

RAPORTARE ȘTIINȚIFICĂ

Raportul Științific final

Contract nr. 1PHE/2023; etapă nr. 3/2024; SeaClear2.0;

Pentru etapa finală a proiectului, ne-am concentrat pe finalizarea celor trei obiective principale ale proiectului, și anume optimizarea lanțului cinematic pentru prinderea subacvatică, cartografierea deșeurilor subacvatice și gestionarea infrastructurii de calcul a laboratorului. În secțiunile următoare, detaliem progresul obținut de la ultimul raport științific al proiectului.

Optimizarea punctelor de prindere

În timpul celei de-a doua etape a proiectului, ne-am concentrat pe optimizarea lanțului cinematic al dispozitivului de prindere SeaClear2.0, efectuând o analiză a tipurilor de deșeuri pe care le așteptam să întâlnim sub apă. Aceasta a permis partenerilor noștri de la Universitatea Tehnică din München să construiască dispozitivul de prindere SeaClear2.0 și să-l integreze cu restul sistemului. Sistemul a fost testat cu succes folosind control manual pentru prindere, totuși obiectivul final ar fi să avem o conductă automatizată de prindere care să necesite minim intervenție umană. Pentru a aborda această problemă, am lucrat la dezvoltarea unei metodologii de detectare a punctelor posibile de prindere pentru diverse obiecte și alegerea unei configurații optime de prindere. Această metodologie a fost implementată ca serviciu ROS2, pentru a funcționa eficient cu restul conductei, care constă în detectarea obiectelor și planificarea traiectoriei. Serviciul de prindere a fost plasat între celelalte două componente, primind o nor de puncte de la componenta de detectare a obiectelor și furnizând intrare pentru planificarea traiectoriei.

Componenta de detectare a obiectelor furnizează un nor de puncte al deșeurilor care trebuie ridicate. Serviciul de prindere reconstruiește apoi o rețea de suprafață pe baza norului de puncte. Suprafețele nepotrivite pentru prindere (de exemplu, suprafețele orizontale) sunt filtrate. O rutină de optimizare verifică toate perechile posibile de suprafețe opuse de prindere (pentru două degete) și, pentru fiecare pereche, verifică toate suprafețele cinematically posibile pentru celelalte două degete. Pentru fiecare cvadrupele de suprafețe, se calculează forțele pe care dispozitivul le poate exercita asupra lor și, în final, selectează cvadrupelele care poate fi prins cu forțe maxime. Acest lucru asigură că dispozitivul va ridica obiectul în cea mai favorabilă configurație, crescând astfel șansele de succes ale ridicării deșeurilor. Procedura de optimizare a punctelor de prindere este prezentată grafic în Figura 1.

Serviciul de prindere a fost evaluat în timpul ultimei demonstrații a sistemului SeaClear2.0, care a avut loc la Marsilia în a doua săptămână a lunii septembrie.

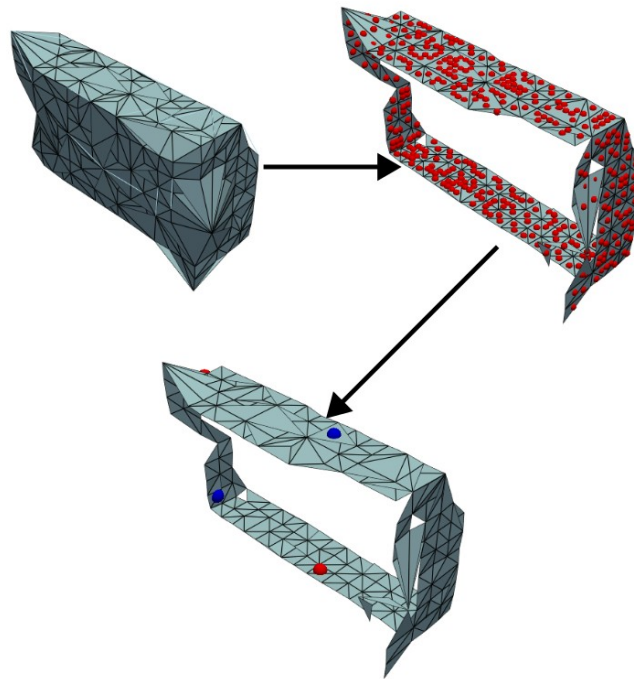


Figura 1: Etapele serviciului de puncte de prindere. Mai întâi reconstruim o rețea bazată pe norul de puncte furnizat de algoritmul de detectare a obiectelor. Suprafețele adecvate pentru prindere sunt apoi izolate, iar serviciul calculează suprafețele optime pentru prindere pe baza analizei forței grapple-lui.

