

АДАПТАЦИЯ ЗАКОНА УПРАВЛЕНИЯ НЕГОЛОНОМНЫХ РОБОТОВ ДЛЯ МОРСКИХ СУДОВ

Ермолаев Артём Александрович

Аспирант, Университет ИТМО, г. Санкт-Петербург
erm.art.949@gmail.com

ADAPTATION OF CONTROL LAW OF NON-HOLONOMIC ROBOTS FOR MARINE VESSELS

A. Ermolaev

Summary. Navigation of autonomous robotic vehicles is a difficult task, especially in terms of optimizing trajectories under dynamic constraints. This study is devoted to adapting the control laws of non-holonomic robots to marine vessels for use in navigation through scalar fields, for example, for environmental monitoring. Based on the fundamental work of Professor Matveev on Dubins robots and Professor Fossen on hydrodynamic modeling of marine vessels, this study combines these areas to develop a control system for a catamaran-type vessel. The main goal is to transfer and verify the effectiveness of Matveev's scalar field boundary detection law in the context of open nonlinear matrix-vector models of marine vessels by Fossen.

Keywords: computer simulation, unmanned underwater vehicle, degrees of freedom, hydrodynamics, kinematics, kinetics, maneuvering, swimming in the sea, robotic vessel.

Аннотация. Навигация автономных роботизированных транспортных средств представляет собой сложную задачу, особенно в части оптимизации траекторий в условиях динамических ограничений. Данное исследование посвящено адаптации законов управления неголономных роботов к морским судам для применения в навигации по скалярным полям, например, для мониторинга окружающей среды. Основываясь на фундаментальных работах профессора Матвеева, по роботам Дубинса, и профессора Фоссена, по гидродинамическому моделированию морских судов, данное исследование объединяет эти области для разработки системы управления для судна типа катамаран. Основной целью является перенос и проверка эффективности закона обнаружения границ скалярного поля Матвеева в контексте открытых нелинейных матрично-векторных моделей морских судов Фоссена.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, беспилотный надводный аппарат, степени свободы, гидродинамика, кинематика, кинетика, маневрирование, плавание в море, роботизированное судно.

Введение

Автономная навигация морских роботов представляет собой сложную задачу, особенно в условиях динамических ограничений и воздействия внешней среды. Для выполнения специфических задач, таких как поиск и спасение на море или экологический мониторинг, необходимо разработать законы управления, учитывающие особенности движения в водной среде и способные адаптироваться к изменяющимся условиям. Применение принципов управления неголономными роботами к морским судам позволяет эффективно решать задачи поиска целей или следования заданным изолиниям скалярных полей, что особенно актуально для локализации разливов нефти или других экологических угроз [1].

Движение в водной среде характеризуется необходимостью учета гидродинамических сил, инерции среды и дополнительных степеней свободы. В отличие от движения по плоской твердой поверхности, расчет траектории морского робота требует включения параметров, отражающих влияние окружающей среды, таких как скорость потока воды, сопротивление среды и гидродинамическое давление. Эти факторы существенно усложняют задачу навигации и управления, так как они создают

динамические ограничения на движение судна и требуют специальных методов компенсации для обеспечения точности следования заданной траектории.

В области управления морскими судами существуют фундаментальные работы. Модель Абковица (1964) и MMG модель Огавы и Касаи (1978) заложили основу для современных исследований [6]. Особое место занимает работа профессора Фоссена, предложившего матрично-векторные модели, ставшие стандартом в проектировании систем управления [2]. Матрично-векторное представление моделей управления движением морских судов существенно упрощает проектирование систем благодаря использованию свойств линейной алгебры, таких как симметрия и положительная определенность матриц. Это позволяет эффективно анализировать устойчивость системы, интегрировать различные физические эффекты и создавать более наглядные модели, что значительно облегчает разработку устойчивых алгоритмов управления.

Продолжая исследования профессора Матвеева по навигации неголономных роботов [4][5], целью данной работы является адаптация его закона управления для численной модели катамаранного судна Фоссена с целью поиска изолиний в скалярном поле. Основные задачи работы:

1. Поиск открытой компьютерной модели неголономного судна, схожего по принципу движения с роботом типа Дубинса.
2. Модернизация компьютерной модели управляемого судна катамаранного типа.
3. Оценка точности работы закона управления в компьютерной модели.

Результаты станут основой для разработки системы роевого управления автономными морскими роботами для задачи локализации границ скалярного поля.

Описание системы и постановка задачи

Для управления движением морских роботов недостаточно использовать упрощенную кинематическую модель типа Дубинса, которая рассматривает движение с постоянной скоростью v и минимальными ограничениями на радиус поворота. Математически эта модель описывается следующим образом [5]:

$$\begin{cases} \dot{x} = v \cos(\psi) \\ \dot{y} = v \sin(\psi) \\ \dot{\psi} = \omega \end{cases}$$

где x и y — координаты, ψ — угол курса, ω — угловая скорость, а v — линейная скорость. Однако, данная модель не учитывает динамические воздействия окружающей среды, такие как течения, волнение и гидродинамическое сопротивление, что существенно ограничивает её применимость для морских судов.

