

報告書

2020 年度複合センサシステムによる環境認識とロバスト制御に基づいた
AUV の機能化デザイン補助事業

2021 年 3 月

慶應義塾大学 理工学部 システムデザイン工学科

村上俊之

はじめに

本事業では、従来において議論が多く行われていない小型劣駆動 AUV, いわゆる水中ドローンの制御系について考察を行うため, 4 発ロータ型 AUV をベースとしたシステム構築を検討した. コロナ禍のため, 水中での実機実験システムの構築を進めることが困難であったが, 制御アルゴリズムの基本構成を提案することは行えた. 小型 AUV では, 水中外乱の影響を受けやすく, 水中内での運動制御 (位置および力制御) の高機能化が困難であるが, 提案手法により同問題を改善できれば, 複数台 AUV による海洋探査の高効率化が大いに期待できる. 先に述べたように, 実機 AUV を用いた実験実施は困難であったが, シミュレーションによるアルゴリズムの推進, また多自由度の模擬実験装置による力制御の新たな制御設計論については検証することができ, 制御アルゴリズムの点では目的が達成できている.

本事業では, ①AUV のロバストな運動制御に関する研究, ②AUV の自己位置推定, の 2 つの項目について研究の遂行を行った. コロナ禍のため, 当初予定していた大学院生による研究補助は必ずしも多くは得られず, 研究計画で予定していたアルゴリズムの検証の多くはシミュレーションおよび模擬実験により実施した. 模擬実験については, AUV の冗長性を模擬した平面 3 自由度冗長マニピュレータを模擬実験装置として構築し, ロバストな力制御の実現のための制御器構築と実機実験によるアルゴリズムの検証を行った.

(関連論文)

1. T. Ohhira, A. Kawamura, A. Shimada, T. Murakami, "An Underwater Quadrotor Control with Wave-disturbance Compensation by a UKF", IFAC 2020 World Congress, Germany, July 11-17, 2020.(JKA謝辞あり : AUVに関係する論文, オンライン開催)
2. A. Hiraoka, T. Murakami, "A Standing-up Assist Control Method Considering Movement Speed", IECON2020, Singapore, October 18-21, 2020. (JKA謝辞あり : AUVの姿勢安定化関連技術として安定性解析に関係する論文, オンライン開催)
3. K. Ominato, T. Murakami, " A Stabilization Control in Two-Wheeled Walker with Passive Mechanism for Walking Support", IECON2020, Singapore, October 18-21, 2020. (JKA謝辞あり : AUVの姿勢安定化関連技術として安定性解析に関係する論文, オンライン開催)
4. K. Fukutoku, H. Masuda, T. Murakami, "Internal Sensor Based Kinematic Parameters Estimation using Acceleration/Deceleration Motion", IEEE International Conference on Mechatronics (ICM2021), Tokyo, March 7-9, 2021.(JKA謝辞あり : AUVの姿勢安定化関連技術として安定性解析に関係する論文, オンライン開催)
5. H. Masuda, K. Fukutoku, T. Murakami, "Assessment of Human Walking Stability Using the Gait Sensitivity Norm with Wearable Sensors", IEEE International Conference on Mechatronics (ICM2021), Tokyo, March 7-9, 2021.(JKA謝辞あり : AUVの姿勢安定化関連技術として安定性解析に関係する論文, オンライン開催)
6. T. Ohhira, K. Yokota, S. Tatsumi, T. Murakami, "A Robust Hybrid Position/Force Control Considering Motor Torque Saturation", IEEE Access, Volume 9, pp.34515 – 34528, 2021. (JKA謝辞あり : AUVの力制御に関係する論文)

(別紙1)

事業の実施内容及び成果に関する報告書

1 事業名

2020年度複合センサシステムによる環境認識とロバスト制御に基づいたAUVの機能化
デザイン補助事業

2 事業の実施経過

(1) 事務手続き関係

2020年 5月 3日 交付決定通知受理(4/1付)
5月13日 交付誓約書・振込依頼届・前金払申請書提出
6月23日 補助金受領(5,000,000円)
10月15日 状況に関する報告書提出
2021年 4月26日 補助金精算申請書提出
5月 7日 補助金返還(1,257,677円)

(2) 事業関係

① AUVのロバストな運動制御に関する研究

2020年 4— 8月 ロバストな位置制御手法の確立(シミュレーション評価)
6— 9月 ロバストな力制御手法の確立(シミュレーション評価)
9—12月 ロバストな力制御手法の評価(実験)
2021年 1— 3月 ロバストな力制御手法の評価(実験)

② AUVの自己位置推定

2020年 4—9月 可変ゲイン型カルマンフィルタ設計法
(シミュレーション評価)

3 実施内容及び成果

(1) 実施内容

① AUVのロバストな運動制御に関する研究

本年度はCOVID-19の影響のため、年度前半については実験装置などの組み上げについては事前準備の段階から進んでおらず、シミュレーションを中心としたアルゴリズムの構築を行った。その結果については、中間報告と同内容のものとなる。年度後半については、事業計画に含めていたロバストな力制御手法の確立と実験的評価を行った。様々な制約から水中ドローンを利用した実験実施が行えなかったが、水中ドローンシステムを冗長シス

(別紙1)

テムととらえ、実機実験としては冗長マニピュレータシステムを構築し、力制御におけるアクチュエータのトルク飽和を避ける制御アルゴリズムの提案とアルゴリズムの検証実験を行った。水中ドローンでは水の流れに起因する大きな外乱を受ける可能性があり、安定した運動制御状態を保つにはトルク飽和を加味した制御アルゴリズムとする必要がある。本研究課題で提案した力制御アルゴリズムは水中ドローンにもそのまま適用できるものである。以下に位置制御、力制御の順にアルゴリズムの提案と評価実験結果を示す。

