

Modeling the influence of external influences on the process of automated landing of a UAV-quadcopter on a moving platform using technical vision

A. V. Ryabinov¹, A. I. Saveliev¹, D. A. Anikin¹

DOI: [10.18255/1818-1015-2023-4-366-381](https://doi.org/10.18255/1818-1015-2023-4-366-381)

¹St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS), 39, 14th Line, VI, St. Petersburg, 199178, Russia.

MSC2020: 68T40

Research article

Full text in Russian

Received November 7, 2023

After revision November 23, 2023

Accepted November 29, 2023

This article describes a series of experiments in the Gazebo simulation environment aimed at studying the influence of external weather conditions on the automatic landing of an unmanned aerial vehicle (UAV) on a moving platform using computer vision and a previously developed control system based on PID and polynomial controllers. As part of the research, methods for modeling external weather conditions were developed and landing tests were carried out simulating weather conditions such as wind, light, fog and precipitation, including their combinations. In all experiments, successful landing on the platform was achieved; during the experiments, landing time and its accuracy were measured. The graphical and statistical analysis of the obtained results revealed the influence of illumination, precipitation and wind on the UAV landing time, and the introduction of wind into the simulation under any other external conditions led to the most significant increase in landing time. At the same time, the study failed to identify a systemic negative influence of external conditions on landing accuracy. The results obtained provide valuable information for further improvement of autonomous automatic landing systems for UAVs without the use of satellite navigation systems.

Keywords: unmanned aerial vehicle; quadcopter; marker detection; automated landing; computer vision; navigation

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Artyom V. Ryabinov	orcid.org/0000-0002-3572-4493 . E-mail: ryabinov.a@iias.spb.su Programmer.
Anton I. Saveliev corresponding author	orcid.org/0000-0003-1851-2699 . E-mail: saveliev@iias.spb.su Senior Researcher.
Dmitriy A. Anikin	orcid.org/0009-0007-6998-5687 . E-mail: anikin.d@iias.spb.su Programmer.

For citation: A. V. Ryabinov, A. I. Saveliev, and D. A. Anikin, "Modeling the influence of external influences on the process of automated landing of a UAV-quadcopter on a moving platform using technical vision", *Modeling and analysis of information systems*, vol. 30, no. 4, pp. 366-381, 2023.

Моделирование влияния внешних воздействий на процесс автоматизированной посадки БПЛА-квадрокоптера на подвижную платформу с использованием технического зрения

А. В. Рябинов¹, А. И. Савельев¹, Д. А. Аникин¹

DOI: 10.18255/1818-1015-2023-4-366-381

¹Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук, 14-я линия В. О. д. 39, г. Санкт-Петербург, 199178, Россия.

УДК 623.746.-519

Научная статья

Полный текст на русском языке

Получена 7 ноября 2023 г.

После доработки 23 ноября 2023 г.

Принята к публикации 29 ноября 2023 г.

В данной статье проводится описание серии экспериментов в симуляционной среде Gazebo, направленных на исследование влияния внешних погодных условий на автоматическую посадку беспилотного летательного аппарата (БПЛА) на движущуюся платформу с использованием компьютерного зрения и разработанной ранее системы управления, основанной на ПИД и полиномиальных регуляторах. В рамках исследования разработаны методы моделирования внешних погодных условий, и проведены тесты посадки с имитацией таких погодных условий, как ветер, освещенность, туман и осадки, включая их комбинации. Во всех экспериментах была достигнута успешная посадка на платформу, в ходе экспериментов измерялось время посадки и ее точность. Проведенный графический и статистический анализ полученных результатов выявил влияние освещенности, осадков и ветра на время посадки БПЛА, а введение ветра в симуляцию при любых других внешних условиях привело к наиболее значительному увеличению времени посадки. При этом в ходе исследования не удалось выявить системного негативного влияния внешних условий на точность посадки. Полученные результаты представляют ценную информацию для дальнейшего совершенствования систем автономной автоматической посадки БПЛА без использования спутниковых систем навигации.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат; квадрокоптер; детектирование маркера; автоматизированная посадка; компьютерное зрение; навигация

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Артём Валерьевич Рябинов	orcid.org/0000-0002-3572-4493 . E-mail: ryabinov.a@iias.spb.su программист.
Антон Игоревич Савельев автор для корреспонденции	orcid.org/0000-0003-1851-2699 . E-mail: saveliev@iias.spb.su старший научный сотрудник.
Дмитрий Андреевич Аникин	orcid.org/0009-0007-6998-5687 . E-mail: anikin.d@iias.spb.su программист.

