

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ИНСТИТУТ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ
И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Кафедра "Информатика и управление в технических системах"

А Л Г О Р И Т М Ы РАСПОЗНАВАНИЯ И НАВИГАЦИИ К ДОК-СТАНЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВИЗУАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ

Методические указания
к выполнению лабораторной работы
по дисциплине "Моделирование робототехнических систем"
для студентов направления подготовки
27.04.04 – «Управление в технических системах»,
15.04.06 – «Мехатроника и робототехника»
дневной формы обучения



Севастополь
СевГУ
2025

УДК 004.932.72'1:[531.1:[629.584:007.52]](076.5)

ББК 39.427.5-05в63-5*я73

А45

Р е ц е н з е н т:

А. А. Кабанов - канд. техн. наук, доцент

Составители: В. А. Крамарь, А. Д. Ляшко, Р.Д. Якунин

А45 Алгоритмы распознавания и навигации к док-станции с использованием визуального управления : методические указания к выполнению лабораторной работы по дисциплине "Моделирование робототехнических систем" для студентов направления подготовки 27.04.04 «Управление в технических системах» и 15.04.06 «Мехатроника и робототехника» дневной формы обучения / Севастопольский государственный университет ; сост.: В. А. Крамарь, А. Д. Ляшко, Р. Д. Якунин. – Севастополь : СевГУ, 2025. – 14 с. – Текст : электронный.

Приводится описание лабораторной работы, целью которой является овладение умениями и практическими навыками. Алгоритмы распознавания и навигации к док-станции с использованием визуального управления. Методические указания предназначены для студентов дневной формы обучения направления подготовки 27.04.04 «Управление в технических системах», 15.04.06 «Мехатроника и робототехника»

УДК 004.932.72'1:[531.1:[629.584:007.52]](076.5)

ББК 39.427.5-05в63-5*я73

Рассмотрены и рекомендованы к изданию на заседании кафедры информатики и управления в технических системах, протокол № 5 от 28 января 2025 г.

© Крамарь В. А., Ляшко А. Д.,

Якунин, Р. Д., сост., 2025

© ФГАОУ ВО «Севастопольский

государственный университет», 2025

СОДЕРЖАНИЕ

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ	4
2. КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ.....	4
3. ЗАДАНИЕ НА ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ.....	8
4. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА И ПОРЯДОК ЗАЩИТЫ РАБОТЫ....	9
5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ	9
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	10
ПРИЛОЖЕНИЕ А	13
A1. Обучение Yolo.....	13
A2. Распознавание док-станции.....	14

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью лабораторной работы является исследование кинематики подводного аппарата в шести степенях свободы (6 DOF) путем разработки математической модели, описывающей его движение. Проведение численного моделирования для анализа траектории движения и проверки адекватности модели.

Все вычислительные процедуры и построения предлагается проводить с помощью математических пакетов MathCAD, MatLab, Octave, которые обеспечивают высокую точность расчетов и удобство визуализации результатов. Для отработки и тестирования алгоритмов рекомендуется использовать среду разработки PyCharm, MuRIDE со встроенным симулятором, позволяющий моделировать движение подводных аппаратов в условиях, близких к реальным. Такой подход обеспечивает комплексную проверку корректности работы алгоритмов и их готовность к практическому внедрению.

2. КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Современные автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА) находят все более широкое применение при проведении исследований в Мировом океане, а также при разработках труднодоступных месторождений. В настоящее время наиболее распространены традиционные экспедиции судов обеспечения с телеуправляемыми необитаемыми подводными аппаратами (ТНПА) либо АНПА на борту. Однако, использование судов обеспечения в качестве носителей АНПА является далеко не самым эффективным решением, особенно при проведении работ на достаточно больших площадях акватории.

Суда обеспечения ограничены собственной автономностью и невозможностью проведения работ при неблагоприятных погодных условиях, а также являются крайне дорогостоящими в эксплуатации. Для снижения расходов, минимизации влияния человеческого фактора, повышения автономности и эффективности АНПА, применяются подводные док-станции. Основными задачами, выполняемыми док-станциями являются зарядка аккумуляторных батарей АНПА, сбор и передача накопленного за миссию массива данных от АНПА к оператору. Наиболее ответственной задачей при взаимодействии АНПА и подводной док-станции является задача стыковки. Поскольку сама концепция применения док-станций наиболее эффективна при взаимодействии с АНПА, стыковка соответственно должна производиться в автономном режиме. На рисунке 2.1 представлена схема стыковки АНПА с док-станцией.