ロバストな位置制御手法

水中ドローンであるAUVを仮定した研究課題ではあるが、中間報告でも示した通り、空中ドローンも想定し位置制御手法ならびに力制御手法の構築とシミュレーションによる検証を行った。まずは、図1に示すように、ねじ締ドライバの回転力制御によるドローンへの干渉を考慮したドローンの姿勢制御に関する検証を行った。AUVと比較すると、空中ドローンでは干渉力の影響は大きく、空中ドローンにおける干渉力抑圧型の姿勢制御はAUVへもそのまま適用できると考えている。

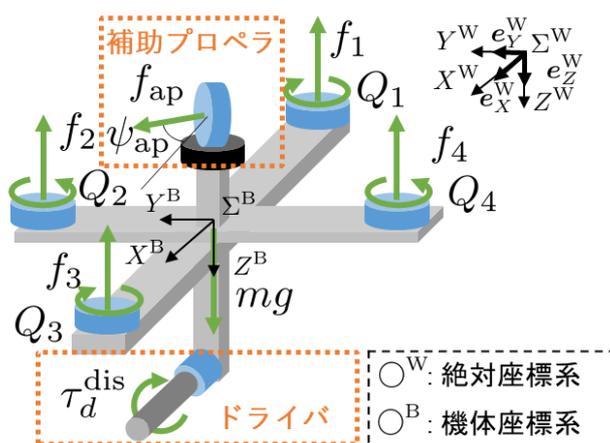


図1：ねじ締ドライバ付きドローンのモデル

ここでは、詳細な式の展開を示すことを避けるが、図2に示すようにドローンに設置されたねじ締ドライバにより、ねじ締作業を行った際にドローンが受ける反作用力をねじ締ドライバの制御系に含まれる外乱オブザーバにより推定を行い、その外乱推定値をドローンの姿勢制御へフィードバックする手法となっている。外乱オブザーバによる推定のブロック線図は図3になる。また、推定外乱を想定した姿勢制御の構成は図4となる。この外力による外乱の影響を考慮した姿勢制御はAUVにおいても重要であり、補償構造自体は

(別紙1)

様々なタイプのドローンシステムへ転用可能であると考えている。

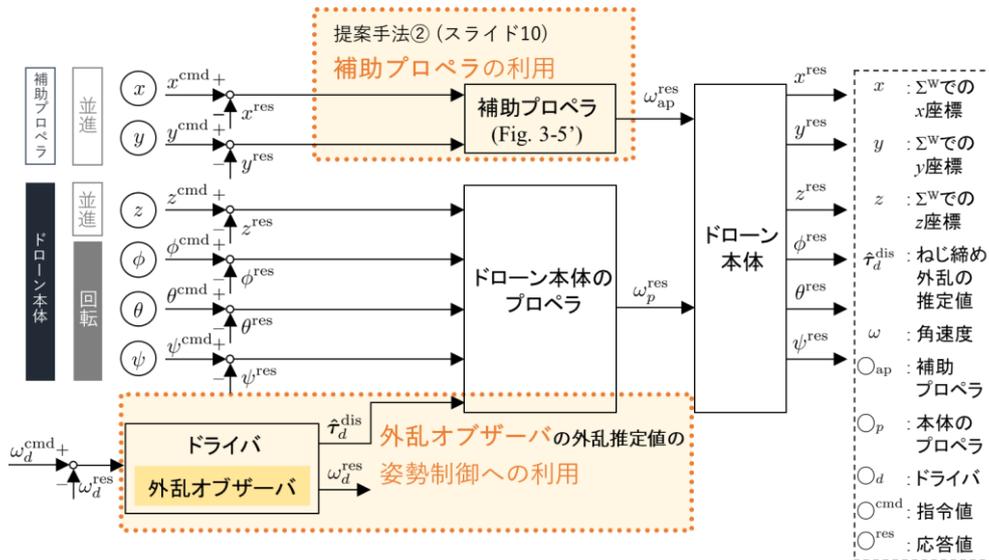


図2：制御系全体の構成図

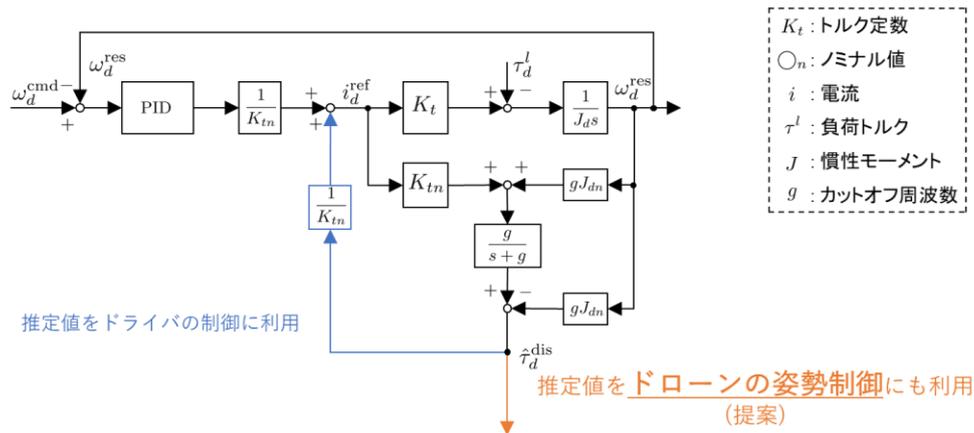


図3：ドライバーの外カトルク（ねじ締めトルク）の推定

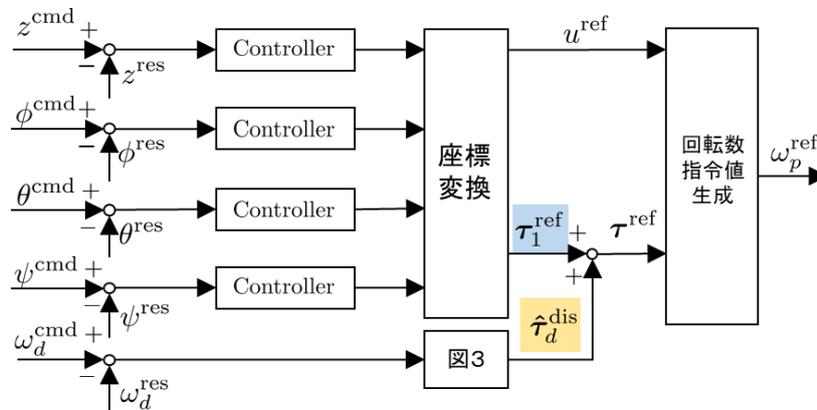


図4：姿勢制御コントローラ

(別紙1)