Для цитирования: A. V. Ryabinov, A. I. Saveliev, and D. A. Anikin, "Modeling the influence of external influences on the process of automated landing of a UAV-quadcopter on a moving platform using technical vision", *Modeling and analysis of information systems*, vol. 30, no. 4, pp. 366-381, 2023.

Введение

В современном мире наблюдается растущий спрос на автономные технологии и беспилотные системы, которые находят широкое применение в различных областях, таких как сельское хозяйство [1], [2], транспортная промышленность [3], [4], картографирование местности [5], [6], обследование линий электропередач [7], сейсмология [8]. Особый интерес представляют мультироторные БПЛА с четырьмя винтами, известные как квадрокоптеры. Они обладают рядом преимуществ, таких как возможность вертикального взлета и посадки, что делает их идеальными для работы в условиях ограниченного пространства. Квадрокоптеры также отличаются высокой маневренностью, способностью летать в любом направлении и поворачивать на месте. Это делает их идеальными для выполнения задач в городских условиях, таких как доставка товаров, съемка видео, инспекция зданий и т. д.

Для разработчиков мультироторных беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) одна из серьезных проблем — создание системы автоматической посадки на заданную точку, которая бы адаптировалась к различным условиям, таким как ветер, освещение, препятствия и т. д. Сейчас большинство коммерческих и открытых систем автопилотирования используют систему глобального позиционирования (Global Positioning System, GPS) для посадки, но это имеет свои недостатки. Для посадки по GPS БПЛА должен иметь спутниковый сигнал и достаточное количество места для посадки. Однако в некоторых случаях GPS может быть недоступен или иметь погрешность, например, в городских зонах или рядом с высокими зданиями. Это может привести к неудачной посадке и повреждениям БПЛА. К тому же посадка по GPS не гарантирует высокую точность и не учитывает возможные изменения в окружающей среде в процессе посадки. Еще одна проблема — это то, что иногда нужно садиться не на неподвижную платформу, а на движущуюся (например, другое роботизированное средство). Перспективным для решения этих проблем выступает использование технологий компьютерного зрения, которые позволят БПЛА распознавать место посадки и анализировать ситуацию в реальном времени, что увеличит точность и избавит от необходимости использования GPS. В предыдущем исследовании [9] была изучена возможность реализации автоматической системы посадки БПЛА-квадрокоптера на заранее определенную подвижную посадочную платформу в условиях различной высоты полета, проведена разработка и апробация соответствующих алгоритмов в ходе экспериментов по моделированию автоматизированной посадки с различной высоты в среде Gazebo (<https://gazebosim.org/about>) в идеальных условиях. Текущее же исследование фокусируется на влиянии различных гетерогенных погодных условий (ветер, освещенность, дождь, туман) и их комбинаций на процесс посадки. Была проведена серия экспериментов, включающая в себя посадку без внешних условий как контрольную, и ряд посадок с различными внешними условиями, в ходе которых были получены и проанализированы такие показатели, как время посадки и точность пространственного позиционирования БПЛА после посадки. В результате проведенного графического и статистического анализа выявлено значительное влияние на время посадки таких внешних факторов, как ветер, дождь и пониженная освещенность. Данное исследование имеет большую практическую значимость, так как улучшение производительности системы посадки БПЛА позволит повысить автономность, эффективность контроля и наблюдения за территориями, а также снизить риски возникновения аварийных ситуаций при посадке.

Данная статья организована следующим образом: в разделе 1 приводится анализ литературы по смежным исследованиям, а также постановка задачи. Раздел 2 содержит описание используемых для проведения экспериментов методов, алгоритмах и средах. Раздел 3 включает в себя описание и результаты экспериментов. В разделе 4 приведен анализ полученных экспериментальных данных и выводы. Наконец, в заключении подводятся итоги и обозначается вектор дальнейшего развития исследования.

1. Анализ существующих исследований в предметной области и постановка задачи

Авторы статьи [10] представили метод на основе компьютерного зрения для навигации БпЛА, позволяющий обнаруживать, следовать и приземляться на движущейся наземной робототехнической платформе с использованием маркеров ArUcO. Они провели тестирование в симуляционной и реальной среде, однако не предоставили результаты времени посадки и точности. Максимальная высота полета составила четыре метра. Планируется исследование масштабируемости метода для сценариев с несколькими воздушными и наземными роботами.