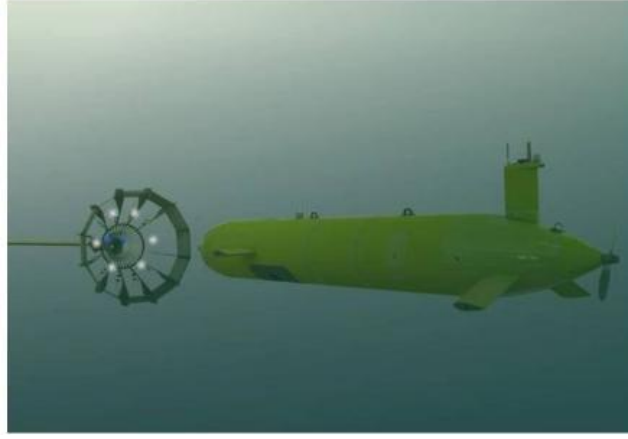


Рисунок 2.1 – Схема стыковки АНПА с док-станцией

Полная модель кинематики

Инерциальная система координат привязана к Земле, используется для описания глобального положения и ориентации аппарата. Положение ПА определяется его линейным перемещением $\eta_1 = [x \ y \ z]^T$ и ориентацией $\eta_2 = [\varphi \ \theta \ \psi]^T$.

Общее кинематическое уравнение движения ПА с шестью степенями свободы определяется выражением [1]

$$\dot{\eta} = J(\eta)v, \quad (2.1)$$

где $\eta = [x, y, z, \varphi, \theta, \psi]^T = [\eta_1^T, \eta_2^T]^T$ – вектор положения;

$\eta_1 = [x, y, z]^T$ положение и углы Эйлера угловой ориентации;

$\eta_2 = [\varphi, \theta, \psi]^T$ в земной системе координат;

$v = [u, v, w, p, q, r]^T$ – вектор скоростей, включающий векторы линейных $v_1 = [u, v, w]^T$ и угловых скоростей $v_2 = [p, q, r]^T$;

$J(\eta)$ – матрица преобразования скорости ПА, заданной в связанной системе координат в координаты положения ПА в земной системе координат.

Уравнения полной модели представлены ниже.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= u \cos(\psi) \cos(\theta) + v \sin(\psi) \cos(\theta) - w \sin(\theta) \\ \dot{y} &= u(-\sin(\psi) \cos(\theta) + \\ &+ v(\cos(\psi) \cos(\theta) + \sin(\psi) \sin(\theta) \sin(\varphi) + w \cos(\theta) \sin(\varphi)) \\ \dot{z} &= u(\sin(\psi) \sin(\varphi) + \cos(\psi) \sin(\theta) \cos(\varphi)) + \\ &+ v(-\cos(\psi) \sin(\varphi) + \sin(\psi) \sin(\theta) \cos(\varphi)) + w \cos(\theta) \cos(\varphi) \\ \dot{\varphi} &= p + q \sin(\varphi) \tan \theta + r \cos(\varphi) \tan(\theta) \\ \dot{\theta} &= q \cos(\varphi) - r \sin(\varphi) \\ \dot{\psi} &= q \frac{\sin(\varphi)}{\cos(\theta)} + r \frac{\cos(\varphi)}{\cos(\theta)} \end{aligned}$$

Модель камеры

Точка $P = [X, Y, Z]^T$ в мировых координатах проецируется на изображение с использованием модели перспективной проекции:

$$s = \begin{bmatrix} s_x \\ s_y \end{bmatrix} = \frac{f}{Z_c} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_x \\ c_y \end{bmatrix},$$

где s_x, s_y — координаты точки на изображении.

f — фокусное расстояние камеры.

c_x, c_y — координаты главной точки камеры.

X_c, Y_c, Z_c — координаты точки в системе координат камеры.

Координаты точки в системе камеры вычисляются как:

$$P_c = R * (P - \eta_{1:3}),$$

где R — матрица поворота из инерциальной системы в систему камеры.