Cartografierea deșeurilor

Pentru a sprijini strategiile de cartografiere a deșeurilor ale sistemului SeaClear2.0, am lucrat la îmbunătățirea strategiei de control pentru ROV-ul Mini Tortuga. Abordarea anterioară se baza pe o strategie de control PID decuplată, în timp ce o nouă strategie de control optim a fost proiectată pentru a ține mai bine cont de dinamica reală a robotului. Pentru a proiecta strategia de control optim, a fost necesar un model dinamic al ROV-ului. Am ales să identificăm dinamica Mini TORTUGA conform modelului prezentat în literatură [1].

Forțele de restabilire, împreună cu inerția corpului rigid și termenii Coriolis-centripeti, au fost determinați analitic din modelul CAD al ROV-ului. Pentru forțele de amortizare și contribuțiile masei adăugate la inerție și forțele Coriolis-centripete, am urmat protocolul experimental propus în [2].

Datele experimentale au fost colectate în timpul unei călătorii de teren la Marsilia. Seturile de date pentru parametrii de amortizare au fost colectate prin trimiterea unor comenzi de forță constante către ROV. Acest lucru a garantat că accelerațiile sunt aproape de zero în seturile de date colectate, facilitând identificarea parametrilor de amortizare independent de parametrii de inerție. Ulterior, parametrii de inerție pentru gradele de libertate liniare au fost identificați din seturi de date generate cu comenzi de forță sinusoidale. Parametrii pentru gradele de libertate unghiulare nu au fost identificați, deoarece ROV-ul Mini TORTUGA nu este echipat cu senzori pentru măsurarea accelerațiilor unghiulare. Parametrii utilizați pentru forțele Coriolis-centripete au fost aproximați din valorile de inerție identificate. Toți parametrii au fost identificați folosind regresia liniară pentru datele colectate. Un exemplu de identificare este prezentat în Figura 2. Pentru nevoi viitoare potențiale, am colectat și seturi suplimentare de date cu comenzi de forță aleatoare pentru a facilita modelarea prin regresie neliniară.

Un alt sprijin pentru proiectul SeaClear2.0 a fost explorarea utilizării **ros1_bridge** pentru a permite comunicarea între conductele de cartografiere și estimare a stării și software-ul ROV-ului. Acest lucru a fost necesar deoarece, în timpul experimentelor de colectare a datelor, codul de cartografiere și estimare a poziției a fost migrat la ROS2, în timp ce software-ul ROV-ului rămânea în ROS1.

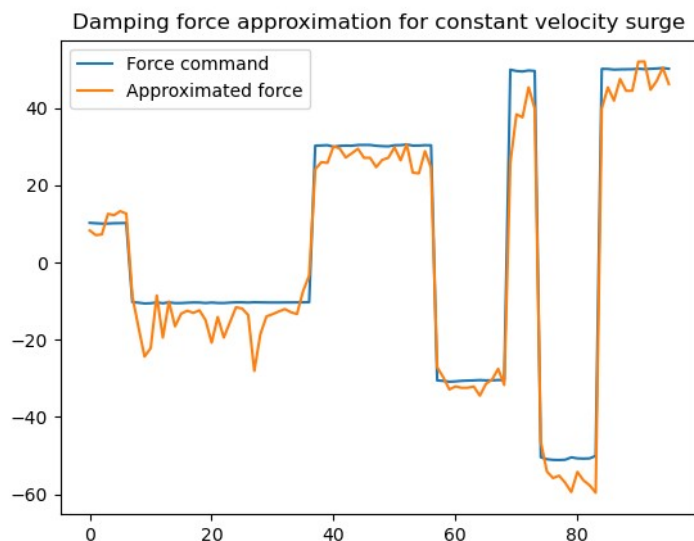


Figura 2: Forțe aproximative și comandate pentru o viteză constantă de tip 'surge'

Un alt aspect al cartografierii deșeurilor abordat în această etapă a proiectului a fost îmbunătățirea estimării poziției ROV-ului. În prezent, cea mai populară implementare pentru

estimarea orientării sistemelor robotice utilizează o singură unitate de măsurare inerțială (IMU), care este uneori combinată cu alte tipuri de senzori (de exemplu, encodeuri, GPS etc.) pentru a îmbunătăți estimarea poziției complete. Cu toate acestea, există puține informații în literatură privind utilizarea mai multor IMU-uri pentru estimarea orientării. Am efectuat o analiză de sensibilitate a acurateței estimării poziției în funcție de numărul de IMU-uri utilizate.

