

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Комсомольский-на-Амуре государственный университет»

На правах рукописи

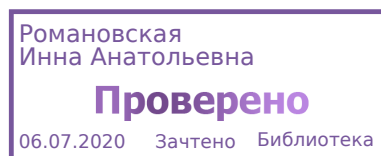
Иванова Татьяна Игоревна

**Исследование алгоритмов автоматизации процесса навигации
беспилотных судов**

Направление подготовки
27.04.04 - «Управление в технических системах»

**АВТОРЕФЕРАТ
МАГИСТЕРСКОЙ ДИССЕРТАЦИИ**

2020



Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре
государственный университет»

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Любушкина Надежда Николаевна

Рецензент: кандидат технических наук,
ведущий инженер
Якимов Антон Викторович
ПАО «Компания «Сухой»
КнААЗ им. Ю. А. Гагарина»

Защита состоится «30» июня 2020 г. в 09 час. 30 мин. на заседании государственной экзаменационной комиссии по направлению подготовки 27.04.04 «Управление в технических системах» в Комсомольском-на-Амуре государственном университете по адресу: 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27, ауд. 207/3.

Автореферат разослан 16 июня 2020 г.

Секретарь ГЭК

В.П. Егорова

Общая характеристика работы

В настоящее время всё большее распространение получают автономные безэкипажные надводные катера (БЭК, англ. Unmanned surface vehicles, USV) и маломерные суда, которые могут решать целый ряд задач: мониторинг и картирование дна для маневрирования судов, обслуживание и установка навигационных буев, мониторинг окружающей среды патрулирование территории, поисково-спасательные операции и т.д.

Успешный опыт применения USV США, Великобританией и Израилем позволяет сделать вывод о том, что уже в ближайшем будущем дорогостоящие суда с экипажем на борту будут дополняться и заменяться на менее дорогие безэкипажные системы. Большинство из представленных на рынке USV относятся к сегменту военной промышленности: Inspector, ECA Group, Europe; Protector USV, Rafael Advanced Defense Systems Ltd., Israel. Коммерческий сегмент USV представлен разработками: MARINER Robotics Norvège, SEAWORKER и др. Подобные устройства для военных задач разрабатывают и в России: БУК, Тайфун, Искатель и др.

На текущий момент навигация осуществляется с помощью GPS или ГЛОНАСС, а также радара и лидара. Альтернативным источником данных для навигации в бортовых системах управления USV может служить цифровая камера видеонаблюдения. Большинство современных бортовых систем навигации USV на основе технического зрения работают в автоматизированном режиме с передачей предварительно обработанного видеоизображения оператору. Однако такой подход требует наличия связи с наземным пунктом управления.

Дальнейшее развитие полностью автономных USV необходимо для того, чтобы свести к минимуму необходимость контроля со стороны человека. Тогда один оператор сможет одновременно управлять группой аппаратов, вмешиваясь только при возникновении нештатных ситуаций или для обновления задания.

Данная задача может быть решена только с использованием алгоритмов компьютерного зрения. Большая часть подходов использует аппарат нейронных сетей или классические методы обработки изображений.

Однако, несмотря на большое количество работ в области обработки изображений, разработка новых методов обнаружения и распознавания объектов на изображениях с визуальных сенсоров USV является актуальной задачей. Перспективным представляется разработка алгоритмов распознавания образов и автоматического управления и реализация их в бортовых программно-аппаратных комплексах управления безэкипажным в сложных морских условиях.

Настоящая работа посвящена повышению эффективности алгоритмов распознавания образов и управления безэкипажным катером за счет повышения устойчивости их к воздействию внешних условий и снижению вычислительных требований. Работа ориентирована главным образом на практическое применение разработанных алгоритмов в современных системах управления автономными судами.

Целью настоящей работы является повышение эффективности процесса автоматической навигации безэкипажного катера за счет применения модифицированных алгоритмов глубинного обучения для распознавания объектов.

