

УДК 004.896

## **Improving Underwater State Estimation by Fusing VIO with Neural ODE-Predicted Dynamics**

**Maalla Y.**<sup>1</sup> (post-graduate student)

**Scientific supervisor – Professor Kolyubin S.A.**<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ITMO University

yazanmaalla@itmo.ru

The work was completed within the research №54144 “Research of machine learning methods and algorithms for processing sensory information and controlling robots in a dynamic environment”.

### **Abstract**

Accurate state estimation for autonomous robots is challenging due to GPS denial, turbulent currents, and degraded sensor data. Conventional Visual-Inertial Odometry (VIO) fuses visual and inertial measurements but ignores the robot's dynamic model, leaving useful kinematic constraints unused. This research presents a framework integrating a Port-Hamiltonian Neural ODE (PH-NODE) dynamics model into a tightly coupled factor-graph optimizer. The PH-NODE enforces physical consistency via Hamiltonian structure, learning inertia, damping, and actuation parameters with symmetry and positive definiteness guaranteed by Cholesky decomposition. Control-induced accelerations are preintegrated between keyframes, forming a dynamics factor that separates commanded motion from external disturbances. The system is evaluated on the NTNU BlueROV2 dataset and HoloOcean simulations with injected forces. On real data, translational and rotational errors are reduced by 1.77% and 6.29% over VINS-Mono with only 3.3% runtime overhead. Under simulated disturbances, pose error drops by over 60% and force estimation achieves  $R = 0.9949$ , demonstrating that hybrid physics–learning models improve trajectory accuracy while yielding interpretable disturbance estimates.

### **Keywords**

underwater odometry, visual-inertial odometry, Neural ODE, Port-Hamiltonian systems, factor graph optimization, disturbance estimation, autonomous underwater vehicles

## **Улучшение оценки состояния подводного аппарата путём объединения VIO с динамикой, предсказанной Neural ODE**

**Маалла Я.**<sup>1</sup> (аспирант)

**Научный руководитель – профессор Колюбин С.А.**<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Университет ИТМО

yazanmaalla@itmo.ru

Работа выполнена в рамках НИР №54144 «Исследование методов и алгоритмов машинного обучения для обработки сенсорной информации и управления роботами в динамическом окружении».

### **Аннотация**

Точная оценка состояния автономных подводных роботов остаётся сложной задачей в условиях отсутствия GPS, турбулентных течений и ухудшенного качества сенсорных данных. Классическая визуально-инерциальная одометрия (VIO) объединяет визуальные и инерциальные измерения, но не учитывает динамическую модель робота, оставляя кинематические ограничения неиспользованными. В данной работе предложена система, интегрирующая порт-гамильтонову нейронную ODE (PH-NODE) в тесно связанный оптимизатор на факторном графе для подводной локализации. PH-NODE обеспечивает физическую согласованность через гамильтонову структуру, обучая параметры инерции, демпфирования и управления с гарантией симметрии и положительной определённости посредством разложения Холецкого. Ускорения, индуцированные командами управления, прединтегрируются между ключевыми кадрами, формируя динамический фактор, разделяющий командное движение и внешние возмущения. Система оценивалась на наборе данных NTNU BlueROV2 и в симуляторе HoloOcean с силами. На реальных данных ошибки перемещения и вращения снижены на 1,77% и 6,29% по сравнению с

VINS-Mono при накладных расходах 3,3%. В условиях симулируемых возмущений средняя ошибка позы снижается более чем на 60%, а оценка сил достигает корреляции  $R = 0,9949$ , подтверждая эффективность гибридных физико-обучающих моделей.

#### **Ключевые слова**

подводная одометрия, визуально-инерциальная одометрия, нейронная ODE, порт-гамильтоновы системы, оптимизация на факторном графе, оценка возмущений, автономные подводные аппараты

Accurate localization in GPS-denied underwater environments is challenging due to turbulent currents and degraded sensor data. Conventional Visual-Inertial Odometry (VIO) estimates trajectories from multi-sensor data but neglects the robot's dynamic model, a rich source of kinematic constraints. Analytical dynamic models oversimplify real-world effects, while data-driven approaches suffer from poor physical consistency and weak generalization. We propose a framework that addresses these limitations by employing a Port-Hamiltonian Neural ODE (PH-NODE) to learn a physically consistent dynamic model, fusing visual, inertial, and dynamic cues in a single factor-graph optimization, and estimating external forces online to stabilize trajectory prediction.

The system is built around three components. First, a PH-NODE operating on SE(3) enforces energy conservation via Hamiltonian structure, learning inertial, damping, and actuation parameters with symmetry and positive definiteness guaranteed by Cholesky decomposition, yielding a data-adaptive acceleration prior from raw thruster commands. Second, the predicted body-frame acceleration is preintegrated between keyframes analogously to IMU preintegration; a dynamics factor attributes motion discrepancies to an explicit external force variable optimized within the sliding-window graph, preventing disturbances from biasing VIO residuals. Third, the factor-graph back-end extends VINS-Mono with dynamics-informed constraints, jointly estimating pose, velocity, IMU biases, and external forces.

The system is evaluated on the NTNU BlueROV2 dataset and HoloOcean simulations with injected forces up to 20 N. On real data, translational error is reduced from 0.848 m to 0.833 m (1.77%) and rotational error from  $1.956^\circ$  to  $1.833^\circ$  (6.29%) over VINS-Mono, with only 3.3% runtime overhead. In simulation, average pose error drops by over 60% (APE: 1.555 m  $\rightarrow$  0.604 m) with force estimation achieving  $R = 0.9949$  and RMSE below 0.7 N/kg. This work presents the first integration of physically consistent neural ODEs into optimization-based underwater SLAM, demonstrating that hybrid physics-learning models improve odometry accuracy while yielding interpretable disturbance estimates.

#### **References**

1. Barhoum Z.A., Kolyubin S. Physically consistent dynamic modeling of underwater robots for robust long-horizon motion prediction // *Journal of Instrument Engineering*. 2024.
2. Forster C., Carlone L., Dellaert F., Scaramuzza D. On-manifold preintegration for real-time visual-inertial odometry // *IEEE Transactions on Robotics*. 2017. Vol. 33, no. 1. P. 1–21.
3. Qin T., Li P., Shen S. VINS-Mono: A robust and versatile monocular visual-inertial state estimator // *IEEE Transactions on Robotics*. 2018. Vol. 34. P. 1004–1020.
4. Singh M., Dharmadhikari M., Alexis K. An online self-calibrating refractive camera model with application to underwater odometry. arXiv: 2310.16658. 2023.
5. Potokar E., Lay K., Norman K., et al. HoloOcean: A full-featured marine robotics simulator for perception and autonomy // *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. 2024. Vol. 49, no. 4. P. 1322–1336.

Author: \_\_\_\_\_ Maalla Y.  
Scientific supervisor: \_\_\_\_\_ Kolyubin S.A.