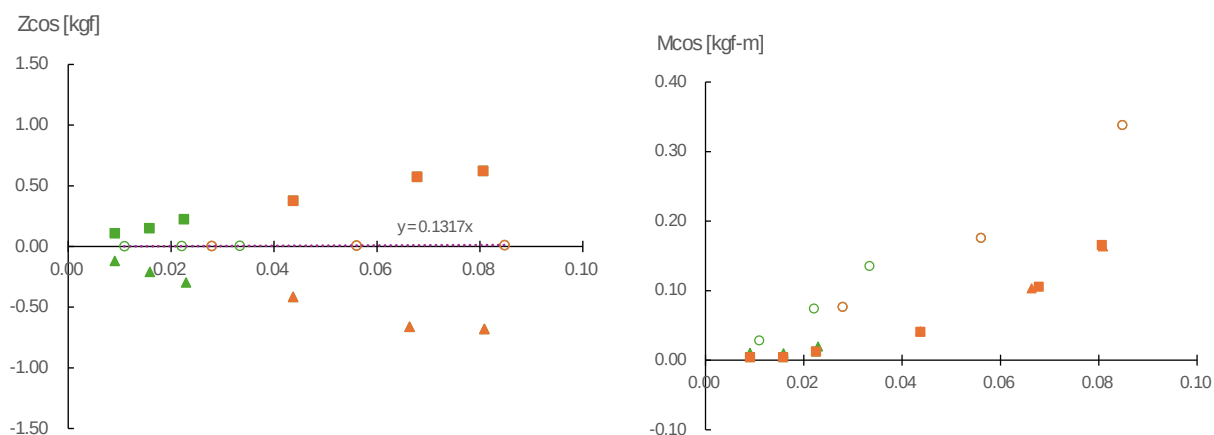


図5-1-15 PurePitch試験結果-2

(6) Yaw&Drift試験

Yaw&Drift試験で得られた前後力、横力及び回頭モーメントに関する減衰項から、PureYaw試験で得られた減衰項の成分を引いた結果を図5-1-16～図5-1-18に示す。

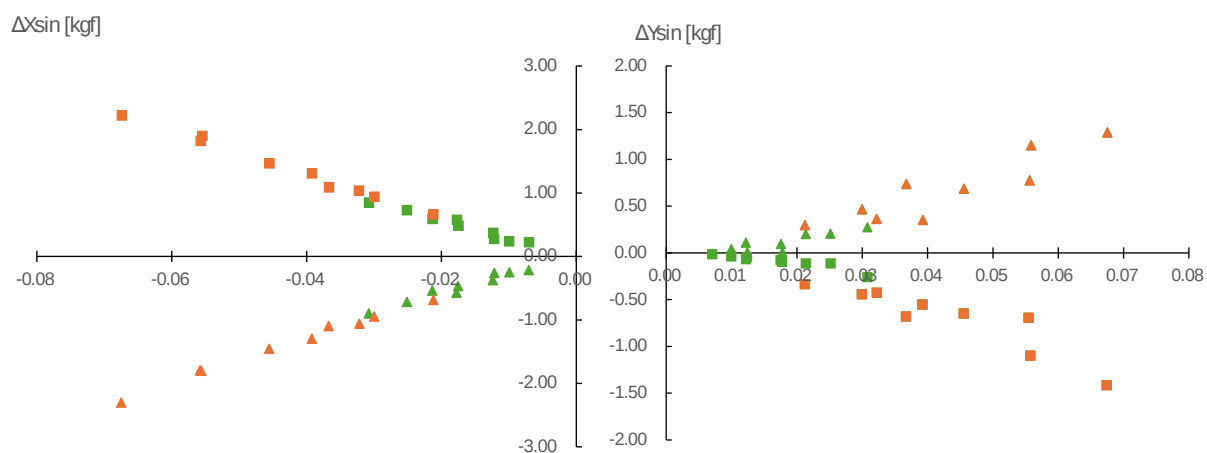


図5-1-16 Yaw&Drift試験結果-1

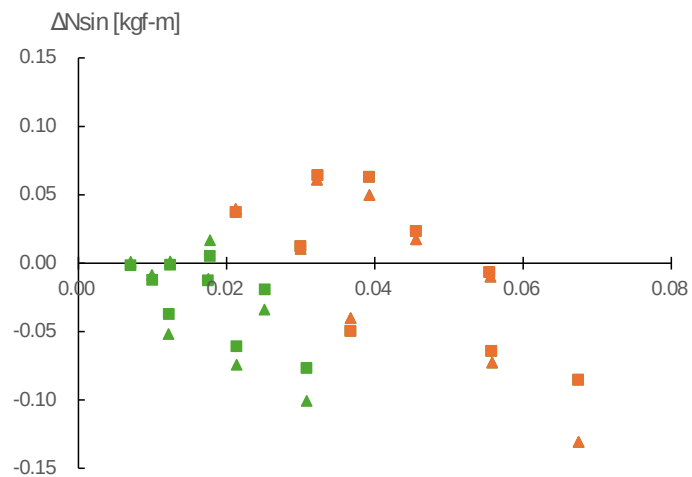


図5-1-17 Yaw&Drift試験結果-2

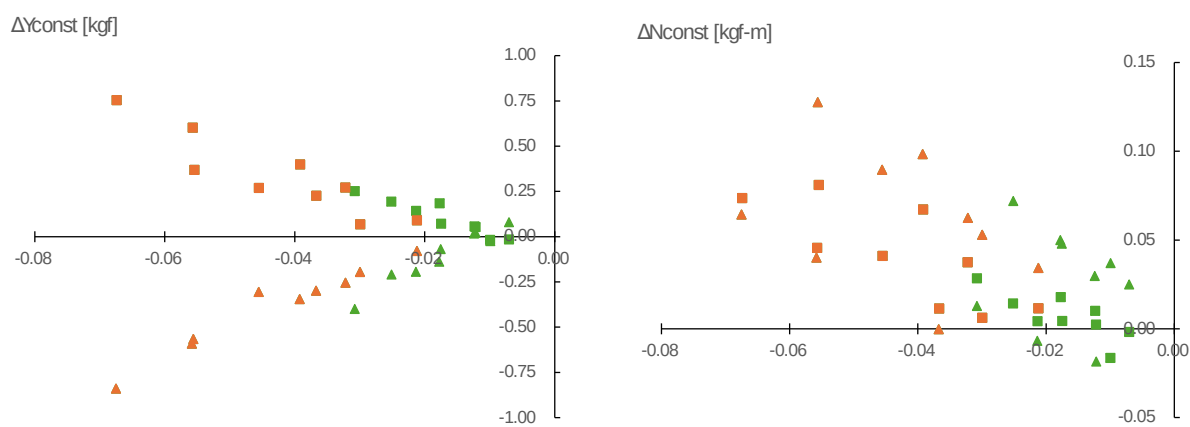


図5-1-18 Yaw&Drift試験結果-3

各試験を整理してまとめた図5-1-6から図5-1-18のグラフの傾きから得られた操縦性微係数を、表5-1-4にまとめる。これらの操縦性微係数を用いた水中航走体の流体力モデルの数式表現は以下となる。

表5-1-4 操作性微係数

Resistance	$X'_{u u }$	-0.3056
------------	-------------	---------

Pure Surge	$X'_{\dot{u}}$	2.0019
------------	----------------	--------

Pure Sway	$Y'_{\dot{v}}$	2.8175
	$N'_{\dot{v}}$	0.2617

Pure Yaw	$Y'_{\dot{r}}$	1.0889
	$Y'_{\dot{r}}$	0.0714
	$N'_{\dot{r}}$	0.3405
	$N'_{\dot{r}}$	0.2123

Yaw & Drift	X'_{vr}	0.5302
	$Y'_{v r }$	-0.5893
	$Y'_{ v r}$	-1.0897
	$N'_{v r }$	-0.1058
	$N'_{ v r}$	-0.0499

Pure Heave	$Z'_{\dot{w}}$	1.8029
	$M'_{\dot{w}}$	0.2936

Surge

$$(\mathbf{m} + \mathbf{m}_x)\dot{u} - (\mathbf{m} + \mathbf{m}_y)vr + (\mathbf{m} + \mathbf{m}_z)wq = X_{u|u|}u \cdot |u| + \Delta X_H + X_{vr}vr - X_{wq}wq$$

Sway

$$\begin{aligned} (\mathbf{m} + \mathbf{m}_y)\dot{v} - (\mathbf{m} + \mathbf{m}_z)wp + (\mathbf{m} + \mathbf{m}_x)ur \\ = Y_H + Y_{\dot{r}}\dot{r} + Y_r r + Y_{v|r|}v|r| + Y_{|v|r}|v|r \end{aligned}$$

Heave

$$(\mathbf{m} + \mathbf{m}_y)\dot{v} - (\mathbf{m} + \mathbf{m}_z)wp + (\mathbf{m} + \mathbf{m}_x)ur = Y_H + Y_{\dot{r}}\dot{r} + Y_r r + Y_{v|r|}v|r| + Y_{|v|r}|v|r$$

Roll

$$(\mathbf{m} + \mathbf{m}_y)\dot{v} - (\mathbf{m} + \mathbf{m}_z)wp + (\mathbf{m} + \mathbf{m}_x)ur = Y_H + Y_{\dot{r}}\dot{r} + Y_r r + Y_{v|r|}v|r| + Y_{|v|r}|v|r$$

Pitch

$$\begin{aligned} (I_{yy} + J_{yy})\dot{q} - \{(I_{zz} + J_{zz}) - (I_{xx} + J_{xx})\}rp - (I_{zx} + J_{zx})(r^2 - p^2) \\ = M_H + M_{\dot{w}}\dot{w} + M_q q + M_{w|q}|w|q| + M_{|w|q}|w|q| \end{aligned}$$

Yaw

$$\begin{aligned} (I_{yy} + J_{yy})\dot{q} - \{(I_{zz} + J_{zz}) - (I_{xx} + J_{xx})\}rp - (I_{zx} + J_{zx})(r^2 - p^2) \\ = M_H + M_{\dot{w}}\dot{w} + M_q q + M_{w|q}|w|q| + M_{|w|q}|w|q| \end{aligned}$$

前後力については、抵抗試験結果をもとに直進抵抗成分を差し引いて用いるものとする。また、横揺れに関する流体力の計測は本試験では実施していない。慣性モーメントおよび減衰力等は類似の試験結果や文献調査等を参考に、操縦運動推定に支障がないよう推定するものとする。

本制御則を用いた水中航走体は、水槽内において指定された深度に0.1m単位以下で、方位に0.1°以下単位で保持可能なため、光通信・トラッキング試験可能要件を満たしている。ただし指示値に合わせる時には時間を要する場合もある。

【機体製作】

令和4年度から令和6年度にかけて水中航走体の設計・製作を実施した。以下に製作した水中航走体について記載する。

水中航走体の全体構成を図5-1-19に示す。水中航走体は2機あり、各機体はそれぞれケーブルにて船上の各操縦装置（ノートPC）と接続される。操縦装置画面上では水中航走体の各センサの情報が表示される他、水中航走体に搭載されているカメラ映像を確認することが可能である。水中航走体の操作は操縦装置からコマンドを送信する他、操縦装置と接続されたコントローラにてマニュアル操作することも可能である。水中航走体には独立した音響測位装置が搭載されており、同装置母船用のものを船上から海水に垂らし、同装置とケーブルで接続されたモニタリング装置（専用ソフトをインストールしたノートPC）にて水中航走体の位置を確認することが可能である。