В соответствии с целью ставятся следующие **задачи исследования**:

1. Провести критический анализ существующих методик обнаружения и распознавания объектов на изображениях с визуальных сенсоров безэкипажного катера.
2. Провести анализ алгоритмов управления автономными судами.
3. Разработать модифицированный алгоритм обнаружения и распознавания надводных объектов на изображениях с камер безэкипажного катера в режиме реального времени с использованием глубинных нейронных сетей.
4. Разработать модифицированный алгоритм на основе нечеткой логики

для управления безэкипажным катером с использованием информации, распознанной на видеоизображении и полученной с сенсоров.

5. Реализовать программные модули для управления безэкипажным катером с использованием предложенных алгоритмов.

6. Провести тестирование разработанных алгоритмов с использованием полунатурных экспериментов.

Научная новизна работы:

Предложен модифицированный глубинный нейросетевой алгоритм для обнаружения и распознавания надводных объектов на изображениях с камер безэкипажного катера в режиме реального времени на бортовом вычислительном модуле.

Предложен модифицированный алгоритм для автоматизированной навигации беспилотного судна на основе нечеткой логики с использованием информации, распознанной на видеоизображении и полученной с сенсоров.

Практическая значимость работы:

Разработанные алгоритмы обнаружения, распознавания объектов и управления безэкипажным катером с использованием методов глубинного обучения и нечеткой логики могут быть применены при разработке современных систем автономного управления малыми катерами.

Объект исследования — системы автоматической навигации беспилотных судов.

Предмет исследования — нейросетевые и нечёткие алгоритмы распознавания образов в системах автоматической навигации.

Методы исследования:

Для теоретического и практического решения поставленных задач использовались методы и алгоритмы цифровой обработки сигналов и изображений, теория нечетких множеств, системный анализ, методы прикладного программирования.

Степень достоверности и апробации работы. Основные выводы и положения, сформулированные в процессе работы над диссертацией, нашли

подтверждение в ходе теоретических и экспериментальных исследований. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на II Всероссийской национальной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований» КнАГУ, г. Комсомольск-на-Амуре (2019 г., 2020 г.), Международной научно-практической конференции: Производственные технологии будущего: от создания к внедрению (2018 г., 2019 г.), Международной мультидисциплинарной конференции по промышленному инжинирингу и современным технологиям «Far East Con-2019». Результаты работы были представлены на международной олимпиаде IT-Планета, где заняла I место.

Публикации. Результаты диссертационного исследования опубликованы в четырех научных изданиях, индексируемых базой РИНЦ, а также в одном издании Scopus.

Реализация результата работы. Результаты, полученные в ходе исследования, могут применяться в качестве исходных данных при разработке технического задания на создание программно-аппаратного комплекса для управления безэкипажным катером.

Личный вклад автора состоит в изучении и сборе научнотехнической информации по тематике диссертации, разработке и обоснования технических решений, разработке лабораторного образца и проведении испытаний, обработка результатов экспериментов, подготовка публикаций по выполненной работе.

Работа выполнена в рамках научно-исследовательской работы по программе «У.М.Н.И.К. - 2019» при поддержке «Фонда содействия малых форм предприятий в научно-технической сфере» по теме «Разработка программно-аппаратного комплекса для управления безэкипажным катером с использованием методов глубинного обучения» договор № 13631ГУ/2018

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников из 38 наименований.

Работа представлена на 112 страницах, содержит 38 рисунков и 11 таблиц и 6 приложений.

Содержание работы

Во введении сформулирована и обоснована актуальность темы исследования, обозначена цель работы и задачи для её достижения, изложена новизна и практическая значимость результатов исследования.

В первой главе проведен литературный обзор и анализ проблем управления безэкипажными катерами. Приведены алгоритмы и технологии управления безэкипажным катером. Рассмотрены подходы и алгоритмы распознавания надводных объектов с использованием средств технического зрения. Наиболее эффективные системы управления безэкипажным катером, строятся на базе алгоритмов искусственного интеллекта с применением технологий нечеткой логики и компьютерного зрения. Причем перспективными являются методы, основанные на применении глубоких нейронных сетей.