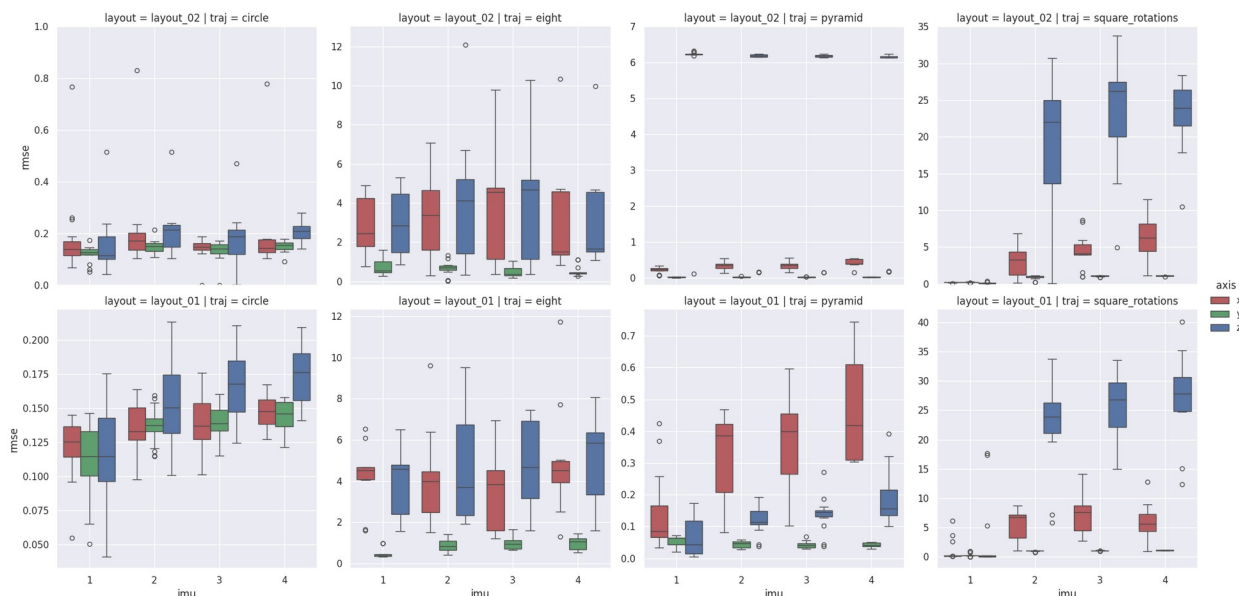


Figura 3: Rezultatele analizei de sensibilitate. În figuri, eroarea în estimarea ulterioară este prezentată pentru toate traiectoriile, amplasamentele și numărul de senzori.

Protocolul pentru acest studiu a fost dezvoltat în a doua etapă a proiectului, iar în faza finală am efectuat experimentele, am analizat datele și am scris un articol de conferință cu rezultatele. Cercetarea noastră a arătat că estimarea poziției poate beneficia de un al doilea IMU, dar când datele de la mai mult de 2 IMU-uri sunt fuzionate, estimarea nu se îmbunătățește și, în unele scenarii, se deteriorează. Rezultate sumarizate sunt prezentate în Figura 3. Rezultatele acestei cercetări sunt trimise pentru prezentare la Congresul Mondial IFAC programat să aibă loc la Busan, Coreea de Sud, în vara anului 2026.

Infrastructura de calcul

Eforturile de optimizare a infrastructurii noastre de calcul au continuat și în etapa finală a proiectului. Abordarea utilizării unui server jupyterhub, dezvoltată în a doua etapă, a fost adaptată ușor din cauza problemelor legate de instalarea dependențelor specifice fiecărui utilizator. În loc să avem o singură instanță de jupyterhub (care permite mai mulți utilizatori pe un singur server), am optat pentru instanțe containerizate de jupyterlab, care permit fiecărui utilizator să acceseze un server virtual. Acest lucru este benefic deoarece fiecare utilizator are acces doar la propriul server și poate stoca fișiere și instala dependențe în funcție de nevoile sale. Acest lucru ne permite, de asemenea, să declarăm fiecare utilizator superutilizator pentru propriul server virtual, oferindu-i flexibilitatea de a-și gestiona propriul setup.

Instalarea MARV-robotics a fost, de asemenea, optimizată. Am definit widget-uri personalizate pentru vizualizarea tipurilor de date senzoriale pe care le avem în laborator. În plus, am definit mai multe „colecții”, câte una pentru fiecare subgrup de cercetare din laboratorul nostru. Fiecare subgrup poate accesa doar colecțiile atașate acestuia și oferă vizualizări specifice în funcție de nevoile sale. În final, am dezvoltat un sistem personalizat de încărcare folosind FTP, pentru a ne asigura că fișierele bag de mari dimensiuni sunt transferate cu succes, chiar și în cazul întreruperilor conexiunii la internet.