図2～4に示したねじ締操作による反力外乱補償の制御系の有効性を確認するため、シミュレーションによる検証を行った。シミュレーションではねじ締作業時にねじ締ドライバが図5の左図に示す反力を受けるものとして姿勢制御を行った。図5右図にはドローンの初期位置設定を示している。

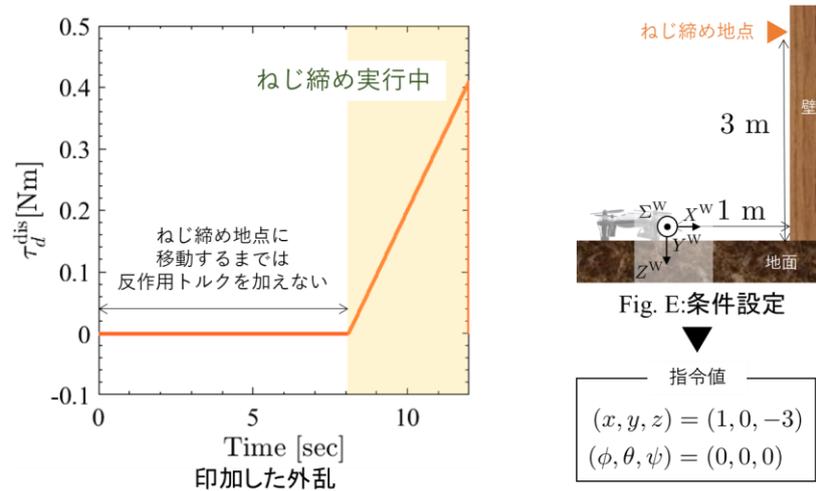


図5：ねじ締作業時の反力設定

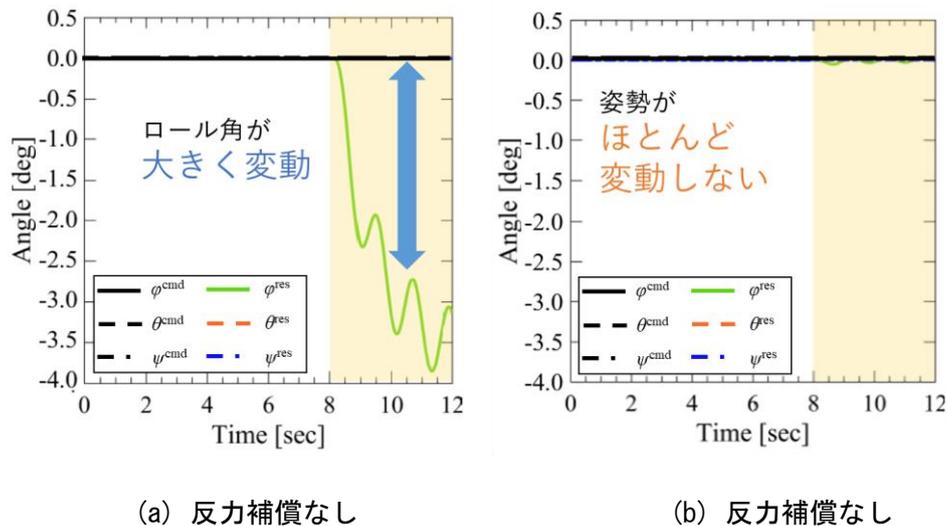


図6：空中ドローンによるシミュレーション結果

図6にシミュレーション結果を示す。同結果に示されるように、反力情報に基づいた姿勢制御を行うことで、姿勢変動が抑えられていることが分かる。

上記では空中ドローンを仮定した外乱作用時の姿勢制御の一手法についてシミュレーションベースで行った結果を示した。コロナ禍のため水中ドローンの実験装置の改善は行え

(別紙1)

ておらず、基本的に関連技術、制御アルゴリズムの開発を進めたが、水中ドローンであるAUVによる予備実験結果が得られているので示しておく、これは準備段階において過年度に行った実験結果であるが、本研究課題での申請書にも記載した予備実験装置による結果でもあり、関連するものとして報告書に含めることとする。制御系の構成としては図7になる。提案手法では、 x および y 方向の外乱の影響を抑圧するため、両方向の制御出力に関して、バックステッピング制御手法に基づいて ϕ 方向の制御へ反映させ、間接的に外乱による位置誤差への影響を低減する手法としている。この考え方は先に示した空中ドローンでの姿勢変動制御と等価なものである。さらに、カルマンフィルタによる外乱推定を行い、姿勢角制御への外乱の影響を補償している。図7の制御系に基づいて行った実験結果を図8に示す。実験結果より提案手法により、等価的に姿勢変動を抑圧することで位置誤差が低減していることが分かる。