Вторая глава посвящена математической постановке и решению задачи управления безэкипажным катером с использованием визуальной информации. Приведены теоретические вопросы проектирования системы управления с помощью нечеткого управления и компьютерного зрения: разработаны алгоритмы детекции и классификации кораблей с использованием глубоких нейронных сетей, разработан алгоритм управления безэкипажным катером на базе Правил предупреждения столкновений судов в море (англ. COLREG).

Пусть имеются вектор состояний USV $\mathbf{x} = (\mathbf{x}_{ПС}^T, \mathbf{x}_{КН}^T, \mathbf{x}_{НО}^T, \mathbf{x}_{УУ}^T, \mathbf{x}_{РП}^T, \mathbf{x}_{ВС}^T)^T$, и вектор выходных сигналов (измерений) для USV $\mathbf{y} = (\mathbf{y}_{НВ}^T, \mathbf{y}_{НО}^T, \mathbf{y}_{УУ}^T, \mathbf{y}_{ВС}^T)^T$. Необходимо по результатам наблюдений $\mathbf{y}$ состояний НО $\mathbf{x}$ выработать оценки состояний $\tilde{\mathbf{x}}$ и необходимые управляющие воздействия $\mathbf{u}$ на объект управления, $\mathbf{u} = (\mathbf{u}_{УУ}^T, u_{БД})^T$. Таким образом, ставится задача по кадру видеопотока определить состояние наблюдаемого окружения, включающее

наличие и количество объектов-препятствий (КОП) n , параметры каждого объекта (ПО), включающие в себя β_k – класс, α_t^k – пеленг (угол между направлением стрелки компаса и направлением по которому виден объект), L_t^k – расстояние, w^k, h^k – ширину и длину каждого объекта $k = \overline{1, n}$ в момент времени t , что является задачей распознавания образов. Тогда решение задачи управления USV разбивается на ряд подзадач: найти объект; классифицировать объект; рассчитать параметры объекта; принять решение о наличии ситуации и действиям по ее предотвращению с учетом внешних данных (воздействий), расчетных данных и предыдущем состоянии системы.

Формально данную задачу можно решить реализовав два блока: блок распознавания образов и блок принятия решения (предотвращения столкновений) (рисунок 1).

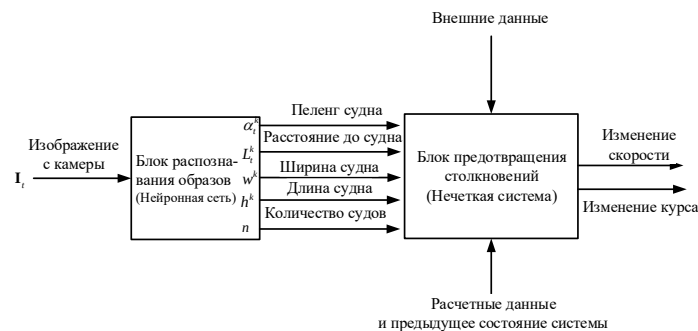


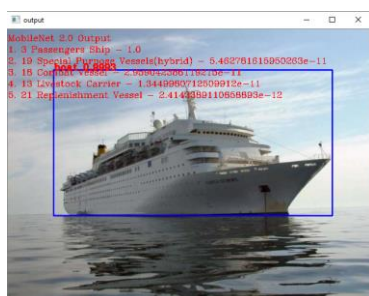
Рисунок 1 – Взаимодействие данных между блоками

- 1) По кадру I_t обнаружить и классифицировать надводный объект и рассчитать его параметры. В качестве классификатора разработана модифицированная архитектура глубокой нейронной сети (рисунок 2)