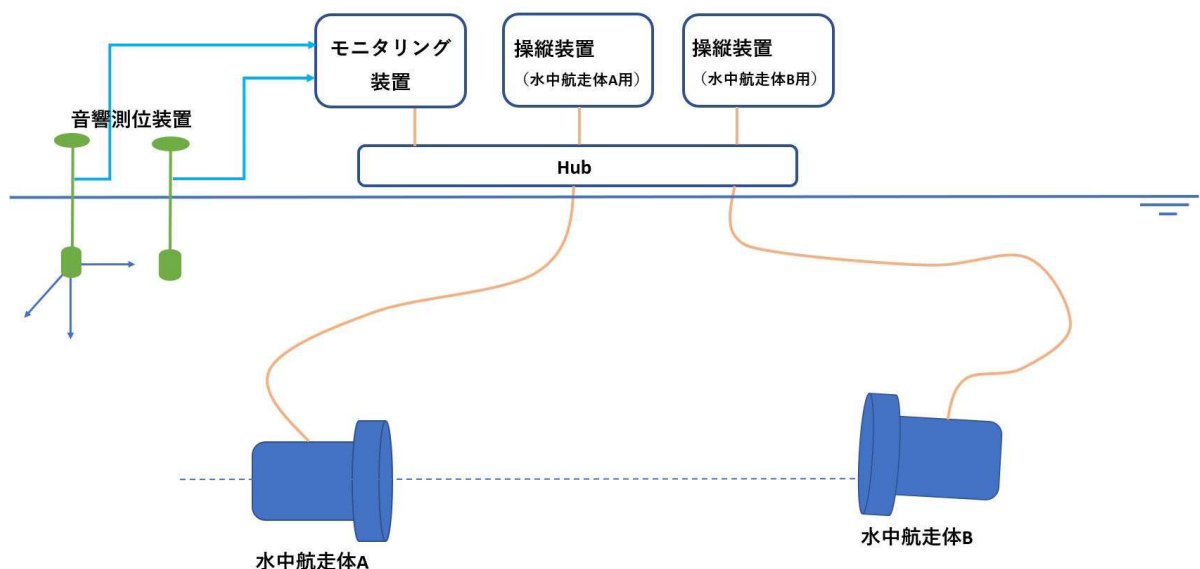


図5-1-19 水中航走体全体構成概略図

水中航走体の主要目は下記の通りである。図5-1-20に水中航走体の外観写真を、図5-1-21に外観図を示す。

数 量：合計2 機

寸 法：約1,600(長さ)×1,050(幅)×1,050(高さ)mm26

質 量：約180～210kg ※質量は搭載するリチウムイオンバッテリーの本数による。

耐 圧：300m

浮 力：中性浮力(淡水、海水の両方に対応するように調整可能。)

概 要：

- ・水中航走体は、クレーンで二点吊りにて吊り上げ可能な金具を装備している。
- ・水中航走体は、専用台車にて運搬が可能である。
- ・水中航走体の重心と機体中心で一致させるよう搭載機器を前後左右のバランスを考慮して配置し、またバランス調整用の浮力体とウェイト配置できるようスペースが確保されている。
- ・水中航走体の水中位置を検出できるよう音響測位装置を装備している。

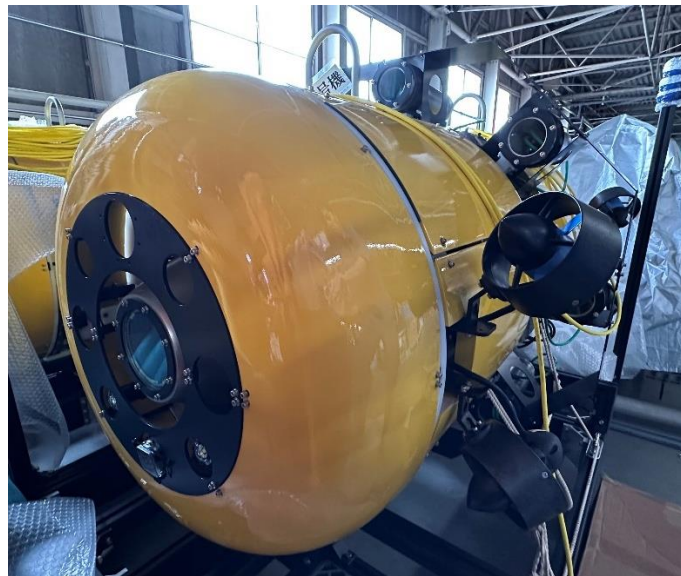
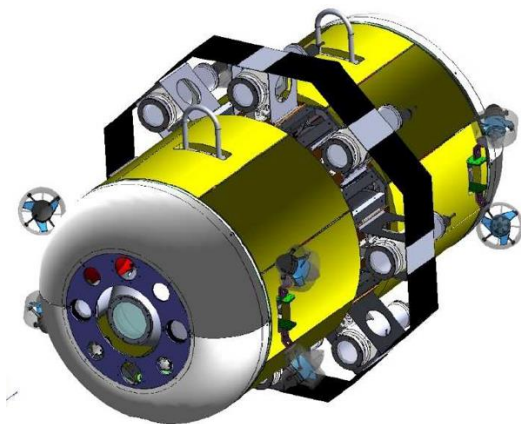
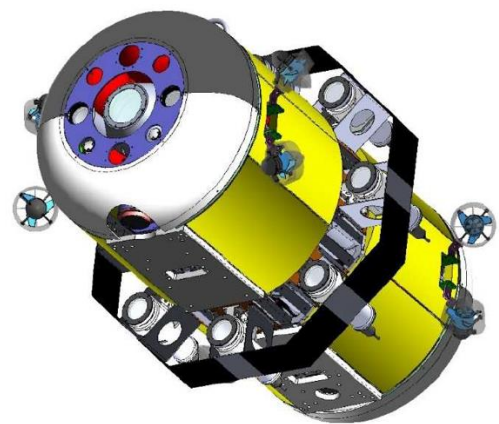


図5-1-20 水中航走体外観写真



正面上斜め



正面下斜め

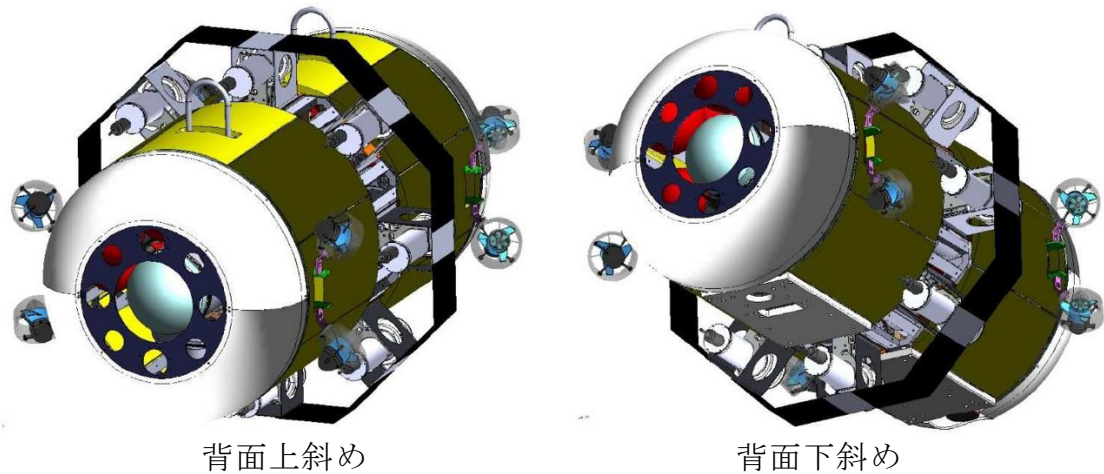


図5-1-21 外観図

水中航走体を構成する機器は下記の通りである。また、機器配置を図5-1-22～5-1-24に示す。

(1) 電子機器容器(主耐圧容器)

用 途：水中航走体の制御用CPU、各種センサ、DC 電源、各種基板、船上装置のインターフェース機器の格納

数 量：1 台

内 径：φ 210～212mm

質 量：約24kg

材 質：耐食アルミ合金製、アクリルドーム(半球殻、無色透明)

耐 圧：300m

表面処理：陽極酸化皮膜処理

(2) 制御用PC

用 途：水中航走体の姿勢制御、船上装置とのデータ通信

数 量：1 式

OS：Windows 11

インターフェース：LAN×2、USB × 7

(3) モータコントローラ

用 途：スラスタの回転数指令の送信

数 量：1 式

(4) ESC(Electric Speed Controller)

用 途：スラスタの回転数制御

数 量：8 式

(5) DC 電源装置(DC/DC コンバータ)

用 途：水中航走体搭載機器へ供給する電源の電圧変換

数 量：1 式

供給電圧：5V、12V、24V 等必要な電圧
メーカー：COSEL等

(6) テザーインターフェースボード

用 途：水中航走体と船上装置間の通信を可能とするイーサネット装置
数 量：1 式
最大実用帯域幅：80Mbps

(7) 電池耐圧容器

用 途：リチウムイオンバッテリーの格納
数 量：6 台
内 径：φ130mm
材 質：耐食アルミ合金製
耐 圧：300m
表面处理：陽極酸化皮膜処理
搭載機器：22.2V/28Ah バッテリー×2 台/1機、最大質量約3.2kg×2=6.4kg/1機
保護機能： バッテリー電源制御基板による過放電、過電流の監視電源ヒューズ基板による非常時の電子機器容器との切り離し

(8) リチウムイオンバッテリー

用 途：水中航走体の電源供給元、電子機器容器への電力供給
数 量：3 台
内 径：最大φ98.5mm
公 称：リチウムイオン電池 22.2V/28Ah

(9) フレーム

数 量：1 式(上下に同型フレームの組み合わせ)
材 質：耐食アルミ合金製
表面处理：陽極酸化皮膜処理
質 量：約41kg

(10) フェアリング

用 途：搭載機器の保護、流体抵抗低減
数 量：1 式
材 質：アルミニウム(成型加工)

(11) 浮力体

用 途：水中航走体の浮力調整
数 量：1 式 ※33kgの質量を浮かせる浮力体
材 質：シンタクチックフォーム

(12) ウェイト

用 途：水中航走体の浮力調整
数 量：1 式
材 質：鉛

(13) カメラ(高感度カメラ)

用 途：水中航走体の周囲確認

数 量：1 台

撮像素子：カラー、1/4 インチCCD 個体撮像素子

画素数：1920(H)×1080(V) Full HD

画 角：水平80°、垂直64°

最小照度：0.01lx

(14) 投光器(LEDライト)