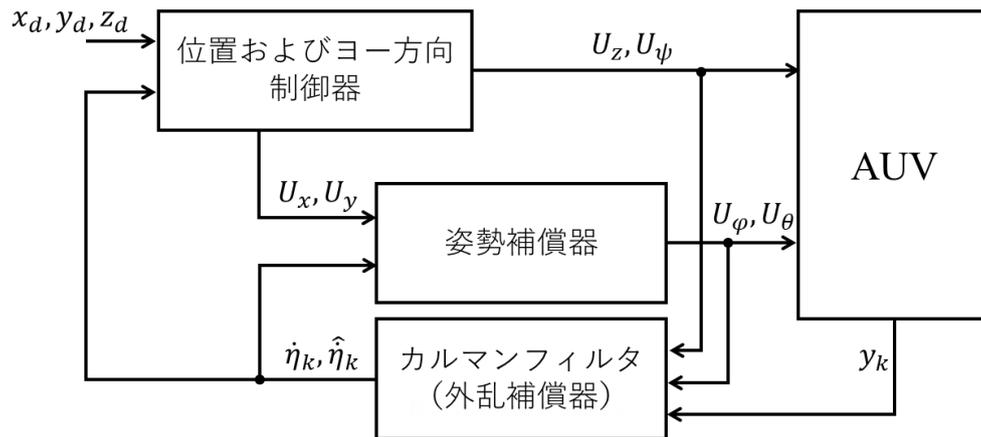


図7：AUVの外乱補償型位置・姿勢制御 (U_i はAUVへの制御入力)

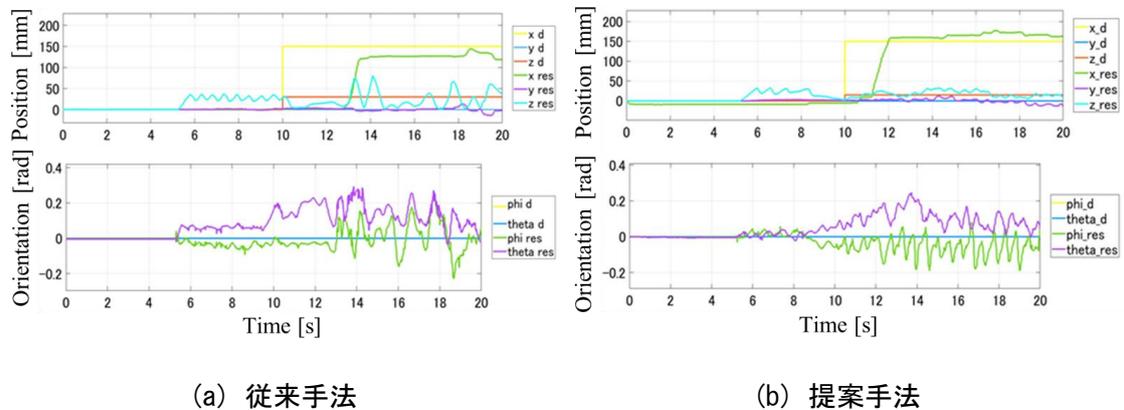


図8：AUVの位置制御および姿勢制御

(別紙1)

ロバストな力制御手法

提案手法では、各関節にトルク制約がある冗長運動システムのロバストなハイブリッド位置/力制御 (HPFC) システムを提案している。先に述べたように、本研究課題では水中ドローンを冗長システム (MDoFM) と仮定し、トルク制約 (トルク飽和回避) のための制御系の構成法を示している。一般的なHPFCシステムは、さまざまな環境での冗長システムの力制御と位置制御において、MDoFMの制御性能を向上させるために、モータトルクの飽和を考慮する必要がある。そこで、提案手法では予測機能制御 (PFC) によるトルク制約を考慮したロバストなHPFCシステムを提案している。特に、PFCを関節空間位置コントローラとして使用することにより、アクチュエータの応答特性とトルク制約を同時に処理している。さらに、外力に対するアクチュエータのロバスト性も考慮し、モデルのパラメータ変動を抑圧するために外乱オブザーバも導入している。作業空間 (ワークスペース) での位置/力の制御に暗黙の力制御法と逆運動学を用いることで、関節空間の位置コントローラが実装されている。その結果、アクチュエータの安定性とロバスト性が考慮でき、トルク飽和が発生した場合でも適切な位置/力制御を実行できる。提案手法の有効性は、カセンサを設置した3自由度平面冗長マニピュレータで検証を行っている。AUVは力学的な拘束を受けない冗長システムと仮定することができ、3自由度平面冗長マニピュレータによる有効性が確認できればAUVへの応用も可能である。

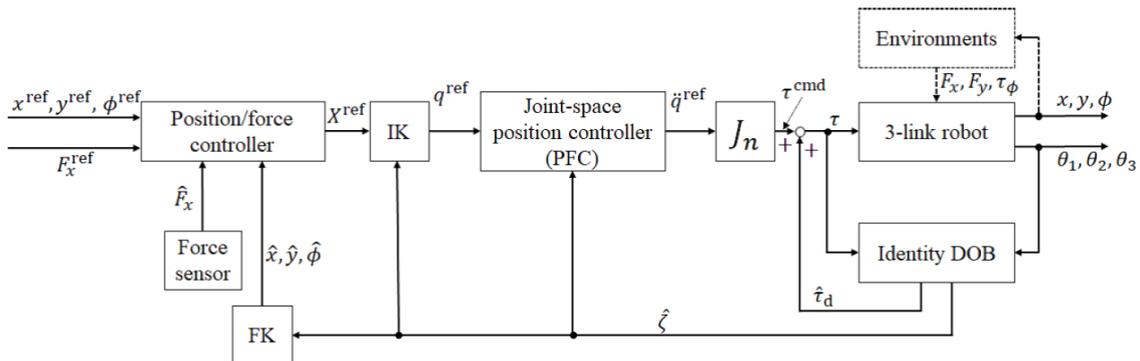


図9：トルク飽和を考慮した位置/力制御システム (IK：逆運動学, FK：順運動学)