Input Size	Type / Stride	Filter Shape	Output Size
224 × 224 × 3	Conv / s2	3 × 3 × 3 × 32	112 × 112 × 32
112 × 112 × 32	Conv dw / s1	3 × 3 × 32 dw	112 × 112 × 32
112 × 112 × 32	Conv / s1	1 × 1 × 32 × 64	112 × 112 × 64
112 × 112 × 64	Conv dw / s2	3 × 3 × 64 dw	56 × 56 × 64
56 × 56 × 64	Conv / s1	1 × 1 × 64 × 128	56 × 56 × 128
56 × 56 × 128	Conv dw / s1	3 × 3 × 128 dw	56 × 56 × 128
56 × 56 × 128	Conv / s1	1 × 1 × 128 × 128	56 × 56 × 128
56 × 56 × 128	Conv dw / s2	3 × 3 × 128 dw	28 × 28 × 128
28 × 28 × 128	Conv / s1	1 × 1 × 128 × 256	28 × 28 × 256
28 × 28 × 256	Conv dw / s1	3 × 3 × 256 dw	28 × 28 × 256
28 × 28 × 256	Conv / s1	1 × 1 × 256 × 256	28 × 28 × 256
28 × 28 × 256	Conv dw / s2	3 × 3 × 256 dw	14 × 14 × 256
14 × 14 × 256	Conv / s1	1 × 1 × 256 × 512	14 × 14 × 512
14 × 14 × 512	5 × Conv dw / s1	3 × 3 × 256 dw	14 × 14 × 512
14 × 14 × 512	Conv / s1	1 × 1 × 512 × 512	14 × 14 × 512
14 × 14 × 512	Conv dw / s2	3 × 3 × 512 dw	7 × 7 × 512
7 × 7 × 512	Conv / s1	1 × 1 × 512 × 1024	7 × 7 × 1024
7 × 7 × 1024	Conv dw / s2	3 × 3 × 1024 dw	7 × 7 × 1024
7 × 7 × 1024	Conv / s1	1 × 1 × 1024 × 1024	7 × 7 × 1024
7 × 7 × 1024	Avg Pool / s1	Pool 7 × 7	1 × 1 × 1024
1 × 1 × 1024	FC / s1	1024 × 23	1 × 1 × 23
1 × 1 × 23	Softmax / s1	Classifier	

Рисунок 2 – Архитектура нейронной сети для классификации судов

В результате моделирования точность составила 99,6% на валидационном множестве. Метрика «Топ 5 Ассурасу» на тестирующем множестве составила 96,03%.



1. 3 Passengers Ship - 1.0
2. 19 Special Purpose Vessels(hybrid) - 5.462781615950263e-11
3. 18 Combat Vessel - 2.959042386119215e-11
4. 13 Livestock Carrier - 1.3449980712509912e-11
5. 21 Replenishment Vessel - 2.4143389110858893e-12

Рисунок 3 – Пример распознавания

2) Принять решение о наличии нештатной ситуации и выработать управляющее воздействие на перо руля и двигатели судна. Предлагаемый в данной работе вариант использования нечёткой модели для расчета изменения собственных курса и скорости основан на алгоритме Мамдани и состоит из 440 правил базовых правил. Дополнительный набор состоит из 200 правил и учитывает классы судов, их маневренные характеристики, видимость, а также плотность движения.

В третьей главе приведена программно-аппаратная реализация системы автоматического управления безэкипажным судном.

Проведены экспериментальные исследования программно-аппаратного комплекса на базе встраиваемого вычислительного модуля и симмуляционной среды.