В работе [11] представлена автономная система для взлета и посадки БпЛА на движущейся платформе с использованием маркеров ArUcO. Авторы создали локальный планировщик движения, генерирующий бесколлизийные траектории, и разработали автономный конечный автомат для выполнения задач взлета, отслеживания и посадки. Исследования проводились в симуляторе Prometheus5 (ROS/Gazebo) и в реальных экспериментах. Максимальная высота в симуляции составила 4,5 метра, а в реальности — один метр. Скорость полета — 0,83 м/с. Однако информация о времени посадки и точности отсутствует. Также не предоставлены данные о скорости ветра и учете внешних условий. В дальнейших исследованиях авторы планируют сфокусироваться на задачах более высокой скорости и меньшей точности посадки на движущиеся цели, с улучшением точности приземления.

В статье [12] авторы представили полностью автономную систему на основе машинного зрения, которая решает задачу посадки беспилотного квадрокоптера на движущуюся платформу в условиях турбулентных ветров. Их метод интегрирует локализацию, планирование и управление, учитывая воздействие ветра. Авторы предлагают два режима оценки положения платформы: на большом расстоянии — с использованием расширенного фильтра Калмана и смоделированных GPS-измерений, и вблизи — с использованием фидуциальных меток AprilTag. Для управления в условиях ветровых порывов разработан вспомогательный контроллер, учитывающий граничный слой воздуха. Исследования включают имитационное моделирование с ветрами устойчивого типа и реальные эксперименты в помещении с искусственно созданными ветрами. Высота полета составляет 0,5 м, а скорость посадки занимает 5,7 секунд для статической платформы и 11,5 секунд для движущейся. Однако авторами не были представлены данные о точности посадки. В будущем они планируют расширить метод на более разнообразные условия, включая посадку на движущемся пикапе на открытом воздухе, с использованием визуально-инерционной одометрии для оценки состояния на борту.

В работе [13] представлен метод автономной посадки микро-БпЛА на движущуюся платформу с использованием модельно-предсказывающего управления. Этот метод требует широкополосных контуров управления с обратной связью для обеспечения безопасной посадки в условиях различных неопределенностей и ветровых помех. Архитектура системы включает в себя динамическое моделирование БпЛА, применение фильтра Калмана для оптимальной локализации мобильной платформы и разработку прогнозирующего управления моделями для наведения БпЛА. Исследования проводились с использованием симуляций как с ветром, так и без воздействия внешних условий. Высота полета составляла три метра, а скорость ветра варьировалась до 5 м/с. В симуляции без ветра точность посадки составила 0,21 метра, а время посадки составило 44,25 секунды. При наличии ветра точность уменьшилась до 0,37 метра, а время посадки увеличилось до 105,24 секунд. Однако авторы не предоставили информацию о работе системы в реальных условиях и не уделили внимание сбоям и восстановлению, что является предметом дальнейших исследований.

В работе [14] представлено решение для точной вертикальной посадки беспилотных летательных аппаратов с использованием маркеров ArUcO. Авторы исследовали возможность посадки с высоты более 20 метров, чтобы компенсировать большие погрешности GPS. Для имитационного моде-

лирования была разработана собственная симуляционная платформа и использован пакет ArduSim. Высота полета составляла 20 метров, и средняя точность посадки составила 11 сантиметров. Время посадки заняло 162 секунды при скорости ветра 2,7 м/с. В дальнейших работах авторы планируют варьировать скорость снижения в зависимости от высоты БПЛА и использовать одновременное управление тангажом и креном, чтобы летательный аппарат мог следовать по диагональным линиям при посадке. Также авторы планируют оптимизировать алгоритм для обеспечения посадки в менее благоприятных погодных условиях.

В работе [15] представлена система автономной посадки мультироторного БПЛА на движущуюся платформу с использованием визуального следящего устройства. Эта система объединяет GPS-положение как БПЛА, так и платформы, чтобы обеспечить навигацию БПЛА, даже когда ориентир находится за пределами зоны видимости камеры или находится в ее слепой зоне. Высота полета БПЛА составляла четыре метра, а время посадки составило 35 секунд с точностью в 30 см. В работе не было представлено информации о влиянии внешних факторов, несмотря на проведение экспериментов в реальной среде. В будущем авторы намерены проводить совместные эксперименты с несколькими БПЛА и несколькими движущимися платформами для дальнейшего улучшения системы автономной посадки.