図9に提案する位置/力制御システムの詳細な構成図を示す。提案手法では、パラメータ変動を補償するために関節空間に外乱オブザーバを導入している。また、トルク飽和を考慮するために加速度制御に基づいたPFC (Predictive Functional Control) を構築して

(別紙1)

いる。さらに、作業空間での力指令を位置指令に変換し、関節空間への位置指令へ変換することで、位置制御に基づいた力制御を実現している。

図10にAUVの平面移動を模擬した3自由度冗長マニピュレータシステムの実験装置を示す。先端力センサを設置しており、対象物との衝突が検出できる。

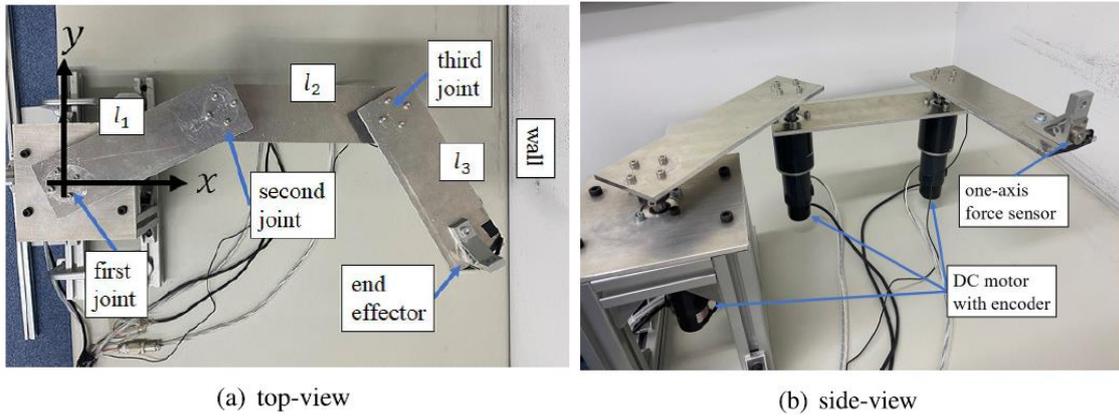
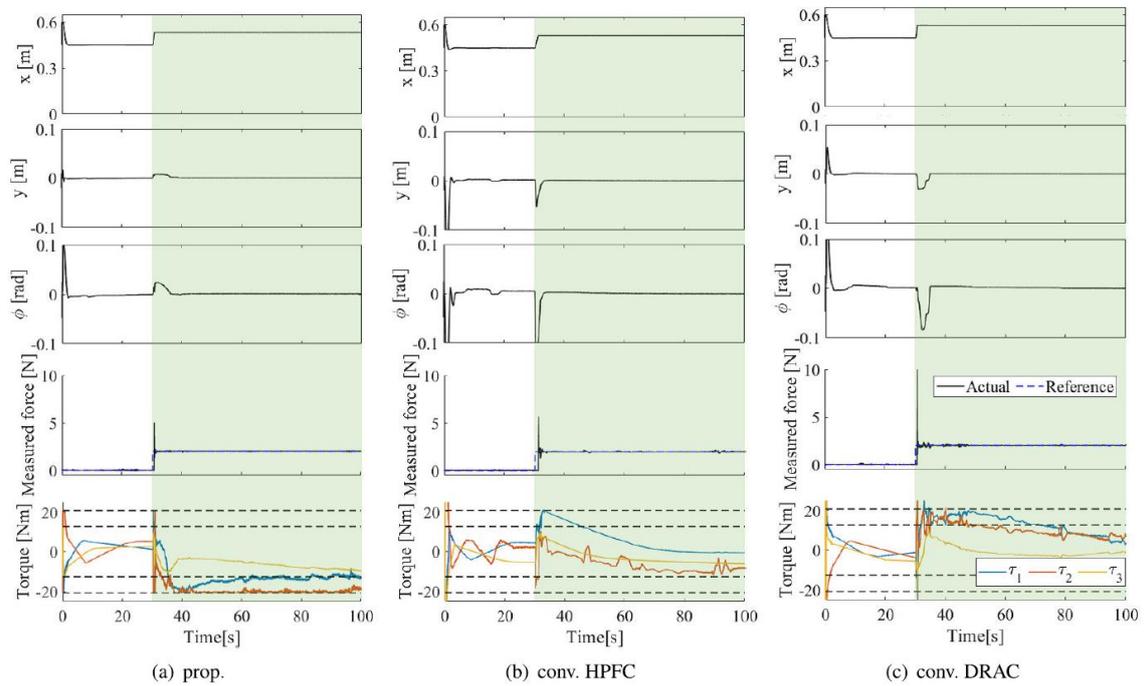