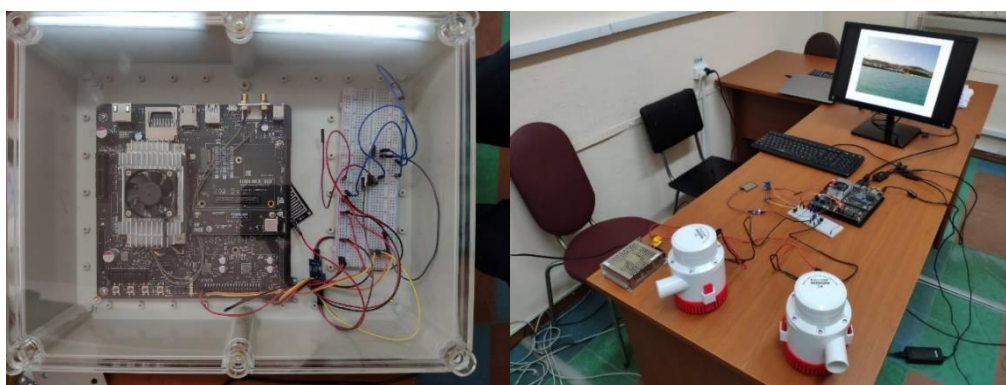
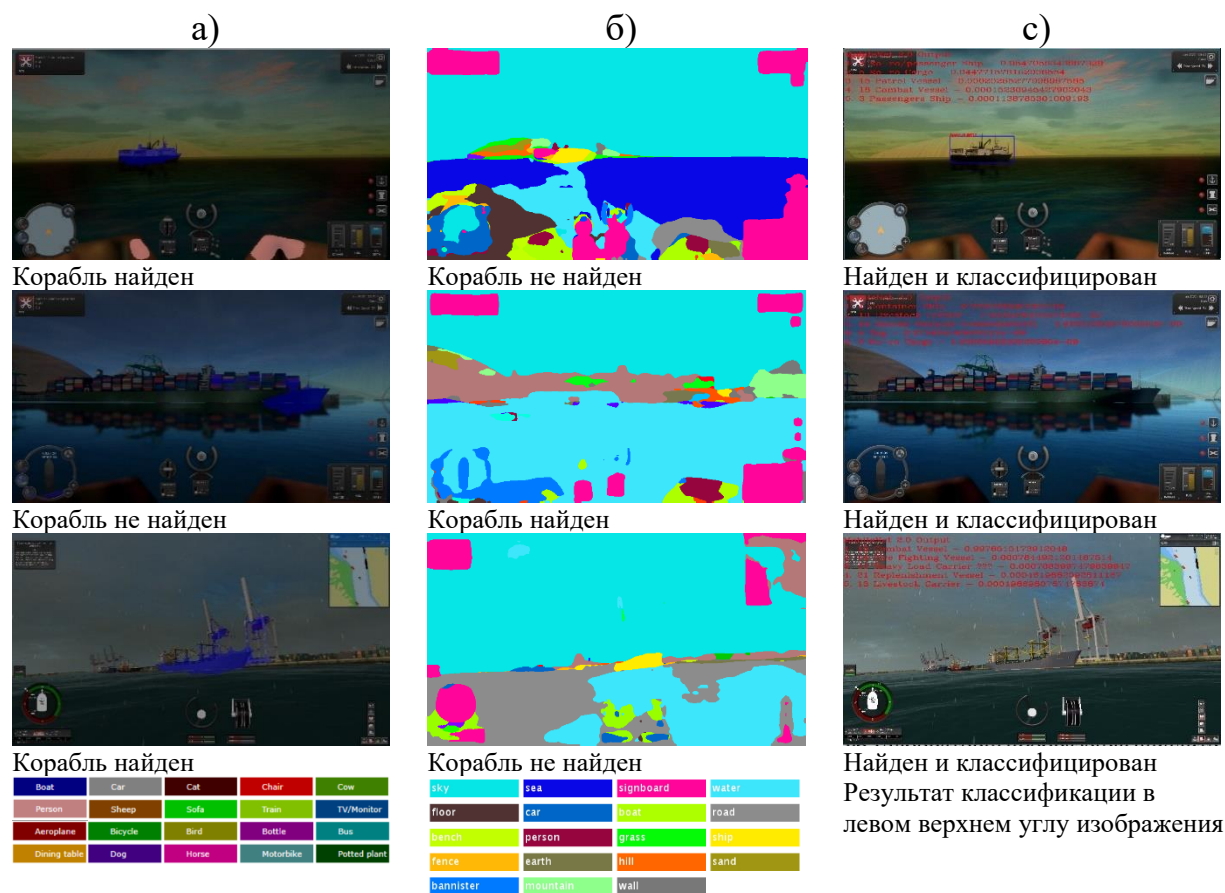


Рисунок 4 – Внешний вид прототипа

Оценка алгоритма управления выполнена путем имитационного и полунатурных экспериментов по воссозданию проблемных морских ситуаций



а) RNN б) HRNet в) YOLO и MobileNet

Рисунок 5 – Тестирование алгоритмов

В четвертой главе содержится технико-экономическое обоснование проекта по разработке программно-аппаратного комплекса для управления безэкипажным катером, в которое входит прогнозирование перспектив развития и совершенствования технологического процесса, конкурентный анализ, расчет экономической эффективности. Приведен кейс-расчет экономической эффективности внедрения программно-аппаратного для клиента для автоматизации процесса батиметрии.