用 途：水中航走体の周囲観察

数 量：2 台

方 式：LED

最大輝度：1,500 lm

色温度：5,700 K

光線角度：水中で135°

照度調整：PWM 制御

耐 圧：500m

(15) 深度センサ

用 途：水中航走体の深度測定

数 量：1 式

測定範囲：0～300m

耐 圧：300m

制 度：0.01%

インターフェース：RS485

変換機器：リモートI/O モジュールでRS485 をイーサネットに変換

(16) 水中コネクタ

用 途：耐圧容器と搭載機器を繋ぐ水中コネクタ

数 量：1 式

耐 圧：300m

(17) スラスタ

用 途：水中航走体の制御(前進、後進、上昇、下降、機種左右旋回、機首上下、機体の姿勢角保持、自動方位・深度保持)

数 量：8 台

モーター：三相センサレスブラシレスモーター

動作電圧：7～24VDC

耐 圧：300m

推 力：13.0kgf(20VDC/36A 時) ※動作電圧により変動する。

9.3kgf(16VDC/25.1A 時)

(18) ドップラー式速度計(DVL)

用 途：水中航走体の対地・対水速度、海底までの高度計測

数 量：1 台

最小測定高度：0.1m

最大測定高度：50m
長期測定精度：±1.01%
耐 圧：300m
インターフェース：イーサネット

(19) 姿勢センサ(IMU)

用 途：水中航走体の姿勢角(ヨー、ロール、ピッチ)の計測
数 量：1 式
計測項目：姿勢角(ヨー、ロール、ピッチ)の角度、加速度
精 度： ロール/ピッチ 0.1°、ヨー 0.8°
インターフェース：RS232C

(20) 音響測位装置(USBL)(子機)

用 途：水中航走体の水中位置の計測
数 量：1 台
耐 圧：300m

(21) リング状光学計測器(RPL 耐圧容器)

用 途：2 機の水中航走体が正対するための位置計測器を収納
数 量：8 式
耐 圧：300m
表面処理：陽極酸化皮膜処理

(22) 光学通信装置(高感度カメラ耐圧容器)

用 途：2 機の水中航走体が正対するための位置計測と通信する機器を収納
数 量：1 式
耐 圧：300m
表面処理：陽極酸化皮膜処理

(23) 非常用バラスト投下装置

用 途：水中航走体の緊急時浮上用
数 量：1 式
方 式：電磁石型
耐 圧：300m
表面処理：陽極酸化皮膜処理
非常用バラスト：2kg

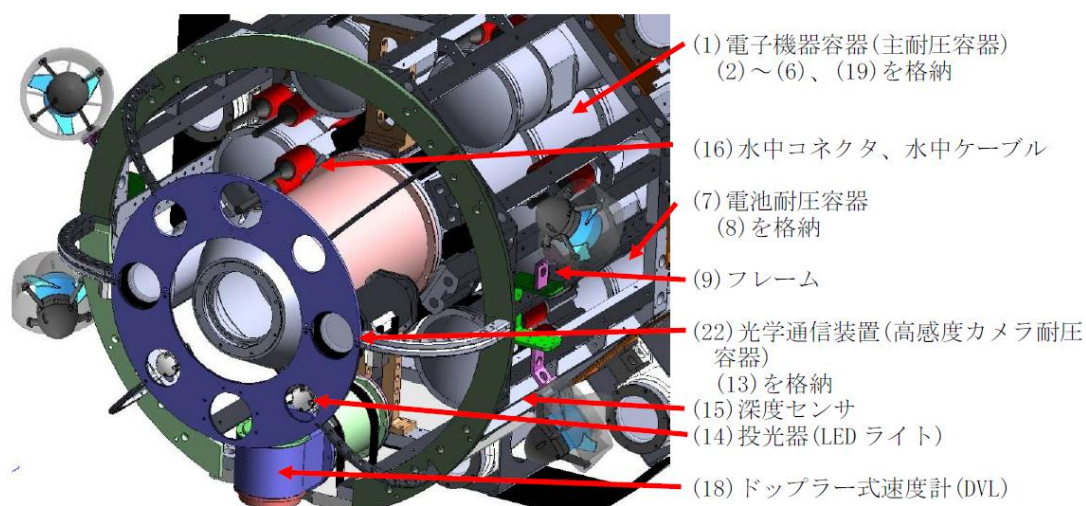


図5-1-22 内部構造図_正面上斜め

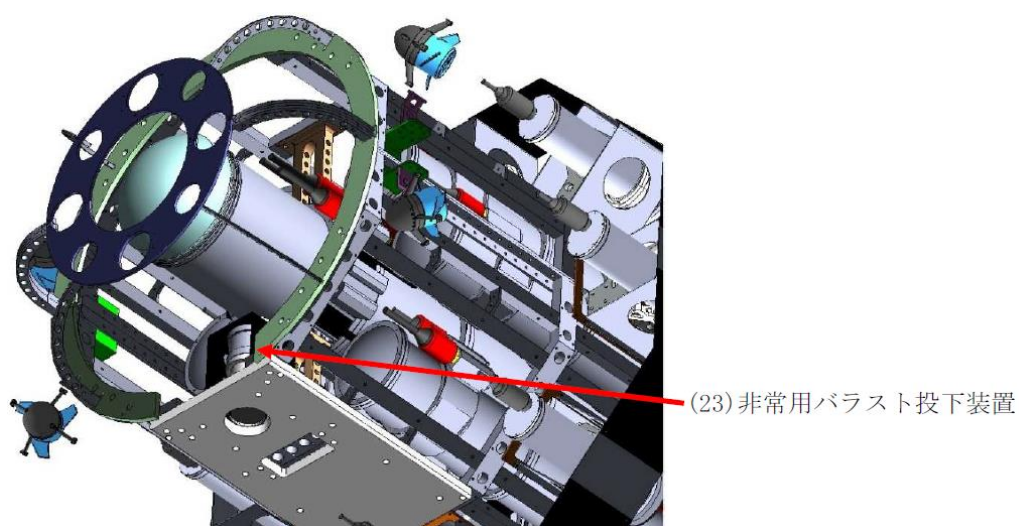


図5-1-23 内部構造図_背面下斜め

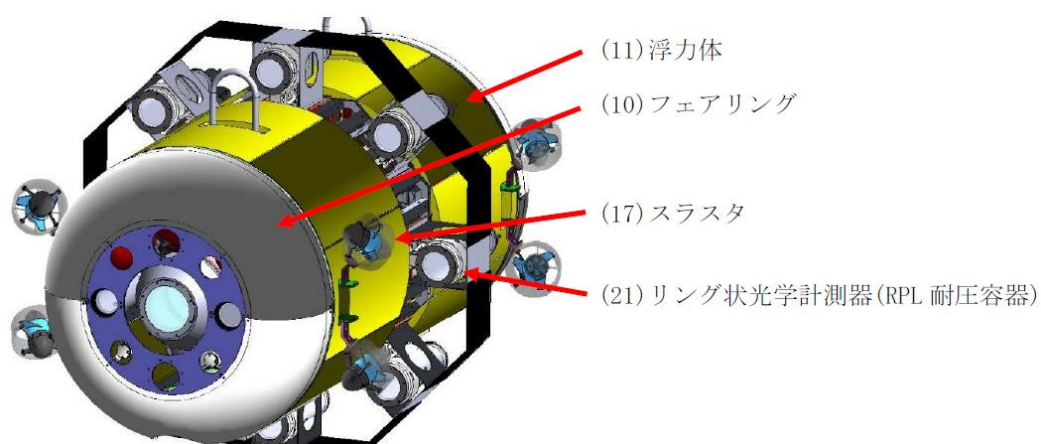


図5-1-24 内部構造図_正面斜め上(外側)

機器の接続概略図を図5-1-25に示す。水中航走体には下記の5つのモードがある。

「Stand By mode」：各アクチュエータに対して中立指令（0推力指令）を出力する。

「Semi-Auto mode」：機首尾方向（Surge）、左右方向（Sway）は手動モードでの制御を行う。機体上下方向（Heave）、機首方位（Yaw）及びトリム角方向は、深度保持、方位保持、トリム保持として、任意の組合せで自動制御のON / OFFを選択することができる。

「Auto mode」：機首尾方向（Surge）、左右方向（Sway）、機体上下方向（Heave）、機首方位（Yaw）及びトリム角方向の運動を自動制御する。Surge、Swayについては位置制御（東西 / 南北方向）、速度制御（Surge / Sway方向）のいずれかを選択する。（現センサ構成では、速度制御のみ有効）

「Opt mode」：トラッキング / 通信用PCからの制御要求値を使用して、機首尾方向（Surge）、左右方向（Sway）、機首方位（Yaw）、機体上下方向（Heave）及びトリム角方向の運動を自動制御する。

水中航走体オペレーターは船上操縦装置に表示される各センサ値、カメラ映像等から適当な制御モードへの切り替えを行い、適宜指令値を与え、水中航走体を操作する。水中航走体は現在値から得られた指令値となるように方位角、ピッチ角（トリム角）、ロール角、上下方向（深度）を自動制御する。本水中航走体を用いることにより、実海域においても良好な試験が実施可能である。次項にてトラッキング機能について記載する。

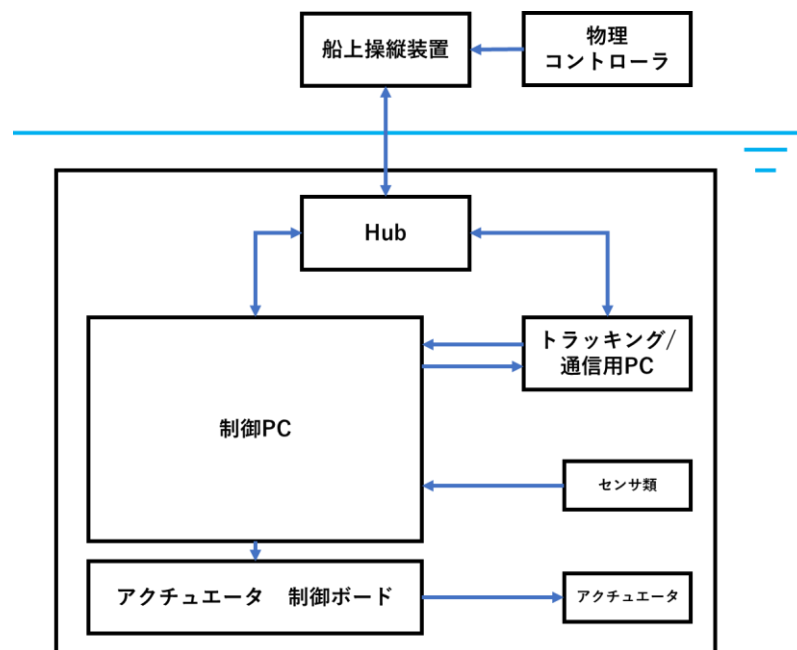


図5-1-25 機器接続概略図

⑤－２．リングパルスレーザと水中航走体の同期制御機構の開発

水中で互いに向かい合うよう制御される2台の水中航走体を構築した。本システムでは、航走体が相手の方位を検出し、動的に姿勢を調整することで、常に正対する状態を維持することを目的としている。水中航走体には、姿勢制御のためのIMU（慣性計測装置）、深度センサ、ドップラー速度計（DVL）が搭載されており、これらのセンサ情報を基に、航走体に内蔵された制御PCが通常の移動および姿勢保持を行っている。