図10：提案手法の検証のための冗長システム



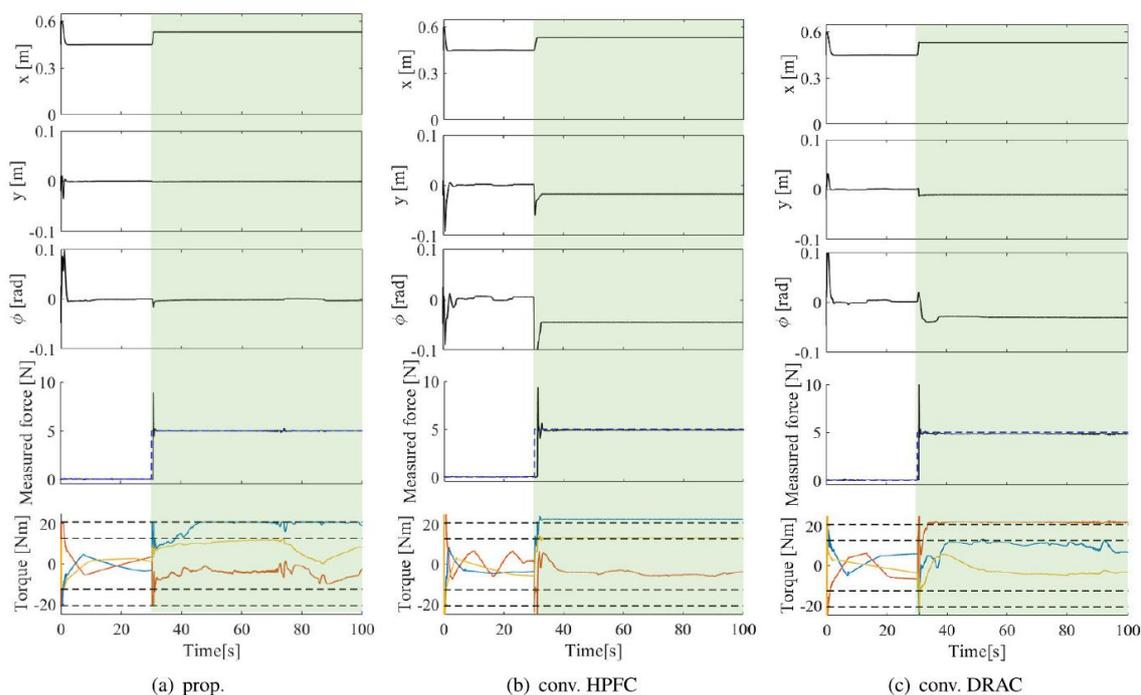
(a) 提案手法, (b) 従来位置／力ハイブリッド制御, (c) 分解加速度制御

図11：提案手法と従来手法の比較実験（力指令が2Nの時）

図11に提案手法に関する評価実験結果を示す。図11において(a)は提案手法, (b)は従来型の位置／力のハイブリッド制御, (c)は外乱オブザーバに基づいた分解加速度制御に

(別紙1)

なる。実験では先端のリンクが接触を伴う壁に対して直交する姿勢 ($\phi=0$) となるように、先端の位置および力の制御が行われている。図11の結果では、各制御手法における実験結果が示されており、上からx方向の位置応答、y方向の位置応答、姿勢角 ϕ の応答、z方向の力応答、各関節のトルク応答が示されている。各手法とも2Nの力指令においてはトルク飽和を生じていないが、位置応答、姿勢応答、力応答の干渉については提案手法によるものが最も低く抑えられていることが分かる。



(a) 提案手法, (b) 従来の位置／力ハイブリッド制御, (c) 分解加速度制御

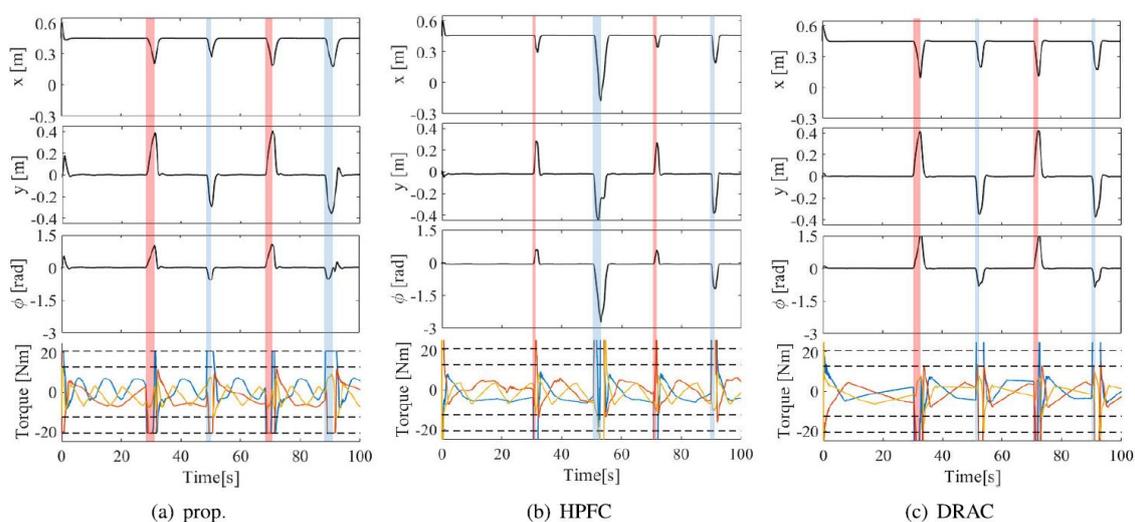
図12：提案手法と従来手法の比較実験（力指令が5Nの時）

図12には、力指令が5Nの時の応答を示す。ここで着目すべき点は、提案手法ではトルク飽和を考慮した制御アルゴリズムとなっているため、トルク飽和の影響が設定された限界値付近で抑えられており、位置応答、姿勢応答、力応答にその影響が現れていない。一方で、従来手法ではトルク飽和が限界値を大きく超えていると考えられ、そのために位置応答、姿勢応答、力応答に誤差が生じてしまい、また各応答が干渉していることが分かる。これらの実験結果より、トルク飽和が発生しやすい大きな指令値が設定された場合には、提案手法によりトルク飽和が適切に抑えられることが分かる。

次に外力外乱に対する応答特性を図13に示す。この実験結果では、第1リンクに外力

(別紙1)

を加えた際の位置応答，姿勢応答，力応答の変動を確認している．図の橙色部分の時間領域では+y方向（図10(a)の下から上方向）に外力を加え，青色部分の時間領域では-y方向（図10(b)右図の上から下方向）に外力を加えている．結果より，提案手法ではトルク飽和が抑えられ，外乱に対する各応答の変動は最小限に抑えられていることが分かる．AUVにおいても，大きな外乱の作用（海流の作用）が考えられ，提案手法に基づいたトルク飽和の考慮により，安定でかつ各応答の追従特性も維持可能なロバストな制御が実現できると考えている．