В современных исследованиях используются более сложные компьютерные модели, учитывающие реальные физические процессы. Одним из таких инструментов является Python Vehicle Simulator [7], разработанный профессором Фоссеном, который включает множество моделей морских судов. Среди них особое внимание привлекает катамаран Otter USV (Unmanned Surface Vehicle) (рисунок 1), представляющий собой пример неголономного судна. Именно эта модель была выбрана для исследования, так как её динамика наиболее близка к принципам движения робота типа Дубинса, при этом она учитывает специфику водной среды.

Кинематика катамарана Otter USV описывается следующим образом [4]:

$$\begin{cases} \dot{\vec{r}} = v\vec{e}(\psi) + \vec{V}(r, t) \\ \dot{\psi} = \omega \end{cases}$$

где \vec{r} — вектор положения судна, $\vec{e}(\psi) = [\cos(\psi), \sin(\psi)]^T$ — вектор направления движения, $\vec{V}(\vec{r}, t)$ — вектор потока воды, v — скорость относительно среды, а ω — угловая скорость. Эта формули-

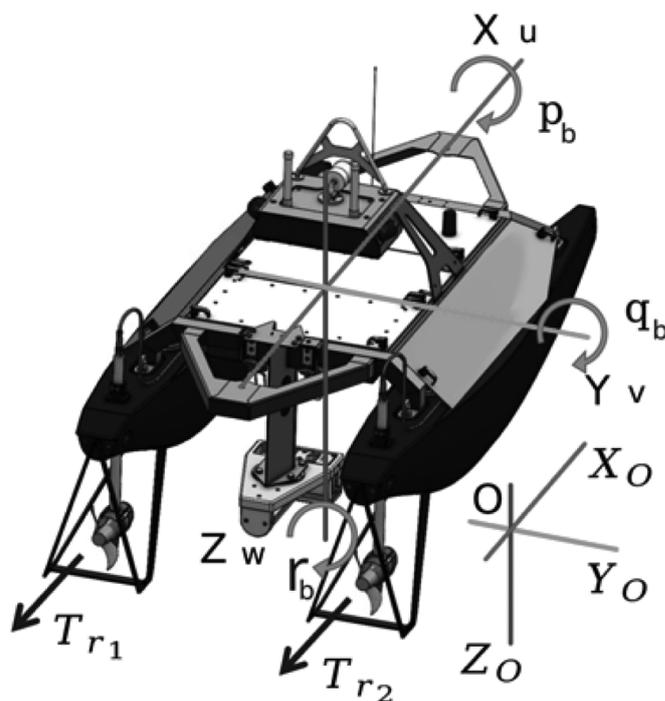


Рис. 1. Катамаран Otter USV.

Вектора линейных $[u_b, v_b, w_b]$ и угловых $[p_b, q_b, r_b]$ скоростей представлены на осях катамарана XYZ . Система O_{XYZ} ориентация координат Земли

ровка позволяет адаптировать траекторию движения к влиянию внешних факторов, таких как течение и инерция.

Для полного описания динамики катамарана используется модель Фоссена [3], учитывающая шесть степеней свободы (6-DOF) и различные силовые эффекты. Общее уравнение движения имеет вид:

$$M\dot{v} + C(v)v + D(v)v + G(\eta) = \tau + \tau_E$$

где:

- $M \in R_{6 \times 6}$ — матрица инерции;
- $C(v) \in R_{6 \times 6}$ — матрица Кориолисовых и центробежных сил;
- $D(v)$ — матрица гидродинамических демпфирующих сил и моментов;
- $G(\eta) \in R_6$ — вектор возвращающих сил и моментов;
- $\tau \in R_6 = [X_f, Y_f, Z_f, K_m, M_m, N_m]^T$ — вектор управляющих сил и моментов;
- $\tau_E \in R_6$ — вектор сил и моментов внешней среды.

Переменные модели определяются следующим образом:

- $\eta \in R_6 = [x, y, z, \phi, \theta, \psi]^T$ — положение и ориентация судна в системе координат Земли;
- $v \in R_6 = [u_b, v_b, w_b, p_b, q_b, r_b]^T$ — вектор линейных и угловых скоростей в системе координат тела.

Для того чтобы применить закон профессора Матвеева для управления численной моделью катамарана в симуляторе профессора Фоссена потребуется модернизировать модель Otter USV.