Проведя анализ предложенных решений, можно прийти к выводу, что во многих работах не указывается точность позиционирования при посадке и не учитывается влияние воздействия внешней среды, помимо ветра. В большинстве работ учитывается только одна скорость ветра и не принимается во внимание возможное изменение направления. Также почти все работы исследуют посадку на малых высотах (до 6 м). Помимо этого, предложенное нами решение во многом преуспевает либо в точности посадки, либо в скорости.

Исходя из вышесказанного, целесообразно осуществить исследование данной области, изменяя высоту и учитывая другие внешние параметры (затемнение, туман, различное направление и скорость ветра). Рассмотрим экспериментальную среду $S = \{\tau, \varepsilon\}$, характеризующуюся временем посадки τ , выраженным как время в секундах, прошедшее с момента начала эксперимента до посадки БПЛА на платформу, и пространственной точностью позиционирования ε , выраженной как расстояние в метрах от центра БПЛА до центра платформы в момент завершения посадки. Эта среда характеризуется набором моделируемых внешних факторов $F = \{f_1, f_2, f_3, f_4\}$, а именно:

- ветер: $f_1(d, i)$, где $d \in \{1, 2, \dots, 8\}$ — направление ветра (север, северо-запад, запад, юг и т. д.), $i \in \mathbb{R}$ — интенсивность ветра в м/с;
- освещенность: $f_2(p)$, где $p \in [0, 100]$ — степень затемнения;
- дождь: $f_3(r)$, где $r \in [1, 256]$ — интенсивность дождя;
- туман: $f_4(\theta)$, где $\theta \in [0, 1]$ — интенсивность тумана.

Время посадки и точность позиционирования БПЛА ε можно выразить как функционалы от этих факторов:

$$\tau = \varphi_\tau [f_1(d, i), f_2(p), f_3(r), f_4(\theta)],$$

$$\varepsilon = \varphi_\varepsilon [f_1(d, i), f_2(p), f_3(r), f_4(\theta)].$$

Тогда экспериментальная среда S определяется следующим образом:

$$S = \{\tau, \varepsilon\} = \{\varphi_\tau [f_1(d, i), f_2(p), f_3(r), f_4(\theta)], \varphi_\varepsilon [f_1(d, i), f_2(p), f_3(r), f_4(\theta)]\}.$$

Таким образом, задача исследования состоит в изучении функционалов $\varphi_\tau(F)$ и $\varphi_\varepsilon(F)$ в контексте экспериментальной среды S с использованием статистического анализа данных, полученных в ходе экспериментов. Это позволит определить, какие факторы или их комбинации оказывают влияние на время (τ) и точность (ε) посадки.

2. Материалы и методы

2.1. Используемые модели

Эксперименты проводятся в среде моделирования Gazebo. В качестве подвижной посадочной платформы используется модифицированная модель дифференциального колесного робота Clearpath Husky UGV (<https://clearpathrobotics.com/husky-unmanned-ground-vehicle-robot>), на которой размещен фрактальный ArUco маркер размером 1×1 метр с пятью уровнями вложенности. В работе используется модель квадрокоптера 3DR Iris (https://docs.px4.io/v1.12/en/simulation/gazebo_vehicles.html#quadrotor), предоставляемая PX4 SITL-симуляцией. Дополнительно на модель установлена нижняя RGB камера разрешением 640×480 и частотой 30 кадров/с.

2.2. Алгоритм контроля посадки

В работе используется алгоритм описанный в [9]. Наведение БПЛА на центр платформы осуществляется путем задания линейных скоростей по осям X, Y, Z контроллером посадки автопилоту. Контроллер посадки состоит из двух адаптивных по высоте пропорционально-интегрально-дифференцирующих (ПИД) регуляторов, генерирующих линейные скорости по осям X, Y и логарифмически полиномиального регулятора (ЛП), генерирующего линейные скорости по оси Z в зависимости от полученных относительных координат $\Delta r = [\Delta x, \Delta y, \Delta z]^T$.

Алгоритм посадки функционирует следующим образом: когда маркер попадает в поле зрения камеры, ПИД-регуляторы горизонтального движения начинают генерировать линейные скорости, необходимые для преследования платформы. В это же время ЛП-регулятор движения по вертикали остается неактивным, т.е. БПЛА преследует платформу на изначальной высоте. Когда БПЛА находится в пределах 0,45 м от центра платформы, что считается оптимальным отклонением для снижения, активизируется ЛП-регулятор, происходит одновременное преследование платформы и снижение. Процесс посадки считается законченным, когда отклонение по оси Z становится менее 0,1 м и сохраняется условие для снижения. При более низкой высоте маркер становится нераспознаваемым. Далее происходит отключение моторов.