Ошибка визуальной обратной связи

Ошибка e между текущим положением точки на изображении s и желаемым положением $s_{desired}$:

$$e = s - s_{desired}$$

Цель управления — минимизировать эту ошибку.

Матрица взаимодействия (Interaction Matrix)

Матрица взаимодействия L связывает изменение координат точки на изображении с изменением скорости системы:

$$L = \begin{bmatrix} -\frac{f}{Z_c} & 0 & \frac{s_x}{Z_c} & \frac{s_x s_y}{f} & -(f + \frac{s_x^2}{f}) & s_y \\ 0 & -\frac{f}{Z_c} & \frac{s_y}{Z_c} & (f + \frac{s_y^2}{f}) & -\frac{s_x s_y}{f} & -s_x \end{bmatrix}.$$

Закон управления

Используется пропорциональный регулятор для минимизации ошибки:

$$\tau = -\lambda * L^+ * e;$$

где λ — коэффициент усиления.

L^+ — псевдообратная матрица L .

Цветовое пространство HSV

В задаче важно сохранение цвета при различных условиях освещения, перейдем в цветовое пространство HSV. В этой системе цветов обеспечивается непосредственный контроль тона, насыщенности и яркости. Используя модель HSV, мы сможем контролировать необходимый нам диапазон цветов при различных условиях освещения.

Переход из RGB в HSV определяется по следующему правилу. Пусть $H \in [0, 360]$ – значение цветовой тона. S, V – насыщенность и яркость. R, G, B – значения трех цветов красный, зелёный, синий соответственно в формате RGB. Пусть MAX – максимальное значение из R, G, B , а MIN – минимальное из них. Тогда, для перехода из формата RGB в формат HSV воспользуемся соотношениями:

$$H = \begin{cases} 60 * \frac{G - B}{MAX - MIN} + 0, & \text{если } MAX = R \text{ и } G \geq B \\ 60 * \frac{G - B}{MAX - MIN} + 360, & \text{если } MAX = R \text{ и } G < B \\ 60 * \frac{B - R}{MAX - MIN} + 120, & \text{если } MAX = G \\ 60 * \frac{R - G}{MAX - MIN} + 240, & \text{если } MAX = B \end{cases}$$

$$S = \begin{cases} 0, & \text{если } MAX = 0 \\ 1 - \frac{MIN}{MAX}, & \text{иначе} \end{cases}$$

$$V = MAX$$

Для поиска объекта с определенным цветом должны определить диапазон цветов, которые будут удовлетворять нашим условиям.

Момент изображения

Для определения целевой точки (центроида) воспользуемся функцией `cv2.moments()`, вычисляющей различные моменты изображения.

Момент изображения — это конкретное средневзвешенное значение интенсивности пикселей изображения, с помощью которого мы можем найти некоторые специфические свойства изображения, такие как радиус, площадь, ориентация или центроид. Чтобы найти центр тяжести изображения, мы обычно преобразуем его в двоичный формат, а затем находим его центр. Момент изображения вычисляется как

$$M_{ij} = \sum_x \sum_y x^i y^j * I(x, y).$$

Используя вышеприведенную формулу, можем вычислить момент нулевого порядка M_{00}

$$M_{00} = \sum_x \sum_y I(x, y).$$

Центроид задается формулой

$$C_x = \frac{M_{10}}{M_{00}}$$

$$C_y = \frac{M_{01}}{M_{00}}$$

где C_x является координатой x и C_y является координатой y центроида;

M_{10} — сумма ненулевых пикселей на бинарном изображении вдоль оси x ;

M_{01} — сумма ненулевых пикселей на бинарном изображении вдоль оси y ;

M_{00} — общее количество ненулевых пикселей.

Распознавание док-станции с помощью YOLOv5

На первом этапе нужно произвести разметку в формате YOLO и получить текстовые файлы с координатами bounding box. Разметку можно выполнить в следующих программах:

LabelImage — программа позволяет возвращать результат разметки в двух форматах: PascalVOC и YOLO. Формат PascalVOC представлен в виде XML-файла, в котором обозначены параметры изображения и координаты прямоугольников, описывающих местоположение объектов на изображении. Формат YOLO — текстовый файл, в котором обозначен класс объекта и координаты прямоугольников.