În plus, pentru a îmbunătăți experiența utilizatorilor în accesarea tuturor serviciilor pe care le oferim, am configurat un reverse proxy care redirecționează subdomeniile specifice către portul corespunzător al fiecărui serviciu. Acest lucru ajută utilizatorii să-și amintească URL-ul pentru fiecare tip de serviciu, deoarece pot fi accesate prin URL-uri prietenoase (de exemplu, <https://marv.paparuda.utcluj.ro> în loc de <https://paparuda.utcluj.ro:8443>). Această abordare ne permite, de asemenea, să simplificăm generarea și utilizarea certificatelor SSL pentru toate serviciile, ceea ce reprezintă o considerație importantă de securitate.

Diseminarea rezultatelor

Diseminarea rezultatelor a fost un punct important de concentrare și în această etapă. Rezultatele proiectului au fost prezentate la o revistă de top și la o conferință majoră din domeniu, în timp ce o a doua prezentare este în curs de revizuire. Aceste publicații marchează un pas semnificativ în stabilirea contribuțiilor proiectului la avansarea cercetării în robotică. Prima publicație a fost acceptată pentru prezentare la 64th IEEE Conference on Decision and Control, care va avea loc în perioada 9-12 decembrie 2025, la Rio de Janeiro, Brazilia. Aceasta se referă la planificarea optimistă minmax, o abordare care poate ajuta la planificarea traiectoriei ROV-urilor sistemului SeaClear2.0. Articolul a fost, de asemenea, publicat și în IEEE Control Systems Letters, prin procedura conferinței pentru a promova și mai mult articole de merit [3].

A doua publicație de conferință este trimisă la conferința IFAC World Congress 2026, programat să aibă loc în august 2026 la Busan, Coreea de Sud. În acest articol descriem protocolul experimental și rezultatele unei analize de sensibilitate a estimării poziției pentru diferite numere de senzori IMU [4].

Pe lângă aceste publicații de conferință, a rezultat și o publicație în revistă din această etapă a proiectului. Articolul „Multirobot path-aware global optimization” a fost publicat în Control Engineering Practice și discută o abordare pentru coordonarea operațiunilor și planificării traiectoriilor mai multor ROV-uri [5].

Concluzie și observații finale

Acest raport științific este raportul final al proiectului de sprijin 1PHE/2023, deoarece proiectul se încheie la 31 octombrie 2025. Ca atare, concluzionăm că proiectul a reușit să sprijine cu succes activitățile proiectului Horizon Europe SeaClear 2.0 pe mai multe fronturi, de la

proiectarea hardware până la contribuții algoritmice în literatură. Rezultatele acestui proiect au fost diseminate în conferințe majore și reviste consacrate, având o publicația mai mult decât erau planificate inițial, plus o publicația care a fost publicată și în jurnal după decizia de aprobare la conferința. În plus, proiectul lasă o bază solidă pentru infrastructura de calcul a grupului de cercetare, care va ajuta la menținerea activităților de cercetare chiar și după încheierea proiectului. În final, prin diverse achiziții efectuate în timpul acestui proiect, am contribuit, de asemenea, la extinderea capacităților de prototipare ale grupului de cercetare.

Luând în considerare toate aceste aspecte, considerăm că obiectivele acestui proiect au fost atinse în totalitate și că proiectul a reușit să-și îndeplinească obiectivele.

Referințe

- [1] Fossen, T. I., Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control. John Wiley & Sons, 2011.
- [2] Wu, C.-J. "6-dof modelling and control of a remotely operated vehicle," Ph.D. dissertation, Flinders University, College of Science and Engineering., 2018.
- [3] Bogdan, S., Herzal, R., Varma, V. S., & Bușoniu, L. (2025). Minimax Optimistic Planning for Continuous-Action Noncooperative Sequential Control. *IEEE Control Systems Letters*.
- [4] Man, D., Natsakis, T., & Bușoniu, L. (under review). Sensitivity analysis of multiple IMU sensors fusion on the quality of pose estimation. IFAC World Congress 2026, Busan, South Korea, 23-28 August 2026
- [5] Sântejudean, T., Ceapă, M., Herzal, R., Pop, E., Varma, V. S., Morărescu, I. C., & Bușoniu, L. (2025). Multirobot path-aware global optimization. *Control Engineering Practice*, 164, 106495.

Director Proiect,
Conf. dr. Ing. Anastasios NATSAKIS
Cluj-Napoca, 2025-10-15