一方、互いに向かい合わせるトラッキング機能は、通常の航走体の制御系とは独立して構成されている。各航走体には、トラッキング用としてフォトン通信装置、カメラ、

ジンバル機構、そしてリングパルスレーザの搭載を想定しており、これらのセンサ・装置から得られる情報を航走体に別途搭載されている専用のトラッキングPCで処理する構成としている。トラッキングPCは、センサデータをもとに相手機体の方位角を演算し、その情報を機体制御用PCに送信することで、航走体はその値を目標方位として受け取り、自身の方位を制御する。これにより、各機体は水中において互いの方向を検知し、自律的に正対する動作を継続的に行うことができる。

今回の水槽試験では、トラッキングシステム全体の動作フローを確認することを目的とし、トラッキングPCから制御PCへの出力値としてはダミーの方位角を使用した。制御PC側ではこのダミー値を目標方位として受け取り、航走体はその方向に旋回することを確認した。これにより、センサ情報を基にした方向制御が正常に動作することを確認できた。

また、トラッキング機能を有効にした状態で、機体を少しずつ後退させていく機能も追加しており、試験時に求められるトラッキング状態での水中航走体同士の距離を離していくことが可能である。

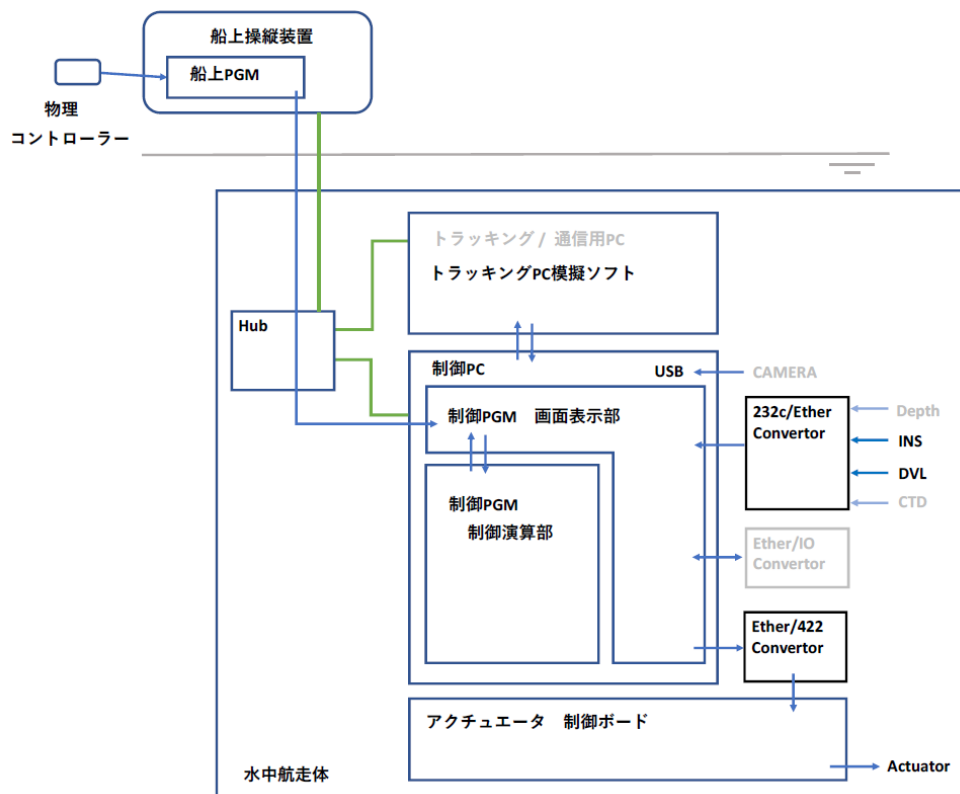


図5-2-1 水中航走体構成概略図

⑥－１．実験水槽などの設備運用、水中航走体の運用ならびに調整、実験データの取得

本項では、水中航走体を用いた光通信試験を水槽にて実施するにあたり、試験に適した水槽環境の選定を行った。試験の特性上、外光の影響を受けにくい環境および十分な試験スペースが必要である。以下に候補水槽の仕様および評価結果を示し、選定理由について報告する。

試験に使用する水中航走体の寸法は長さ：1600mm、幅：1050mm、高さ：1050mmである。上記サイズに対し、十分な移動空間および安全な観察・操作が行える水槽であるこ

とが必要条件となる。候補となる水槽は3つあり、三井造船昭島研究所大水槽、同社小水槽、JAMSTEC多目的水槽である。

三井造船昭島研究所大水槽は長さ220m×幅14m×深さ6.5m（水深6.0m）あり、非常に広大で、水中ロボットの運動性能試験や長距離通信試験に対応可能である。水槽は水に藻が繁殖しないように窓を少なく外光を極力遮断するように設計されているため、光通信試験にも適している構造になっている。深さにも余裕があるため、上下方向の動作検証も実施可能である。

参考：<https://akishima-labo.co.jp/facility/largetowingtank/>

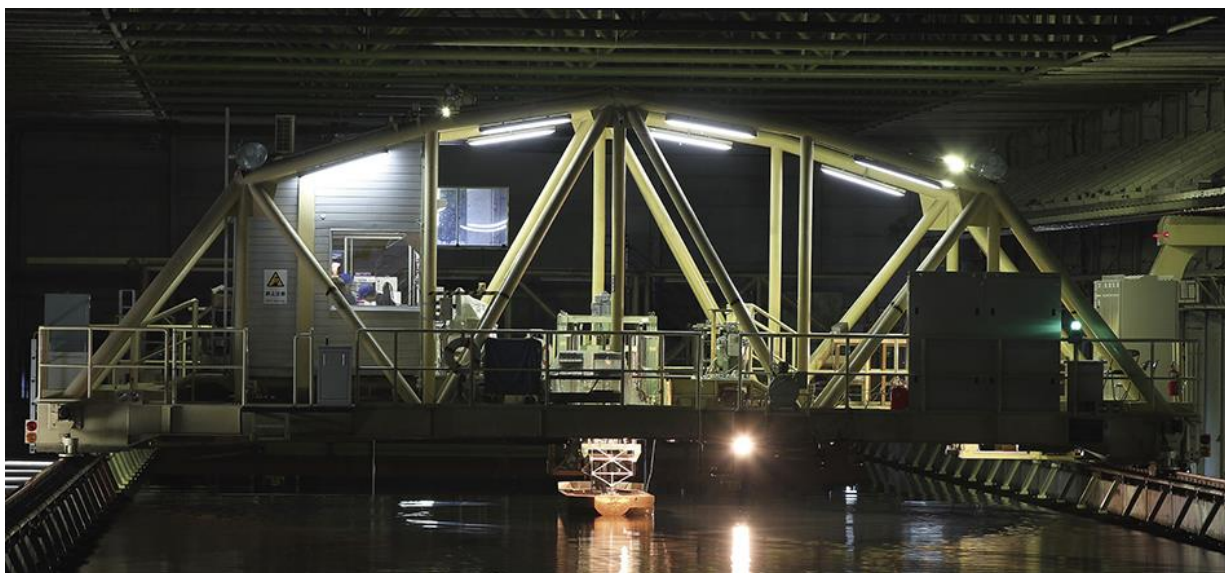


図6-1-1 三井造船昭島研究所大水槽

同社小水槽は、長さ100m×幅5m×深さ2.65m（水深2.15～0.2m）あり、大水槽と比較して小規模だが、水中航走体に対しては十分な空間を確保できる。また窓が少なく、外光の影響が極めて小さいため、光試験に最適である。試験準備・運用面では大水槽より効率的である。長さが100mと大水槽に比べて短くなるため、光試験の長距離通信に限度が生じる。

参考：<https://akishima-labo.co.jp/facility/smalltowingtank/>



図6-1-2 三井造船昭島研究所小水槽

JAMSTEC多目的水槽は長さ40m×幅4m×深さ2.0m（一部2.3m）あり、小型で操作性に優れるが、空間に制限があり複雑な動作検証には不向きである。また、付近に窓が設けられており、外光が侵入する構造となっているため、光試験の実施には不向きである。三井造船昭島研究所小水槽よりさらに短い全長のため、光試験の長距離通信がさらに短いものとなる。

参考：<https://www.jamstec.go.jp/j/about/equipment/yokosuka/hadou.html>

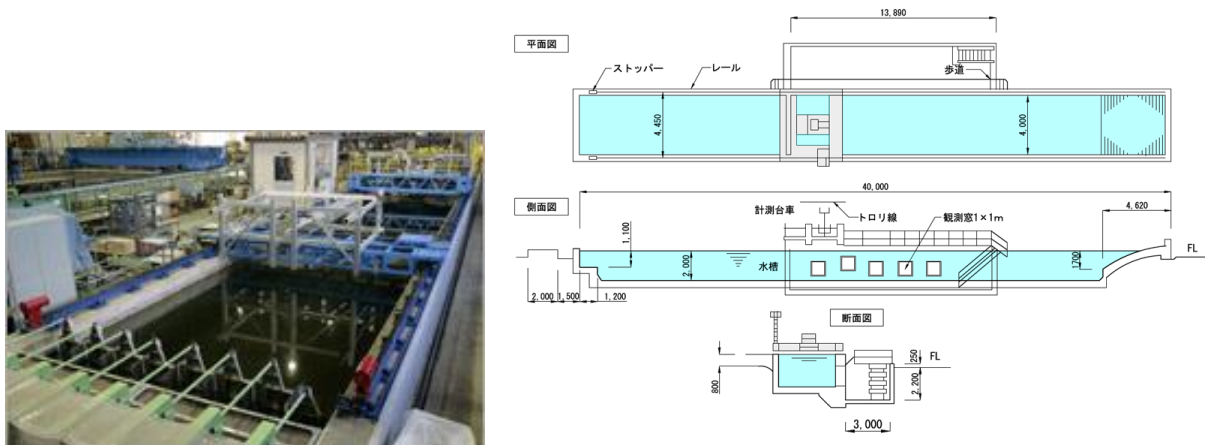


図6-1-3 JAMSTEC多目的水槽

光試験においては、外光を極力排除できる環境が必須である。その観点から、窓が少なく暗環境を確保しやすい昭島研究所の大水槽および小水槽が有力候補となる。また、水中航走体の寸法に対して十分なスペースがあり、安全かつ安定した試験運用が可能である。試験内容に応じて、広範な移動試験や長距離通信試験を行う場合は大水槽を、小規模・短距離の試験の場合は小水槽を選定する方針とした。これらの水槽が使用不可の時の代案としてJAMSTEC多目的水槽を予備水槽と位置付けた。

⑥ー2. 光トラッキング制御システムの試験および実験データの取得、実海域での実験に向けたシステムの改修や調整

⑥ー2ー1. 実験水槽におけるレーザ光撮影検証

水中航走体同士の距離が数メートルから数十メートルといった極近距離での初期位置合わせにおいては、OCC (Optical Camera Communication) による双方向通信を行いながら、カメラを用いて相手機の光源を捕捉・トラッキングをする方式を用いることで、安定した初期位置合わせの実現を目指す。この方式の実現性を確認するため、水中環境におけるカメラでのレーザ光の見え方を評価する検証を東京海洋大学越中島キャンパスの実験水槽（長さ 50m、幅 5m、水深 2m）にて実施した。