Также для преобразования аннотированных данных в формат YOLOv5 можно использовать **Roboflow**. Для этого нужно загрузить набор данных в рабочую область Roboflow, пометить изображения, затем создать и экспортировать версию набора данных в формат YOLOv5 Pytorch.

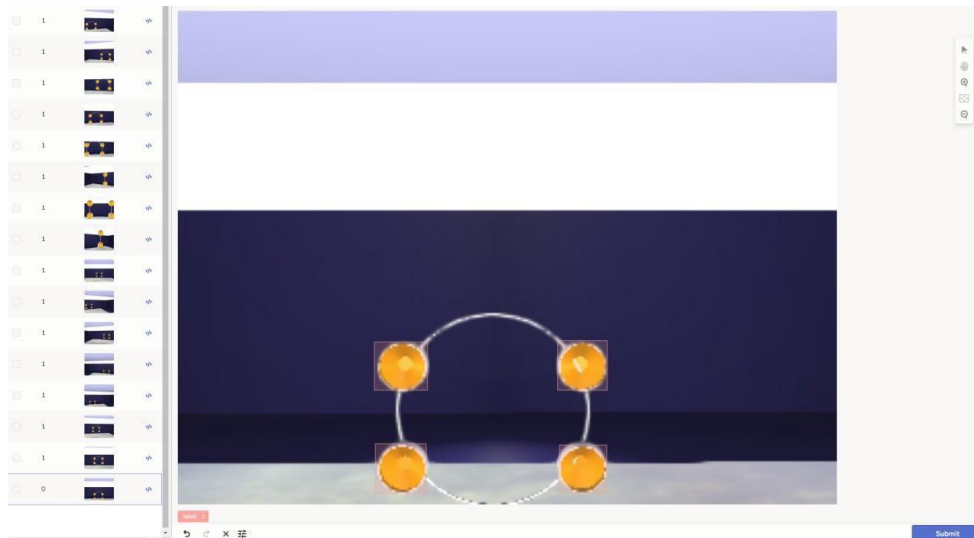


Рисунок 2.2 – Labelbox инструмент для разметки данных

На втором этапе нужно разделить данные на тренировочную, валидационную и тестовую выборку (70% / 20% / 10%). Клонировать репозиторий YOLOv5. Создать файл, где нужно указать пути к данным и классу, и запустить обучение (код программы представлен в Приложении А).

3. ЗАДАНИЕ НА ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

1. Разработать и проанализировать систему управления движением на основе визуальной обратной связи для одной точки в MATLAB. Изучить, как система минимизирует ошибку между текущим и желаемым положением точки на изображении, и визуализировать результаты для полной модели подводного аппарата.

2. Разработать алгоритм для распознавания док-станции в цветовом пространстве HSV с использованием среды разработки MURIDE (открыв сцену doc-station) и реализовать алгоритм движения.

3. Разработать алгоритм распознавания док-станции с использованием модели YOLOv5. Обучить предобученную модель на собственных данных в среде разработки MURIDE (открыв сцену doc-station) и реализовать алгоритм движения к распознанной док-станции.

4. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА И ПОРЯДОК ЗАЩИТЫ РАБОТЫ

Отчёт должен включать в себя следующие разделы:

- цель работы;
- постановка задачи – номер варианта, исходные данные, формула вычисления и значения входных переменных;
- краткие теоретические сведения, содержащие описания используемых функций MatLab, Python (назначение функции, перечень и назначение входных и выходных параметров, основные варианты вызова функции);
- тексты программ;
- результаты работы программ – числовые данные, графики;
- общие выводы по работе;
- перечень использованной литературы.

Выполнение и защита лабораторной работы производится каждым студентом индивидуально. Защита результатов лабораторной работы осуществляется при наличии работающих программ, полностью оформленного отчёта и состоит в следующем:

- представление работающих программ на компьютере;
- предъявление отчёта, оформленного в соответствии с указанными требованиями;
- ответы на вопросы преподавателя по теоретической и практической части работы.

5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

При сдаче лабораторной работы необходимо уметь выполнять все задания, приведённые в методических указаниях без использования справочной литературы. Уметь сформулировать все основные понятия, используемые в работе.