(橙色領域：第1リンクに+y方向外力を印加，青色領域：第1リンクに-y方向外力を印加)

図13：外力外乱に対する実験結果

② AUVの自己位置推定

AUVの自己位置推定に関しては，中間報告でも示した通りアルゴリズムとしては準備期間中に開発したものを継続して行った．ここでは，準備期間で得られた結果をまとめる．図14にIMU (Inertial Measurement Unit) センサを用いたカルマンフィルタの構成図，また図15に画像情報とIMUセンサ情報の融合のためのカルマンフィルタゲインの調整フローを示す．アルゴリズムの検証ではベンチマーク用のテストデータとして提供されているEuroc MAV datasetを用いている．このデータセットでは，ヘリコプタロボットの空中動作におけるステレオカメラによる画像情報，IMUセンサによる加速度情報，モーションキャプチャによる絶対位置情報（位置の真値情報として利用）が含まれており，図15に示す，画像データとIMUセンサデータを利用したカルマンフィルタの可変ゲインアルゴリズムにより自己位置推定を行う検証データとしては適切なデータとして利用する．本報告書では，

(別紙1)

より複雑な軌道データに対する評価結果を示す。図 1 6 に従来手法（カルマンフィルタ固定ゲイン）と提案手法（カルマンフィルタ可変ゲイン）による検証結果を示す。

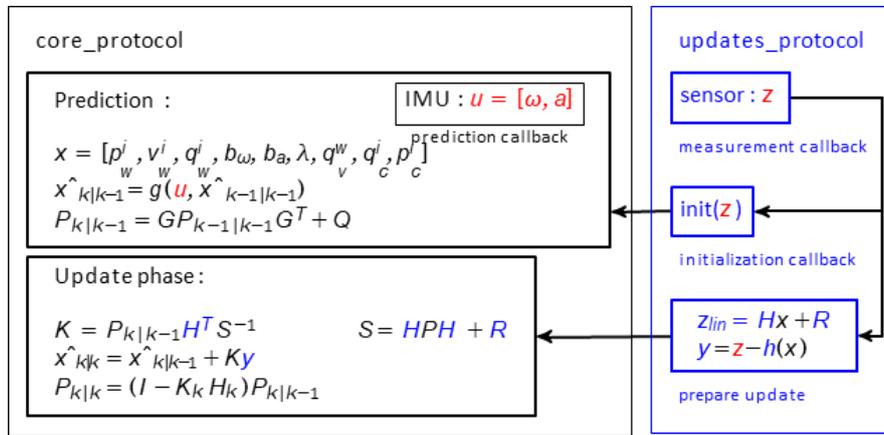


図 1 4 : IMUに基づいたカルマンフィルタ構成

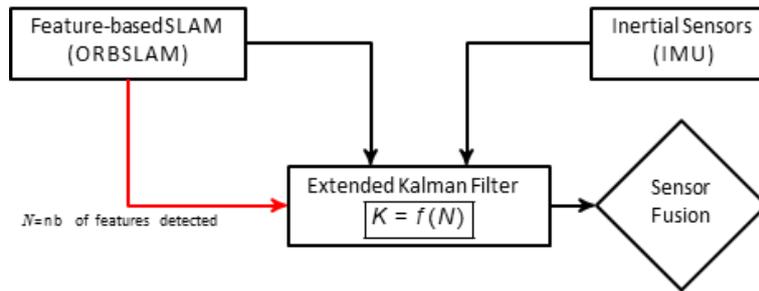
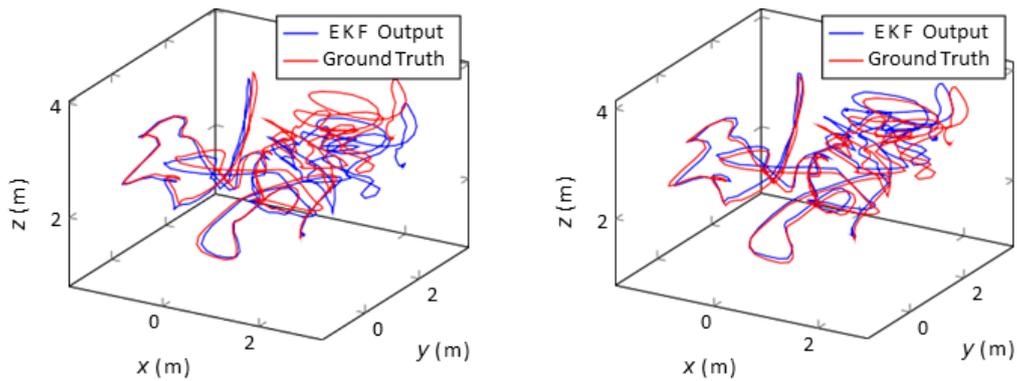


図 1 5 : カルマンフィルタにおけるセンサフュージョンのためのゲイン調整フロー



(a) 従来手法

(b) 提案手法

図 1 6 : Euroc MAV datasetを用いた従来手法と提案手法の比較検証結果

図 1 6 に示す実験結果において、従来手法では推定値と真値との誤差のRSME (Root Mean Squared Error) が0.567m, 提案手法では0.401mとなり、提案手法により誤差が低減できて

(別紙1)

いることが分かる。これらのアルゴリズムの構築についてはほぼ完了しているが、実機での検証については今後徐々に進めることを予定している。実機での検証が困難である場合には、シミュレーションでの検証評価を追加することを計画している。

(2) 成 果

各実施事業に対してその成果を以下にまとめる。2020年度はコロナ禍のため、AUVに特化した実験装置の新たな構築が困難であったため、力制御に関する制御手法の提案および実機検証についてはシミュレーションおよび模擬実験装置により行った。