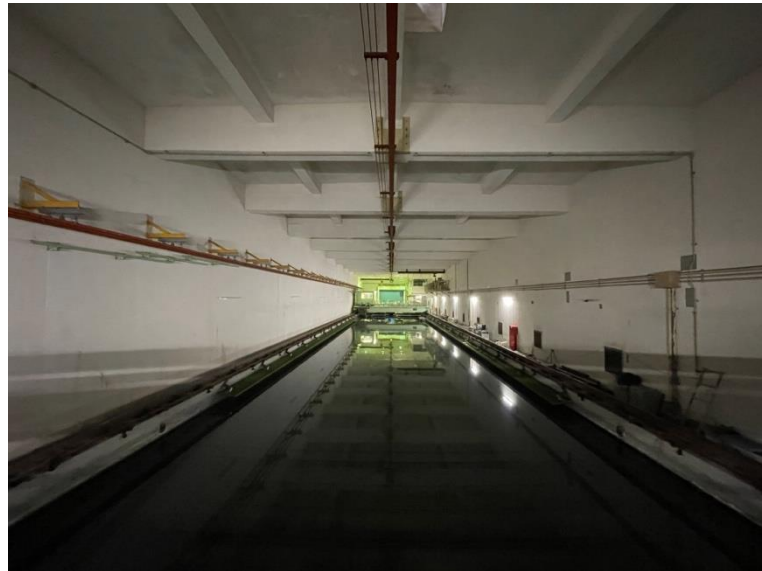


図 6-2-1 東京海洋大学 実験水槽

実験水槽は無色透明の水道水であり、外光の影響を排除するため照明を落とした暗室環境とした。光源には、RPL レーザでの使用を想定している波長 450nm、出力 1W の可視光青色レーザモジュールを採用し、水槽底面のパレットに固定して鉛直上向きに配置した。撮像カメラとして、汎用 Web カメラ BSW505MBK (CMOS 1/4 型、F2.0 固定焦点) と産業用カメラ DMK33UX273 (Sony IMX273、グローバルシャッター、レンズ $f=3\text{mm}$ 、F1.8) の二種類を準備し、同一条件下で比較撮影が行えるよう筐体内に並列に配置した。両カメラは水面上を走行する移動電車にケーブルで吊り下げ、レーザ光源と同じ水深に位置決めしたうえで、移動電車の走行により光源からの奥行き距離 (z 方向) を 1m から 35m まで変化させた。さらに、移動電車上の横方向オフセット (x 方向) を 0m、0.5m、1.0m に設定し、カメラ姿勢をヨー方向 0° から 45° で傾斜させ、奥行き距離・オフセット・角度が異なる各状態を組み合わせ、60s ずつ連続撮影し MP4 形式で保存した。これにより、水中航走体を実運用で遭遇し得る相対位置・姿勢条件を再現し、本方式の実装可能性を検証するための撮像データを取得した。

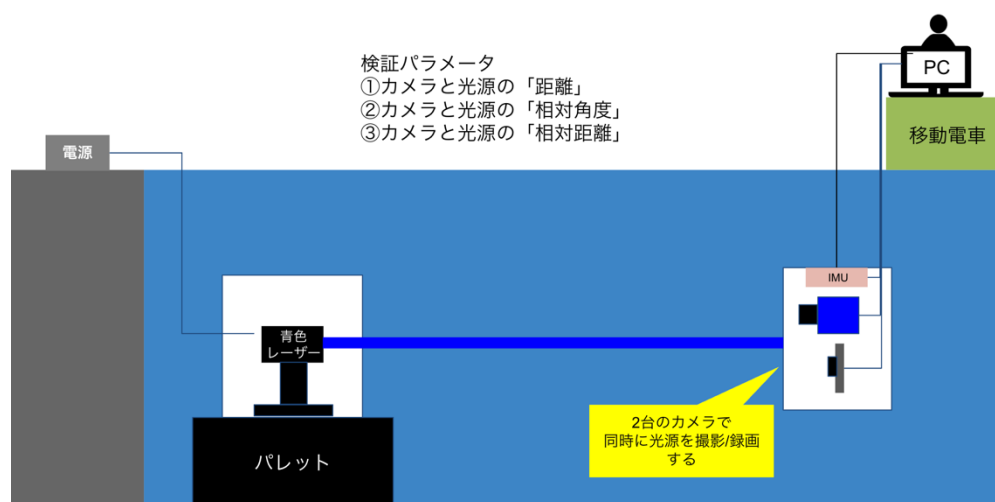


図 6-2-2 実験水槽におけるレーザ光撮影検証

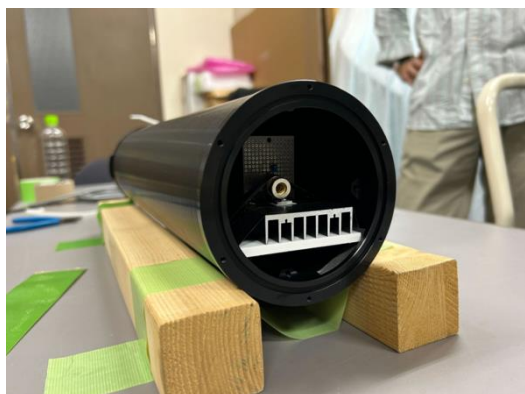


図 6-2-3 レーザー光源

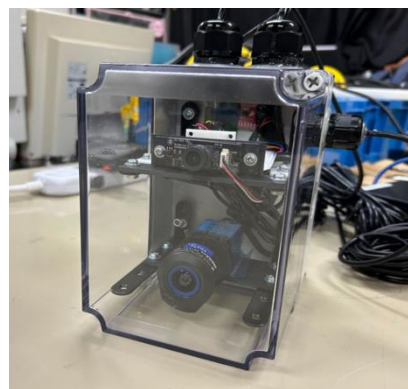


図 6-2-4
カメラ(上:Web カメラ/下:産業用カメラ)

実験の結果、汎用 Web カメラでは最大距離が 20m、産業用カメラでは 35m に達してもレーザ光を安定して視認することができた。さらに、産業用カメラは横方向 1m のオフセットやヨー方向の角度誤差が最大 45° に及んでも 35m 先の光源を捕捉し続け、視認距離と姿勢許容度の双方で優位性を示した。また、取得した動画フレームに対し輝度閾値処理とラベリングの画像処理を適用したところ、光源検出が可能であることも確認した。トラッキングにおいては、レーザ光源部が存在する位置を正確に特定する必要があるが、特にオフセットや角度が大きい場合にはレーザの散乱軌跡が線状に伸びる状態で撮像されるため、単純な方法で光源位置を特定することはできない。そこで、散乱軌跡内の輝度値分布に着目し、バウンディングボックスを複数領域へ分割したうえで、発出部と終端部の輝度差を利用して最も輝度の高い領域を光源位置として判定するアルゴリズムを開発した。この成果は、水中航走体間の OCC とトラッキングを一体化する方式の実用性を裏付けるものである。

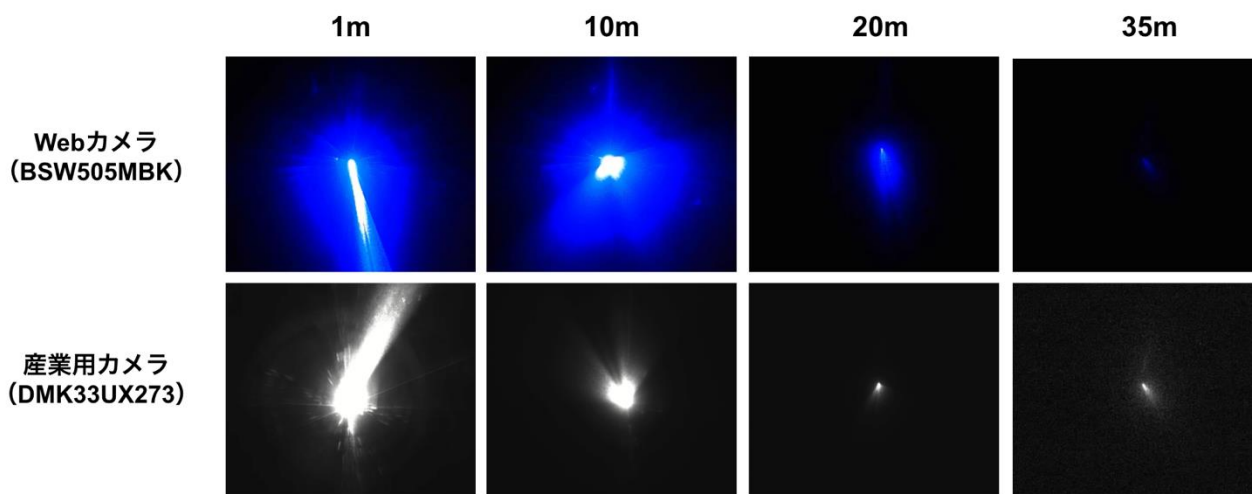


図 6-2-5 レーザ光の撮影画像

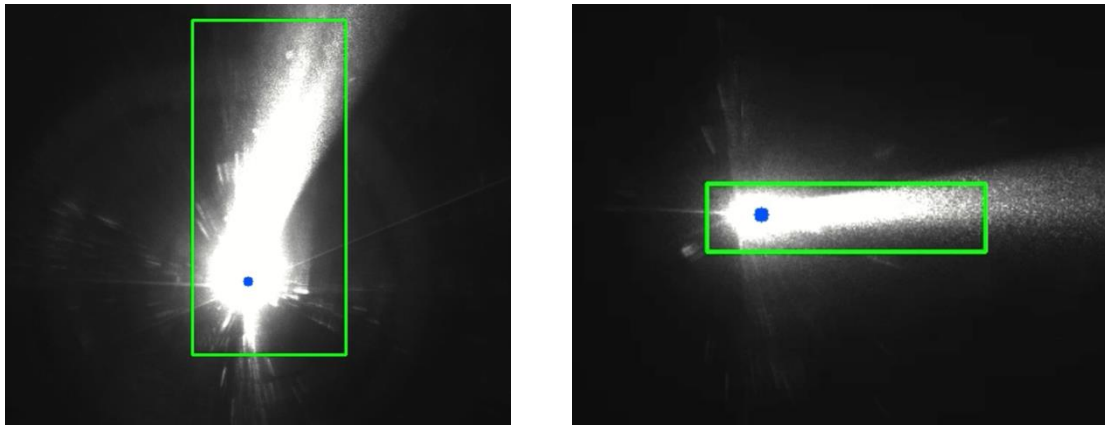


図 6-2-6 画像処理によるレーザ光源の検出および位置推定結果
(緑枠:光源のバウンディングボックス / 青点:推定した光源位置)