1. Что такое модель кинематики?
2. Какие системы отсчета используются для моделирования кинематики подводных аппаратов?
3. Для чего используются матрицы поворотов?
4. Что такое матрица взаимодействия L и как она связывает изменение координат точки на изображении с изменением скорости системы?
5. Почему важно использовать цветовое пространство HSV для задач распознавания?
6. Как определить диапазон цветов для поиска объекта в пространстве HSV?
7. Что такое момент изображения и для чего он используется?
8. Какие этапы необходимы для подготовки данных для обучения модели YOLOv5?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Fossen T.I. Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control. 2nd. Edition: Wiley, 2021. ISBN-13: 978-1119575054.
2. Antonelli G., Antonelli G. Underwater robots: motion and force control of vehicle manipulator systems / G. Antonelli, G. Antonelli, 2. ed-e изд., Berlin [и.а.]: Springer, 2006.
3. Fossen T. I. Guidance and control of ocean vehicles / T. I. Fossen, Chichester; New York: Wiley, 1994. 480 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

А1. Обучение Yolo

Создаем папки для хранения обучающих данных:

```
!mkdir -p ./yolo_data/fold1/images/val
!mkdir -p ./yolo_data/fold1/images/train

!mkdir -p ./yolo_data/fold1/labels/val
!mkdir -p ./yolo_data/fold1/labels/train
```

Скачиваем репозиторий YOLOv5

```
!git clone https://github.com/ultralytics/yolov5.git
```

Записываем настройки:

```
with open('./yolov5/data/reef_f1_naive.yaml', 'w') as fp:
    fp.write(data)
with open('./yolov5/data/hyps/hyp.heavy.2.yaml', 'w') as fp:
    fp.write(hyps)
```

Инициализируем

```
import wandb
wandb.login(key="здесь ваше код для Weights & Biases")
```

И запускаем обучение:

```
!python train.py --img 3840 --batch 4 --epochs 15 --data
reef_f1_naive.yaml --weights yolov5s6.pt --name
s6_3840_b8_uflip_vm5_f1 --hyp data/hyps/hyp.heavy.2.yaml
```

A2. Распознавание док-станции

```

import pymurapi as mur
import cv2 as cv
import torch

model = torch.hub.load("ultralytics/yolov5", "custom",
    path="best.pt", device="cpu")

auv = mur.mur_init()

if __name__ == '__main__':
    while True:
        auv.set_motor_power(0, 40)
        auv.set_motor_power(1, 40)
        image = auv.get_image_front()
        #cv.imshow("Front", image)
        # cv.imshow("Bottom", auv.get_image_bottom())
        results = model(image)

        detections = results.xyxy[0].numpy()

        for detection in detections:
            x1, y1, x2, y2, confidence, class_id = detection

            # Преобразование координат в целые числа
            x1, y1, x2, y2 = int(x1), int(y1), int(x2),
int(y2)

            center_x = (x1 + x2) // 2
            center_y = (y1 + y2) // 2

            # Рисование рамки вокруг объекта
            cv.rectangle(image, (x1, y1), (x2, y2), (0, 255,
0), 2)

            # Получение имени класса
            class_name = model.names[int(class_id)]

            # Добавление подписи с именем класса и
уверенностью
            label = f"{class_name} {confidence:.2f}"

```

```
cv.putText(image, label, (x1, y1 - 10),
cv.FONT_HERSHEY_SIMPLEX, 0.5, (0, 255, 0), 2)

# Вывод координат объекта
#print(f"Объект: {class_name}, Координаты: ({x1},
{y1}, {x2}, {y2}), Уверенность: {confidence:.2f}")
print(f"Объект: {class_name}, Центр: ({center_x},
{center_y}), Уверенность: {confidence:.2f}")
cv.imshow("Front", image)
#print(results.pandas().xyxy[0])
cv.waitKey(5)
```

**АЛГОРИТМЫ РАСПОЗНАВАНИЯ И НАВИГАЦИИ
К ДОК-СТАНЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ВИЗУАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ**

Методические указания

Составители: **Крамарь** Вадим Александрович,
Ляшко Александр Дмитриевич, **Якунин** Роман Денисович

В авторской редакции

Изд. № 79/2025. Объем 1 п.л. Усл. печ. л. 0,93. Уч.-изд. л. 0,98.
Издательский центр ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»