① AUVのロバストな運動制御に関する研究

- 力制御に伴うAUVの姿勢安定化については、AUVが環境に対して力を加えた際に受ける反力を考慮した姿勢制御を導入することで、姿勢の変動を最小限に抑えられることがシミュレーションにより確認できた。しかしながら、反力を受けるモデルとしては必ずしも実応用に沿ったものとはなっておらず、詳細なモデル設定については今後の課題とした。
- 力制御時、外力外乱印加時におけるトルク飽和を避けるため、トルク拘束を考慮できる制御器構成法を示し、シミュレーションおよび実機実験によりその有効性を確認できた。提案手法では、トルク飽和を設定値で抑えることが可能なだけでなく、位置および力応答の追従特性も維持でき、また安定性も保証できることが確認できた。AUVの利用環境では、未知外乱の作用が避けられないため、トルク飽和は生じやすいと考えられ、AUVへの適用時においても提案手法により応答の追従特性を維持しながら安定した運動制御が実現できると考えている。今回の手法では、非ホロノミック特性（動作自由度に対して駆動自由度が少ない）についての検討は行っておらず、AUVの実応用においては重要事項ともなるため、非ホロノミック特性を考慮した制御器設計については今後の課題としたい。

② AUVの自己位置推定

- AUVの自己位置推定のため、画像情報とIMU（加速度情報）を用いた手法を提案した。海底において画像情報による自己位置推定は有用であると考えられるが、画像情報に含まれる特徴点の数が少ない場合、その環境に適した適切な自己位置推定が困難となる。一方で、IMUによる自己位置推定は画像のような特徴点を用いた手法ではないため、環境の状態に依存しない反面、加速度情報を積算することで、速度、位置を求めるため累積誤差（ドリフト誤差）が発生してしまう欠点がある。そこで、提案手法では画像情報とIMUによる加速度情報をカルマンフィルタにより融合した

(11/13)

(別紙1)

アルゴリズムを構築した。これにより、画像および加速度情報の双方の利点を生かした自己位置推定が可能となる。提案手法の有用性についてはドローンを用いたベンチマークデータ (Euroc MAV dataset) を用いて確認を行った。提案手法においても自己位置推定の精度は必ずしも十分ではなく、推定精度のさらなる向上は今後の課題としたい。

(関連発表論文)

1. T. Ohhira, A. Kawamura, A. Shimada, T. Murakami, "An Underwater Quadrotor Control with Wave-disturbance Compensation by a UKF", IFAC 2020 World Congress, Germany, July 11-17, 2020. (JKA謝辞あり : AUVに関する論文, オンライン開催)
2. A. Hiraoka, T. Murakami, "A Standing-up Assist Control Method Considering Movement Speed", IECON2020, Singapore, October 18-21, 2020. (JKA謝辞あり : AUVの姿勢安定化関連技術として安定性解析に関する論文, オンライン開催)
3. K. Ominato, T. Murakami, "A Stabilization Control in Two-Wheeled Walker with Passive Mechanism for Walking Support", IECON2020, Singapore, October 18-21, 2020. (JKA謝辞あり : AUVの姿勢安定化関連技術として安定性解析に関する論文, オンライン開催)
4. K. Fukutoku, H. Masuda, T. Murakami, "Internal Sensor Based Kinematic Parameters Estimation using Acceleration/Deceleration Motion", IEEE International Conference on Mechatronics (ICM2021), Tokyo, March 7-9, 2021. (JKA謝辞あり : AUVの姿勢安定化関連技術として安定性解析に関する論文, オンライン開催)
5. H. Masuda, K. Fukutoku, T. Murakami, "Assessment of Human Walking Stability Using the Gait Sensitivity Norm with Wearable Sensors", IEEE International Conference on Mechatronics (ICM2021), Tokyo, March 7-9, 2021. (JKA謝辞あり : AUVの姿勢安定化関連技術として安定性解析に関する論文, オンライン開催)
6. T. Ohhira, K. Yokota, S. Tatsumi, T. Murakami, "A Robust Hybrid Position/Force Control Considering Motor Torque Saturation", IEEE Access, Volume 9, pp.34515 - 34528, 2021. (JKA謝辞あり : AUVの力制御に関する論文)

(12/13)

(別紙1)

(3) 成果を公表している研究室ホームページ上のURL

(<http://www.fha.sd.keio.ac.jp/>)

(4) JKA補助事業バナーを表示している研究室ホームページ上のURL

(<http://www.fha.sd.keio.ac.jp/>)

4 事業実施に関して特許権、実用新案権等を申請又は取得したときはその内容
特に無し

5 今後予想される効果

① AUVのロバストな運動制御に関する研究

本事業で提案した「反力情報に基づいた姿勢安定化」ならびに「トルク飽和を考慮した制御器設計」については空中ドローンへの展開も行えると考えている。特に、「トルク飽和を考慮した制御器設計」についてはロボットシステム一般に応用可能であり、人との共存空間において安全性を向上することにも貢献できると考えている。

② AUVの自己位置推定

画像情報とIMU(加速度)情報を融合した自己位置推定アルゴリズムについては、ロボットへの適用だけではなく人への応用も可能であると考えており、AUVでの実応用だけではなく、自己動作状態推定に基づいた介護者等の人の動作支援にも貢献できると考えている。

6 本事業により作成した印刷物(研究報告書等)

「2020年度複合センサシステムによる環境認識とロバスト制御に基づいたAUVの機能化デザイン補助事業」報告書 10部

7 その他

特に無し

事業内容についての問い合わせ先

慶應義塾大学 理工学部 システムデザイン工学科 村上俊之研究室

〒223-8522

横浜市港北区日吉3-14-1

教授 村上俊之

E-mail: mura@sd.keio.ac.jp

URL: www.fha.sd.keio.ac.jp