В случаях выпадения платформы из поля зрения камеры после детектирования по истечению трех секунд производится попытка взлета вверх со скоростью 5 м/с с целью увеличения поля зрения камеры. Если в течение двух секунд обнаружить платформу повторно не удалось, производится аварийное возвращение на исходную GPS позицию для повторного маневра.

2.3. Способы имитации погодных условий

Параметры окружающей среды могут оказывать значительное влияние на систему компьютерного зрения. Плохая освещенность, атмосферные явления, такие как осадки или туман, ухудшают качество изображения и уменьшают видимость, что затрудняет стабильное отслеживание платформы. Имитация погодных условий осуществляется путем добавления визуальных эффектов и манипуляцией над кадром с помощью инструментов OpenCV.

2.4. Моделирование влияния ветровых возмущений

Для моделирования влияния ветра $f_1 = (d, i)$ на БПЛА использовался плагин libgazebo wind (<https://docs.px4.io/v1.12/en/simulation/gazebo.html#change-wind-speed>), предоставляемый PX4 SITL симуляцией. Скорость ветра i передается в виде трехмерного вектора скоростей, состоящего из постоянной и переменной части, а направление ветра d передается в виде трехмерного вектора направления. Для моделирования случайного фактора добавляется отклонение скорости ветра на основе нормального распределения. Плагин добавляет влияние ветра в модель двигателя, рассматривая ветер как часть расчета сопротивления ротора.



а) На 80 %



б) На 50 %



в) На 20 %

Fig. 1. Brightness decrease

Рис. 1. Уменьшение яркости

2.5. Моделирование плохой освещенности

Для симуляции плохой освещенности $f_2(p)$ и имитации темного времени суток осуществляется перевод каждого кадра из цветовой модели RGB (Red, Green, Blue) в модель HSV (Hue, Saturation, Value), манипуляция над каналом Value, определяющим яркость изображения и принимающим значения от 1 до 100, и обратный перевод кадра в модель RGB. Предельное экспериментальное значение уменьшения яркости p составило 80 %. Дальнейшее уменьшение яркости приводит к некорректной работе алгоритма распознавания маркера на близких дистанциях, ориентировочно менее 5 м. Примеры кадров после манипуляции приведены на рисунке 1.

Данные примеры позволяют делать выводы о достоверности симуляции плохой освещенности предложенным методом.

2.6. Моделирование осадков

Для моделирования осадков $f_3(r)$ использовался метод из [16], который заключается в комбинировании исходного кадра и синтетических осадков. Сперва генерируется изображение N , равномерно распределенных случайных чисел в диапазоне от 0 до 256 той же размерности, что исходный кадр. Оно будет представлять изображение осадков, добавляемое к кадру. Для регулирования интенсивности осадков используется зануление сгенерированных чисел, удовлетворяющих следующему условию $N(x) < 256 - r$, где $N(x)$ – сгенерированное значение для пикселя x , r – коэффициент регулировки уровня шума, $r \in (1, 256)$. Далее необходимо осуществить свертки каждого пикселя сгенерированного изображения для получения эффекта дождя. Сперва производится свертка со следующим ядром:

$$k = \begin{bmatrix} 0.0 & 0.1 & 0.0 \\ 0.1 & 8.0 & 0.1 \\ 0.0 & 0.1 & 0.0 \end{bmatrix}.$$

Затем генерируется новое ядро путем аффинного преобразования единичной матрицы E и сгенерированной матрицы вращения T , свойства которых определяются заданной длиной полосы и углом падения осадков. Наконец к ядру применяется размытие по Гауссу для задания ширины полос и производится повторная свертка.

Комбинирование исходного кадра с синтетическими осадками производится оператором линейного наложения (https://docs.opencv.org/3.4/d5/dc4/tutorial_adding_images.html):

$$g(x) = (1 - \alpha) f_0(x) + \alpha f_1(x),$$

где $g(x)$ – новый кадр, $f_0(x)$ – исходный кадр, $f_1(x)$ – синтетические осадки, α – коэффициент наложения.


 а) При $v = 90$

 б) При $v = 60$

 в) При $v = 30$
Fig. 2. Rain

Рис. 2. Дождь

 а) При $\theta = 0,8$

 б) При $\theta = 0,5$

 в) При $\theta = 0,2$
Fig. 3. Fog

Рис. 3. Туман

Примеры кадров с эффектом дождя приведены на рисунке 2.

Как видно из примеров, достигается правдоподобная симуляция осадков в кадре камеры.