一方で、光源輝度の変動に応じてカメラのゲインおよび露光時間を自律的に最適化する機構が不可欠であり、今後はカメラ側にも搭載される自機レーザ光がセンサを飽和させないように光学フィルタリングや同期制御を検討する必要があると考えられる。また、実験水槽は無色透明の低濁度環境であったため、実海域に特有の濁度・散乱・吸収の影響を評価する追加検証が必要である。

⑥－３．精追尾および粗追尾用レーザ光源および光子受信機の試験および実験データの取得、実海域での実験に向けたシステムの改修や調整

⑥－３－１．精追尾のレーザ光源及び光子受信機の試験及び実験データの取得

１．SPAD入射光量対BER(Bit Error Rate)の測定

本方式では1Frameは7488bitsで64k Frames(1k=1024)を連続光伝送し、Frame毎のビットエラー数から平均値を求めてBERとした。光量が小さくなるにつれて測定環境の影響が出始めて、100nW以下になるとバーストエラーが混入し始める。BERとしてはバーストエラーを除去して求めた。

通信用FPGAからは訂正前のエラー数を取り出せるが、訂正後のエラー数がモニターできなかったためBERは訂正前の値となっている。

BPSKや2-PPMの場合Qの逆関数にBERを入れて二乗するとSNR (Signal to noise ratio) の近似値が求められる。これよりシャノンの定理を使って通信容量(bps)を求める事が出来る。一般に無線通信でのBERは 10^{-6} 以下が求められていることから、通信容量が250MbpsでBERが 10^{-6} である時の通信路の帯域幅 (Hz) は約55MHzとなる。この値を使って通信容量を求めた。

入射光量対BER及び計算で求められた通信容量を表6-3-1に示す。

表6-3-1

光量	BER	通信容量
1 μ W	7.83E-05	2.16E+08
100nW	1.54E-02	1.38E+08
30nW	4.19E-02	1.10E+08
10nW	5.02E-01	1.50E+03
5nW	5.02E-01	1.50E+03

SPADへの入射光量が30nWで110Mbpsになり、光量が30nW未満になると急激に悪くなっている。悪化原因の一つは、100nW未満から測定環境の問題が出始めることから、海中での状態を再現する事は出来ておらず（大気中の電波の影響の除去）測定環境の工夫が必要である。

開発したフォトン受信機はTurbo符号を用いて誤り訂正を行っている。表6-3-1の30nWの結果を用いて訂正後のBERを求めてみる。30nWでの通信レートは110Mbps、SNRはBERが4.19E-2であるから約5dBになる。本システムでは符号化率80%となっておりこれらのパラメータから計算すると、訂正後のBERは10⁻⁶を超える値となる。実海域対応としては復調方法の改善が必要となるかもしれない。

2. トラッキングサーボにおいてPhoton-count modeでの限界最小光量の実験

界最小光量とはトラッキングサーボがかからない時のSPAD入力光量を言う。NDフィルタで光量を減少させた時発振現象が起きた後サーボが外れる。これはトラッキングサーボ信号が正しく検出できなくなる為と考えられる。発振現象が現れる装置入力光量と1SPAD当りの光量、サーボが外れる装置入力光量と1SPAD当りの光量の測定値を表6-3-2に纏める。

表6-3-2

	発振ポイント	サーボ限界
装置入力光量 (nW)	39.33	5.49
1 SPAD当りの光量 (nW)	3,54	0.49

4分割プリズムでロスなく光量が4分割されたとすると、4分割前で2nW以下になるとサーボが外れる事になり、通信品質では30nW未満になると極端に悪くなるという結果となった。光量減少に対して通信品質が先に悪くなり、サーボはその後限界を迎えるのは設計思想にあった結果と考えられる。今回の実験では、100nW未満になると測定環境の影響が出始めており、実力値はもう少し高い所にあると考えられる。

なお、本項目における令和6年度の目標として、業務計画書には『実験水槽内において距離40m以上で通信速度100Mbpsの光通信を実現することを目指す』と記載されていたが、本プロジェクト期間中には、水中航走体2機を用いたシステム全体の統合と、この具体的な目標条件下での実験水槽試験を実施する段階には至らなかった。各要素技術の開発、水中航走体の製作と調整、および個別の性能評価に注力した結果、期間内での総合的なシステム実証には時間的な制約が生じたためである。実験データ

からは海洋実証に耐えうるポテンシャルを示したが、水槽実験が未実施であることを付記する。

3. 実海域での実験に向けたシステムの改修や調整

これまでの検討結果よりトラッキングサーボにおいて、自動ゲインコントロールが必要となっている。方式について説明する。

サーボアナライザの原理から、ある周波数の信号をサーボがかかった状態で系の安定性を損なわないレベルで外乱として加え、サーボ系のある個所から加えた外乱周波数の成分をフィルタで取り出し、ゲイン、位相を測定してそのどちらかまたは両方を用いて設計値からのずれを計算してゲイン量を求め、ゲインコントロールを行う方式を検討した。

本システムでは100Hzでゲインが0dBとなる様にPID設計されている。図6-3-1に破線が設計値で実線がゲインが上がった状態を模式的に表す。

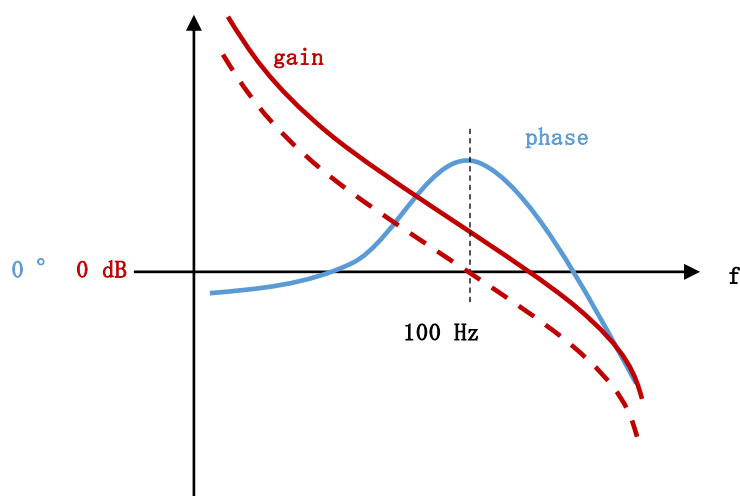


図6-3-1

これより加える周波数は100Hzとする。ブロック図を図6-3-2に示す。

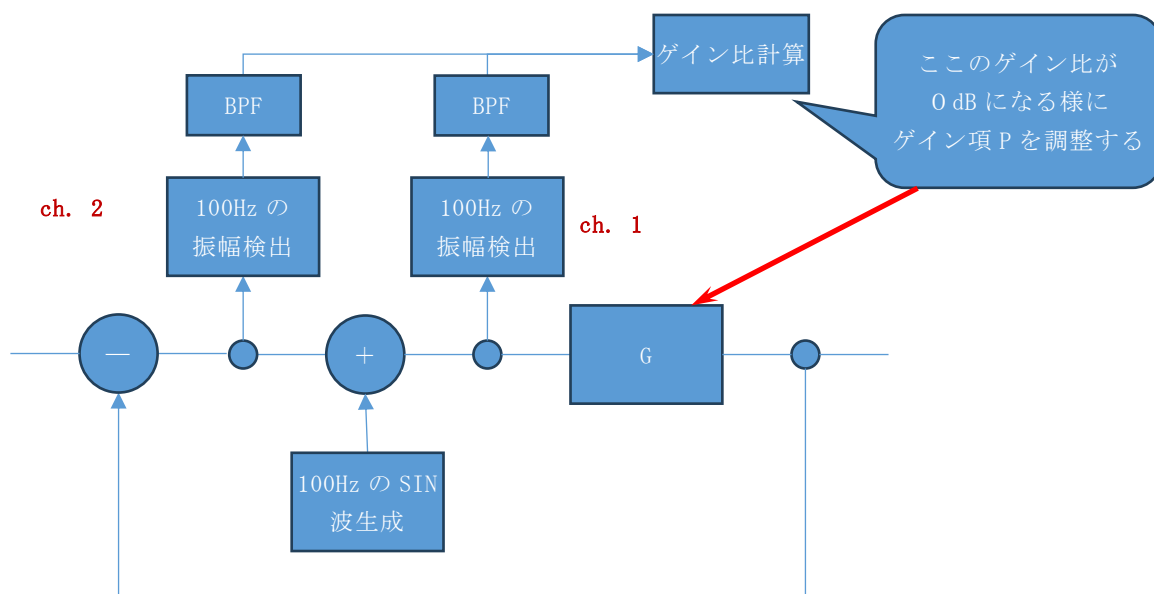


図6-3-2

100HzのBPFを用いて100Hz成分を抜き出しゲインコントロール信号を計算する。サーボアナライザでは測定ノイズを低減するために周波数ポイントで平均値を求めるが、本システムでも100周期分のデータよりゲインコントロール信号を算出している。

自動ゲインコントロールを行うタイミングであるが、常時行い続ける方式や何らかのトリガーを用いて適宜行う方式ある。これまでの検討から通信機間の距離ベースにトリガー掛けて適宜行う方式が良いと思われるが、海中試験で最終決定を行う必要がある。

4. 通信機間の距離を取ったのトラッキングサーボ評価

ビームエキスパンダを装着した2台の通信機を光学的に対向させて、スパイラルスキャンからトラッキングサーボ引き込み動作を行い、サーボアナライザによりオープンループ特性を測定した。LD光は通信用FPGAを用いて変調され、受信部では通信用FPGAを用いて復調を行い、通信エラーの状態をモニターした。