Для этого опишем задачу управления. Пусть есть скалярное поле интенсивности $F(\vec{r}) \in C^1(\mathbb{R}^3)$ и целевое значение f_* . Цель управления выражается $F(\vec{r}(t)) \rightarrow f_*$ при $t \rightarrow \infty$. Существует целевая изолиния $I(f_*) = \{\vec{r} : F(\vec{r}) = f_*\}$ к которой катамаран должен асимптотически стремиться.

Закон управления описывается формулой [4]:

$$\omega(t) = \frac{1}{2}[(1 - \sigma)\omega_- + (1 + \sigma)\omega_+],$$

$$\sigma = -\text{sgn}(f' + \mu\chi(f - f_*)),$$

где χ — ограниченная кусочно-гладкая функция, $\mu > 0$ — настраиваемый параметр, ω_-, ω_+ — предельно возможные угловые скорости.

Описание движительной системы симулятора

Движительная система модели Otter USV состоит из двух независимых гребных винтов. Вектор управляющего воздействия имеет вид:

$$u_{control} = [n_1, n_2]^T,$$

где n_1 и n_2 — скорости вращения валов левого и правого винтов соответственно (в рад/с), лежащие в ограничениях $[n_-, n_+]$. Тяга, создаваемая каждым винтом, равна:

$$T_i = \begin{cases} k_{pos}n_i |n_i|, n_i > 0 \\ k_{neg}n_i |n_i|, n_i \leq 0 \end{cases}$$

где k_{pos}, k_{neg} — коэффициенты тяги в положительном и отрицательном направлениях вращения винта соответственно.

Суммарные сила и момент, действующие на винты, равны:

$$\tau = \begin{pmatrix} T_1 + T_2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -l_1T_1 - l_2T_2 \end{pmatrix}$$

где l_1 и l_2 — рычаги левого и правого винтов соответственно.

Адаптированная версия закона управления имеет вид:

$$u_{control} = \frac{1}{2} \left((1 - \sigma) \begin{pmatrix} n_+ \\ n_- \end{pmatrix} + (1 + \sigma) \begin{pmatrix} n_- \\ n_+ \end{pmatrix} \right),$$

где σ описывается уравнением выше.

Стратегия управления гарантирует, что USV может следовать динамической изолинии в определенных условиях, учитывающих значения интенсивности поля и неголономные ограничения. Закон Матвеева устойчив к неопределенностям воздействия окружающей среды и обеспечивает достаточную маневренность для компенсации дрейфа.

Модель Otter USV обладает следующими параметрами:

- Габаритные размеры: 200 см × 108 см × 106,5 см;
- Осадка: 32 см;
- Сухой вес: 65 кг (с двумя батареями);
- Материал корпуса: полиэтилен;
- Приводная система: два редукторных электродвигателя.

Модель разработана при следующих допущениях:

1. Судно описывается как жесткое тело с шестью степенями свободы (6-DOF).
2. Среда представляет собой жидкую воду с постоянной плотностью $\rho = 1026 \text{ кг/м}^3$.
3. Возмущения окружающей среды моделируются с постоянными или медленно меняющимися параметрами.
4. Вектор текущей скорости среды состоит из компонент волнения и качки относительно курса судна.
5. Гидродинамические эффекты включают присоединенную массу, демпфирование, восстанавливающие силы и сопротивление поперечного потока.
6. Динамика гребного винта регулируется постоянными времени и коэффициентами тяги.
7. Нелинейные эффекты, такие как демпфирование рысканья, крена и дифферента, включены в уравнения движения.

Симуляция движения катамарана

Рассмотрим симуляцию движения катамарана в простейшем скалярном поле, описанном квадратичной функцией. Значения концентрации поля в точке принимаются в условных единицах, максимальная высота пика скалярного поля составляет 30 единиц, для удобства представления графиков. На рисунке 2 видно, что при расположении стартовой точки модели Otter USV, в непосредственной близости изолинии, закон управления $u_{control}$ демонстрирует свою работоспособность. Время перехода в скользящий режим для этого эксперимента составляет $T_i = 40$ секунд.

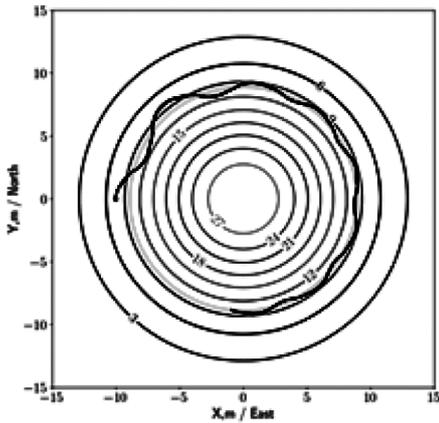


Рис. 2а. Точка старта [-10;0]. Выход на скользящий режим

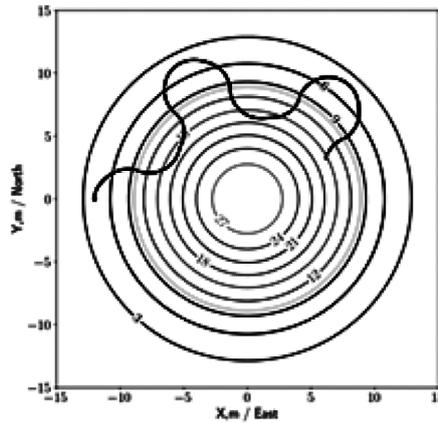


Рис. 2б. Точка старта [-13;0]. Выход на целевую изолинию. Движение с большой амплитудой