Результаты и выводы по работе

1. Проведен анализ проблем существующих решений по автоматической навигации беспилотных судов. Проведен обзор методик обнаружения и распознавания объектов на изображениях с визуальных сенсоров

безэкипажного катера, а также анализ алгоритмов управления автономными судами.

2. Приведена математическая постановка задачи для управления безэкипажным катером с использованием математического аппарата теории управления и теории распознавания образов.

3. Разработана концепция системы управления безэкипажным катером, состоящая из блока распознавания образов и блока управления

4. Разработан модифицированный алгоритм обнаружения и распознавания надводных объектов на изображениях с камер безэкипажного катера в режиме реального времени с использованием глубоких нейронных сетей. Модификация заключалась в изменении архитектуры существующей нейронной сети в части добавления и слоев и переобучении ее на собственном датасете. Предложенный подход позволяет достигнуть результатов классификации до 96% в режиме реального времени.

5. Разработан нечеткий алгоритм управления безэкипажным катером на базе Правил предупреждения столкновений судов в море. Алгоритм предупреждения столкновений был реализован в системе Matlab.

6. Разработанные программы на языке Python реализованы в опытном образце программно-аппаратного комплекса.

7. Для тестирования разработанных алгоритмов использовался симулятор морских миссий World ship simulator и Ship Simulator Extremes. Изображения, поступающие на монитор, перехватывались и передавались на вход нейронной сети. Для управления виртуальным кораблем эмулировались нажатия клавиш на клавиатуре. Были протестированы различные алгоритмы сегментации, детекции и классификации. Показано, что предложенная архитектура полностью справляется с задачей классификации. Проведенный эксперимент доказывает возможность применения разработанных алгоритмов в качестве аварийной системы предотвращения столкновений.

Основные положения магистерской диссертации опубликованы в работах:

1. Ivanov Y.S., Zhiganov S.V., Ivanova T.I Intelligent Deep Neuro-Fuzzy System Recognition of Abnormal Situations for Unmanned Surface Vehicles, 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon-2019, Vladivostok, Russia, 1–4 October, 2019. – 6 p <https://doi.org/10.1109/FarEastCon.2019.8934353> (Scopus)

2. Иванова, Т.И. Программа для распознавания кораблей на изображениях с камер безэкипажного катера / Ю. С. Иванов, С. В. Жиганов, Т.И. Иванова. / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020615307 от 20.05.2020.

3. Иванова, Т.И. Применение сверточной нейронной сети MobileNet для классификации судов / Т.И. Иванова, С.В. Жиганов, Ю.С. Иванов // Производственные технологии будущего: от создания к внедрению: Материалы Международной научно-практической конференции, Комсомольск-на-Амуре, 14 июня 2019. – С. 124-128

4. Иванова, Т.И. Применение алгоритма обучения с подкреплением для построения маршрута безэкипажным катером / Т.И. Иванова, С.В. Жиганов, Г.П. Жиганова, Ю.С. Иванов// Производственные технологии будущего: от создания к внедрению: Материалы Международной научно-практической конференции, Комсомольск-на-Амуре, 14 июня 2019. –С. 128-132

5. Иванова, Т.И. Разработка программно-аппаратного комплекса для управления безэкипажным катером / Т.И. Иванова // : Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований материалы II Всероссийской национальной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых., Комсомольск-на-Амуре, 2019. – С. 311-314

6. Иванова, Т.И. Обзор методов и технологий распознавания образов для безэкипажных катеров/ Т.И. Иванова// Производственные технологии будущего: от создания к внедрению: Материалы Международной научно-практической конференции, Комсомольск-на-Амуре, 2018. – С. 88-92