レーザ光を扱う実験となる為実験を行う施設としては、関係者以外は立ち入ることが出来ず、距離が取れる室内で安全性が確保できる場所を選定した。

LDの出射光量は安全の為下げて行っている。

図6-3-3に実験環境を示す。

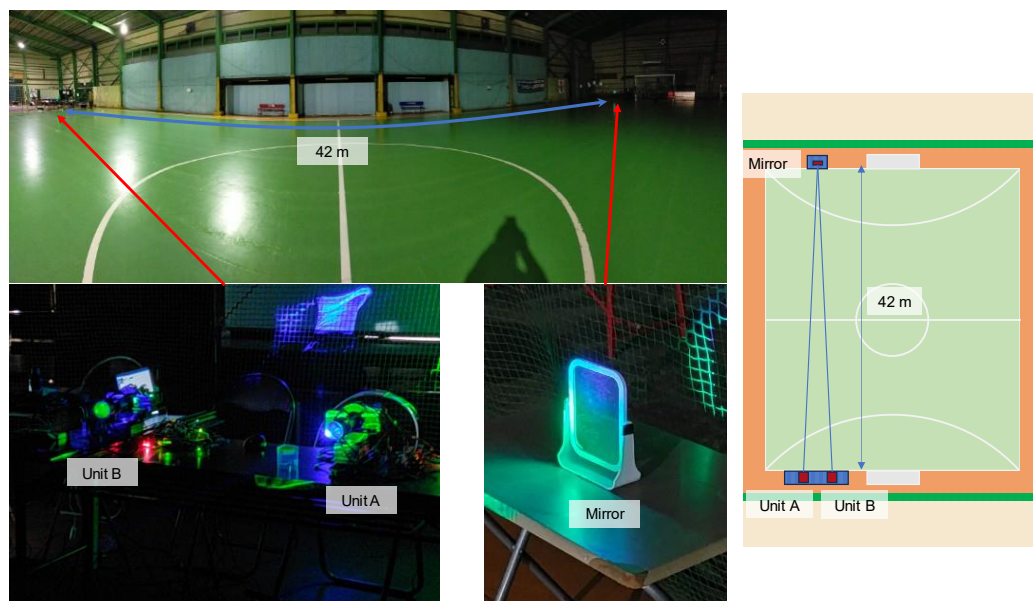


図6-3-3

実験場所は室内競技場でシャッターを閉めると閉空間となる。レーザ距離計で距離を計測し片道42m、ミラーで折り返して往復84mの装置間で実験を行った。

スパイラルスキャンは図6-3-4に示す様にrow size及びsample pintを指定して
回転速度やrow間隔を決めていく。

表6-3-2に通信機UnitAとUnitBのパラメータを記載する。

表6-3-2

	UnitA	UnitB
Row size	144	112
Sample pint	18	24

UnitAとUnitBのパラメータが違うのは、機器が持つ個体差に対応する為である。

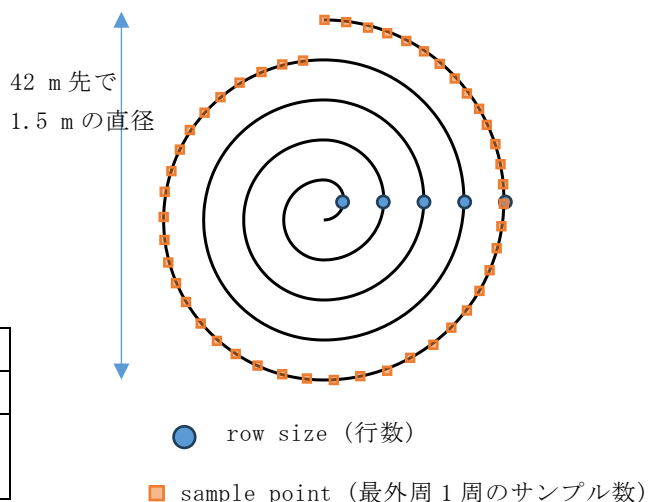


図6-3-4

図6-3-5に測定したオープンループ特性を示す。

図中実線は測定結果で破線は設計値を示す。赤の線はゲインを青の線は位相を示している。サーボアナライザの性能上低域部分の測定が困難であったことから、低域部分の測定結果は表示していない。

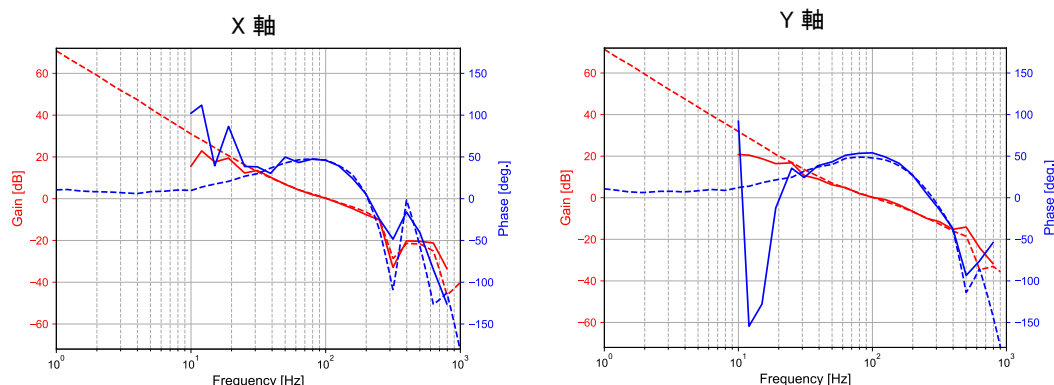


図6-3-5

設計値としては1Hzでゲインは71dB、10Hzで31dBとなっている。また位相余裕はx軸方向で45.3°、y軸方向で47.8°となっていて、ゲイン余裕はx軸方向で6.8dB、y軸方向で11.0dBとなっておりオープンループ特性として問題無い結果となっている。

⑥－３－２．粗追尾のレーザ光源及びフォトン受信機の試験

「②－２．リングパルスレーザ装置の水中航走体センシング用レーザ光源およびフォトン受信機の研究開発」を参照の事。

⑦－１．船舶などの設備運用、水中航走体の運用ならびに調整、実験データの取得

④－１にて調査を実施した海域にて使用可能な船舶の選定を実施した。下田沖にて使用可能な船舶として選定したのは、海洋研究調査船「つくばⅡ」である。同船は筑波大

学下田臨海実験センターが所有しており、海洋調査研究等に用いられている。全長17.9m、全幅4.8m、総トン数19トン、定員40名となっている。船尾側には吊上げ荷重1トンのAフレームクレーン（門型のクレーンで脚部の間で物を吊上げ、吊り荷をこの脚部の間を通して甲板上から海上へと移動させることができる）を装備している。同船は日程調整が容易であり、傭船費についても十分対応可能なものである。

参考：<https://www.shimoda.tsukuba.ac.jp/archive/tsukuba2.html>

一方で船上での水中航走体の取り回しについて検討すると、水中航走体の着水揚収作業には船尾に装備されたAフレームクレーンを用いることになる。そのため、水中航走体2機はAフレームクレーンにより吊上げ可能な船尾側の甲板上に搭載することが想定される。その場合、同位置に2機を搭載可能であるか検討の必要があり、搭載が実施出来た場合も、船上での整備性が著しく低下した搭載レイアウトとなることが考えられる。そのため、同船を試験実施時の船舶の候補から除くこととした。

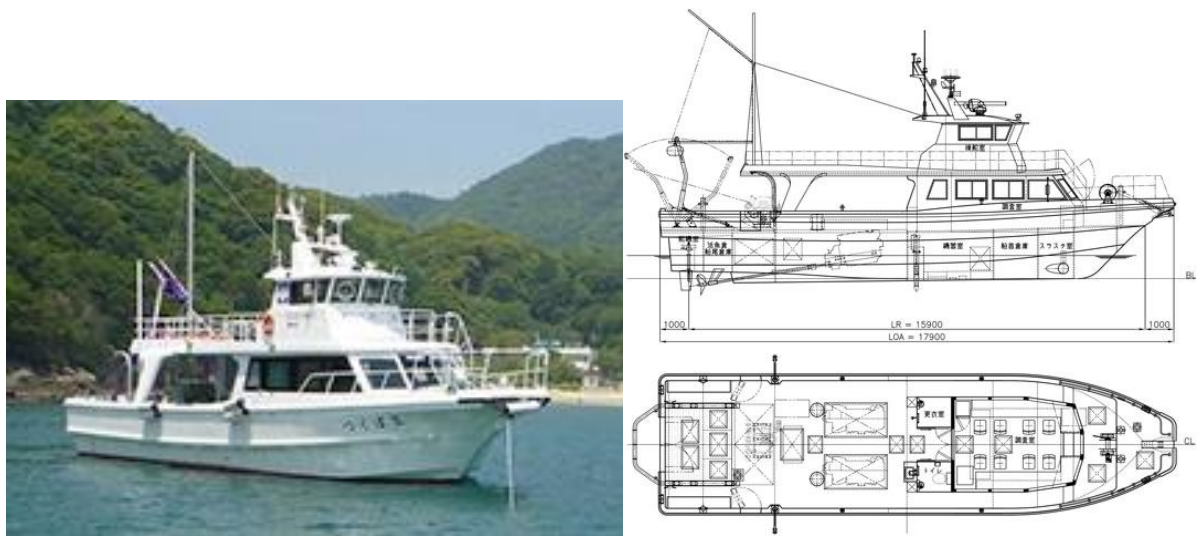


図7-1-1 海洋研究調査船「つくばII」

大島沖及び城ヶ島沖にて使用可能な船舶として選定したのは、交通船兼作業船「うみかぜ」である。同船はヤマグチマリーン株式会社が所有して、交通船兼作業船として用いられている。全長17m、全幅4.3m、総トン数19トン、定員15名（内3名船員）となっている。船尾側には吊上げ荷重0.9トンのAフレームクレーンを装備している。同船は日程調整が容易であり、傭船費についても十分対応可能なものである。

参考：http://yamaguchi-marine.jp/publics/index/45/detail=1/b_id=56/r_id=24/

一方で船上での水中航走体の取り回しについて検討すると、水中航走体の着水揚収作業には船尾に装備されたAフレームクレーンを用いることになる。そのため、「つくばII」と同様に水中航走体2機はAフレームクレーンにより吊上げ可能な船尾側の甲板上に搭載することが想定される。同船は同位置が開けた空間となっており、船上での整備性も損なわれないことが考えられる。また、装備されているAフレームクレーンの耐荷重に対し、水中航走体は十分に吊り上げることが可能な重量であるため、同船を試験実施時の船舶の第一候補とした。

4. 委託業務全体の成果

4. 1 計画時に想定していなかった成果（副次的成果）や、目標を超える成果

本研究の遂行過程においては、当初計画された目標の達成に加え、いくつかの新規手法の創出や、目標値を超える性能向上が見られた。本節では、主な副次的成果および目標超過成果について述べる。

まず、精追尾におけるスパイラルスキャン方式による光引き込み手法の確立は、本研究における重要な副次的成果である。当初計画では、粗追尾で捕捉された水中航走体の光学的捕捉・追尾に際し、RPL直径の範囲内で精追尾のビーム径を可変させることで引き込む手法を検討していた。しかし研究を進める中で、ガルバノミラーを用いて螺旋状にビームを走査するスパイラルスキャン手法を考案し、通信相手からのわずかな光子信号を効率的に検出できることを示した。このスパイラルスキャン方式は、単純なビーム径拡大に伴う光強度低下の課題への対応を考慮しつつ、両航走体間の初期位置ずれが大きい場合や相対的な揺動が存在する条件下においても、自律的かつ迅速に光軸を正対させることを可能にする有効な手法である。「①-1. 精追尾および通信用レーザ光源の開発ならびにフォトン受信機の研究開発 ①-1-3. フォトン受信機の研究開発 4. サーボ回路 4-2. 課題の解決方法 ii) サーボの引き込み動作」にスパイラルスキャンによる引き込み動作研究成果を記載したが、実験では、擬似的に大きな角度範囲で外乱走査を行い、従来手法では捕捉が困難だった条件下でもスパイラルスキャンにより確実にトラッキングサーボが「引き込み」できることを確認している。2台のトラッキングサーボシステムを搭載している機器において、相互間の採用できるスパイラル周波数レンジが表1-1-3に示される様に広い事が証明されており、通信に限らず給電など他の目的においてもトラッキング引き込み動作においてスパイラルスキャンを採用する場合も、ミラー駆動装置の仕様は広くなり選択肢が増えると考えられる。この手法は本研究を通じて生まれた新たな光学的追尾アルゴリズムであり、水中通信のみならず様々なユースケースにおける初期ビーム捕捉を要する場面で応用可能な汎用性を持つ点でも意義深い。