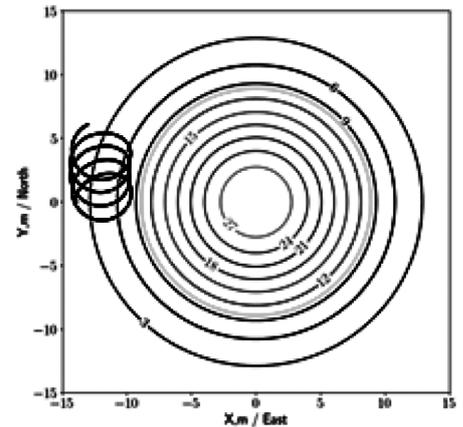


Рис. 2в. Точка старта [-14;0]. Потеря ориентации в скалярном поле

Рис. 2. Симуляция движения модели катамарана в простом поле с одним пиком, описанном квадратичными функциями. Синяя линия — трек катамарана, красная — целевая изолиния. Время симуляции $T_{total} = 100$ сек. Значение целевой изолинии — 10 ед.

Из рисунка 2 так же следует, что закон управления $u_{control}$ имеет ограничения накладываемые значением концентрации и скоростью роста производной в точке старта. При старте из более разреженной зоны концентрации (зона 1–3 ед.), закон управления не позволяет катамарану обнаружить изолинию. Для работы закона управления в областях слабо изменяющейся концентрации или нулевой концентрации, требуется доработка, качественно улучшающая поисковый алгоритм, поскольку такие участки не позволяют определить направление положения изолинии.

Заключение

Закон управления автономным роботом, предложенный профессором Матвеевым, продемонстрировал работоспособность в комплексной задаче управления

моделью морского робота катамаранного типа, описанной профессором Фоссеном. В зависимости от значения производной на границе скалярного поля можно определить эффективность выбора начальной точки движения робота. Дальнейшие эксперименты показали, что даже в областях с «плоскими» участками концентрации (3–5 ед.), катамаран способен находить изолинию и выходить на скользящий режим. Однако в областях со слабо изменяющейся концентрацией (1–3 ед.) или нулевой концентрацией требуется доработка алгоритма поиска изолинии. Модель Фоссена продемонстрировала высокий потенциал для решения широкого спектра задач локализации границ скалярного поля. Работа открывает возможности для дальнейшего исследования роевого управления автономными морскими роботами для задачи локализации и следования вдоль границы поля.

ЛИТЕРАТУРА

1. Aznar F., Sempere M., Pujol M., Rizo R., Pujol M.J. Modelling Oil-Spill Detection with Swarm Drones // *Abstract and Applied Analysis*. 2014. Т. 2014. С. 1–10. DOI: 10.1155/2014/949407.
2. Fossen T.I. *Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control*. 2-е изд. Издатель: John Wiley & Sons Ltd, 2021. 736 с.
3. Fossen T.I. *Mathematical Models of Ships and Underwater Vehicles* // *Encyclopedia of Systems and Control*. 2014. С. 1–9. DOI: 10.1007/978-1-4471-5102-9_121-2.
4. Matveev A.S., Kapitonov A.A., Berman I., Chernov V. Gradient-Free Tracking of Unsteady Environmental Level Sets in Dynamic Environments by a Nonholonomic Robots // 21st IFAC World Congress, Berlin, Germany, July 2020, С. 9391–9396, DOI: 10.1016/j.ifacol.2020.12.2215.
5. Matveev A.S., Ovchinnikov K.S., Savkin A.V. Gradient-free sensor-based navigation of a nonholonomic robot for source seeking in cluttered environments // 35th Chinese Control Conference (CCC), Chengdu, China, 2016, С. 4658–4663, DOI: 10.1109/ChiCC.2016.7554075.
6. Yang Y., Chillce G., Moctar O. Mathematical modeling of shallow water effects on ship maneuvering // *Applied Ocean Research*. 2023. Т. 136. С. 1–7. DOI: 10.1016/j.apor.2023.103573.
7. Fossen T.I. Python Vehicle Simulator. URL: <https://github.com/cybergalactic/PythonVehicleSimulator> (дата обращения: 03.03.2025).

© Ермолаев Артём Александрович (erm.art.949@gmail.com)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»