また、「②-2-3. RPLフォトン受信機の研究開発 2. 受信部」において、RPLシステムが成立する最小photon数は120個で光量は約35pWとなった。全体のシステムで光量の限界は、通信約30nW、トラッキングサーボ約5nWそしてRPLシステム約35pWという結果となり、通信可能期間中トラッキングサーボ、RPLシステムが機能するという受光量に関する研究目標を達成している。RPLシステムが、精追尾用通信システムや精追尾サーボの限界値を下回る約35pWという微弱光でも機能しうる可能性が示されたことは、RPLの主目的である粗追尾において、高い感度マージンと運用上の冗長性を持つことを示唆している。本システムでは2台のROVが安定して離れていくことを主眼としてRPLシステムが構成されているが、たとえば水中航走体の帰投制御などのユースケースにおいて、遠く離れたROVが母船から照射されたビームを検知し、photon数が増加する方向にROVを制御することで母船方向に距離を縮めるといった活用の可能性があると考えられる。

さらに、本研究における高度に複合的なトラッキングアルゴリズムをシミュレーション可能なツールの開発は、本プロジェクトのアルゴリズム検証に貢献するだけでなく、将来の関連システム開発において、設計、検証、最適化を効率的に行うための有用な基盤となり得る。その構築は、当該技術分野における研究開発能力の向上と開発手法の進展に寄与する成果である。

4. 2 研究課題の発展性（間接的成果を含む）

本研究で得られた、フォトンレベルの微弱光検出を基盤とする光トラッキング技術および関連する水中光無線通信技術の成果は、当該分野の技術的フロンティアを押し広げるも

のであり、関連する学術分野および広範な産業分野への多大な波及効果が期待される。特に、本研究における精追尾技術と粗追尾技術の組み合わせ、およびそれぞれの役割分担は、今後の水中光トラッキングシステム設計における有用な指針となり得る。以下に両技術の特性、役割、そして協調動作の必要性について改めて詳述する。

まず学術面では、本研究は水中光無線通信分野における新機軸の創出として位置付けられる。従来の水中光通信研究の多くは、光チャネルの物理モデリングや通信手法に焦点が当てられており、通信機同士の自律的なビーム追尾については十分に検討されてこなかった。従来の水中光無線通信研究では高速で動的なターゲットへのリアルタイムな光軸合わせという課題には踏み込んでおらず、通信距離も短距離に限られていた。これに対し本研究は、光子レベルの検知能力を持つ新型フォトン受信機とリング状パルスレーザ光源による独自のトラッキング機構を組み合わせることで、移動目標に対する長距離・高精度なビーム追尾と高速通信を両立させることが可能であることを示した点に新規性がある。すなわち、従来は人手に頼っていた水中での光軸調整を、自律型システムで実現した初めての例であり、本技術により水中光通信の応用範囲が大きく拡大すると期待される。

産業・応用面に目を向けると、本研究成果は広範な海洋利用シーンへの展開が可能である。例えば、これまでテザー（有線ケーブル）に依存していたROVの運用において、本技術を適用すればリアルタイム映像伝送を含む高速無線化が実現し、広域かつ自由度の高い海中探査が可能となる。またAUVに本技術を搭載すれば、従来は不可能だった大容量データの逐次回収や複数AUV間の協調通信ネットワークの構築が見込まれる。特に我が国のような排他的経済水域の広大な海洋国家では、洋上インフラ点検、海底資源調査、災害時の水中ロボット活用など、大容量の海中通信需要が今後高まると考えられる。本研究で確立した技術は、そうした次世代の海中無線ネットワーク基盤として寄与し得る。さらに、本技術は通信だけでなく光ワイヤレス給電への応用可能性も有している。当初想定していなかった応用ではあるが、RPLによる高精度な対象の追尾やスパイラルスキャンによる汎用的なビーム引き込みが可能となったことで、水中航走体へのレーザ給電（エネルギー伝送）を行う際のビーム指向制御にも展開でき、将来的には長時間連続稼働する無人潜水機の実現などにつながるポテンシャルがある。

なお、本研究の遂行過程において、実用化に向けたいくつかの技術的課題も認識された。主なものとしては、第一に海水の濁度といった環境要因による通信可能距離の制約が挙げられる。水の透明度次第では、たとえ高出力レーザを用いても数十m程度で光がほぼ減衰しきってしまい通信が難しくなるケースが想定される。実際、300m伝送時の減衰率は場所によって 10^{-7} からPhoton DCR Countの閾値を下回る 10^{-12} 未満まで大きな開きがありうる事が判明している。このため、沿岸の濁った海域では本技術単独ではカバーしきれない範囲が残る可能性がある。この課題に対しては、光通信と音響通信を組み合わせたハイブリッド運用や、中継ノードの配置による分割伝送などにより対応できると考えられる。第二に、実海域でのシステム運用上の堅牢性である。波浪や海流による予測不能な機体動揺、長時間稼働によるレーザ光源の熱問題、海洋生物やマリンスノーによる光学窓面の劣化など、実環境特有の要因が通信品質に影響を及ぼし得る。これらのボトルネックを解決し信頼性を高めるための工学的改善（防汚コーティング、センサフュージョンによるアクティブ安定化機構、動的な光パワー制御等）は、今後の発展課題として残されている。しかし、これらの課題に対する検討も本研究内では議論されており、課題解決に向けた仮説検討は進んでいる。例えば機体姿勢変動に関しては、センサフュージョンによる高精度な慣性制御で一定程度補償可能であることがプロジェクト内の議論で示唆されている。このように、本研究で明らかになったボトルネックへの対策検討自体が新たな研究課題となっており、関連分野の発展につながるものと考えられる。

4. 3 研究成果の発表・発信に関する活動

本研究プロジェクトの主要な実証試験は令和7年度以降に計画されていたため、令和6年度末までの期間における外部への研究成果発表・発信活動は、令和5年3月24日に防衛装備庁艦艇装備研究所主催の「研究成果活用ワークショップ（海洋監視関連）」にて本研究の概要と進捗状況を発表したに留まる。

5. プロジェクトの総合的推進

5. 1 研究実施体制とマネジメント

研究実施機関3社とその下請け先企業を含めた本プロジェクトに関わる全ステークホルダーの代表者による進捗確認会を、毎週火曜日に開催し、研究の進捗状況の報告とともに、研究の進展に伴って発生した新しい課題や解決策について討議した。発生した課題については、課題一覧表を作成し、都度課題の棚卸しを行うことで管理した。さらに議事録を作成して、重要な学術情報や主要な測定結果などを共有して研究の推進を図った。また、各機関で分担して担当する研究項目のうち、相互に関係の深い研究課題については、担当機関間で随時個別の打合せを行った。具体的には、下記の組み合わせによる打合せである。

- i) 水中航走体製作機関と水中航走体制御ソフトウェア開発機関
- ii) 光無線通信機製作機関と光無線通信制御ソフトウェア開発機関
- iii) 水中航走体制御ソフトウェア開発機関と光無線通信制御ソフトウェア開発機関

5. 2 経費の効率的執行

OCC用カメラ選定のための評価においては、すでに保有しているカメラ機材を有効活用し評価検証をおこなった。RPL原理試作機の開発では、組み立て部材の購入においてスケジュールを調整しながら、評価に必要な部材の購入は最小限に抑え、無駄のない資材調達に努めた。水中航走体の製作等高額機器の製造においては一般競争入札をおこない適正な取引を実施した。海域調査においては、早い段階で試験海域の候補を見定め調査回数を減らし、さらには、令和7年度の調査は不要とする見通しをつけることで調査費用の削減に努めた。代表者による進捗確認会において、研究開発の設計及び開発スケジュールと常に調整しながら、これら効率的な経費執行を実現した。

6. まとめ、今後の予定

本報告書は、「水中航走体用レーザ通信に向けた光トラッキング技術の研究開発」に関し、令和4年度の開始から令和6年度末までの主要な研究開発成果を総括するものである。本研究は、海中における長距離・大容量無線通信の実現という課題に対し、フォトンレベルの光検出技術を基盤とし、リングパルスレーザによる広範囲粗追尾と通信用レーザによる高精度精追尾を協調させるという、光トラッキング方式の開発を目指した。本研究では、海中における長距離・大容量通信を実現するという目標に対し、リングパルスレーザとフォトン受信機を用いた独創的な光トラッキング方式を考案・実装し、海洋実証に向けた事前検証において十分なポテンシャルを示し、その有効性を示した。従来は人手やケーブルに頼らざるを得なかった水中通信において、自律的なビーム追尾と高速データ伝送を両立しうる技術的ポテンシャルを示したものであり、将来の水中ロボットの運用や海洋観測の在り方に貢献し得るものである。令和6年度中の目標としていた水槽実験は、部品調達の遅れや水中航走体の納期遅延により準備が整わず未実施となったが、実験室レベルでの検証やシミュレーションにおいては、300mという実用水準の距離で100Mbps級の通信が可能となる潜在性が示され、

これは水中ドローン群による監視・探索や洋上インフラ点検といった多様な応用への可能性を示唆するものと期待される。

令和6年度の具体的なシステム統合実証目標である『実験水槽で粗追尾装置および精追尾装置を載せた状態で水中航走体を離間距離40mにて正対させ、また、その状態でフォトン通信を確立し、速度100Mbpsで5分間維持する』について、期間内にその実施まで至らなかったことで、本技術の統合システムとしての有効性を最終確認可能なデータの取得には至らなかったものの、本報告書で詳述した各要素技術の開発成果およびシミュレーション結果は、目標達成に向けた高い技術的実現性を示唆している。

なお、本研究による十分なデータ収集と当初の想定を上回る一部の成果を踏まえ、研究代表機関および参画機関はR7年度以降実海域での更なる総合実証および発展研究に着手する計画であったが、研究中止の判断を受けたため、今後の取り組み予定は無い。しかしながら、本研究により確立された要素技術群は、この目標達成に向けた高い技術的実現性を示唆している。実海域での実証を通じて本技術の統合システムとしての最終的な有効性を検証する機会は無かったが、本研究で得られた知見と技術的資産は、今後の同分野の研究開発に貢献するものとする。

7. 研究発表、知的財産権等の状況

(1) 研究発表等の状況

種別	件数
雑誌論文	該当なし
学会発表	1件
展示	該当なし
図書	該当なし
プレス	1件
その他	1件

(2) 知的財産権等の状況

該当なし

(3) その他特記事項。

年月日	開催名称	実施場所	備考
令和5年 3月24日	研究成果活用ワークショップ(海洋監視関連)	防衛装備庁 艦艇装備研究所 大会議室	

8. 参考文献

- [1] Vali, Z., Gholami, A., Ghassemlooy, Z., et al. (2017). Modeling turbulence in underwater wireless optical communications based on Monte Carlo simulation. *Journal of the Optical Society of America A*, 34(7), 1187.
- [2] Ramley, I., Alzayed, H. M., Al-Hadeethi, Y., et al. (2024). An Overview of Underwater Optical Wireless Communication Channel Simulations with a Focus on the Monte Carlo Method. *Mathematics*, 12(24), 3904.
- [3] Impulse response of underwater optical wireless channel in the presence of turbulence, absorption, and scattering employing Monte Carlo simulation.