2.7. Моделирование тумана

Имитация тумана $f_4(\theta)$ также осуществляется путем комбинирования исходного кадра и синтетического тумана. Генерация синтетического тумана формируется следующим образом:

1. Создается изображение, содержащие белые пиксели, той же размерности, что исходный кадр.
2. К белому изображению применяется размытие по Гауссу, размерность ядра для свертки изображения — (25, 25).
3. Сгенерированный туман комбинируется с исходным кадром с помощью оператора линейного наложения. Коэффициент наложения θ определяет плотность тумана.

Примеры кадров с синтетическим туманом приведены на рисунке 3.

Примеры показывают, что предложенный метод симуляции тумана справляется со своей задачей.

3. Эксперименты

3.1. Посадка с различной высоты без внешних факторов

В предшествующем исследовании было проведено тестирование посадки на различных высотах: 5 м, 10 м, 15 м, 20 м в количестве 40 попыток. Во всех экспериментах посадка производилась на платформу, движущуюся со скоростью 1 м/с по комплексной замкнутой траектории, состоящей из двух прямолинейных участков длиной 60 м, замкнутых с помощью двух дуг с радиусом кривизны 4 м. При каждой попытке проводилось измерение времени τ , необходимого на осуществление посадки, и точности позиционирования БПЛА ϵ , вычисляемой как расстояние между центром плат-

формы и центром масс БПЛА. В результате экспериментов высота 15 метров была максимальной, при которой достигалась 100 % успешность попыток, кроме того, дальнейшее увеличение высоты приводило к значительному увеличению затраченного на посадку времени ($c 48,51 \pm 4,526$ с до $121,01 \pm 14,188$ с). Поэтому в текущем исследовании рассмотрена посадка с высоты 15 м.

3.2. Влияние ветра на процесс посадки

Было рассмотрено влияние ветра $f_1 = (d, i)$ со значениями i в диапазоне от 6 до 15 м/с с шагом в 3 м/с с каждой стороны горизонта d при посадке с высоты в 15 метров как стабильной высоты для посадки. Для каждого эксперимента была получена скорость посадки и точность позиционирования. Результаты представлены в таблице 1 (прочерком обозначена проваленная попытка).

Исходя из результатов, наибольшее влияние во всех тестах оказывают западные и восточные ветра, как ветра, действующие перпендикулярно направлению движения БПЛА, что приводит к необходимости дополнительно использовать энергетические ресурсы и время для нахождения в центральной области 45×45 см, так как БПЛА и платформа значительную часть пути двигаются на юг. По этой же причине южный ветер также затрудняет и замедляет процесс посадки, как ветер, движущийся противоположно направлению БПЛА. Практически во всех опытах время посадки превысило максимальное значение, полученное из предыдущих опытов. Среднее значение времени посадки с ветром превышает значение без ветра на 33,13 с (увеличилось на 68 %). Также снизилась точность. Среднее значение точности посадки с ветром превышает значение без ветра на 0,06 м (увеличилось на 23 %).

Table 1. The influence of wind disturbances on landing time and accuracy

Таблица 1. Влияние ветровых возмущений на время и точность посадки

i (м/с)	d	τ (с)	ε (м)
6	Северный	44,34	0,06
	Южный	65,95	0,25
	Западный	54,10	0,31
	Восточный	71,36	0,11
	Северо-западный	63,05	0,35
	Юго-восточный	80,08	0,37
9	Северный	46,32	0,31
	Южный	56,90	0,40
	Западный	61,70	0,32
	Восточный	79,74	0,37
	Северо-западный	55,65	0,23
	Юго-восточный	63,34	0,33
12	Северный	49,40	0,35
	Южный	71,79	0,17
	Западный	64,34	0,39
	Восточный	84,70	0,42
	Северо-западный	76,22	0,26
	Юго-восточный	141,24	0,15
15	Северный	—	—
	Южный	69,49	0,21
	Западный	—	—
	Восточный	127,80	0,63
	Северо-западный	—	—
	Юго-восточный	286,98	0,49

3.3. Влияние плохой освещенности на процесс посадки

Были проведены эксперименты по посадке с высоты 15 м с моделированием плохой освещенности $f_2(p)$ при значениях p 20 %, 50 % и 80 %. Дальнейшее уменьшение яркости приводит к неработоспособности алгоритма распознавания маркера на близких дистанциях, ориентировочно менее 5 м. Для каждого значения процента уменьшения яркости было проведено по 10 попыток посадки, все попытки оказались удачными. Для каждого эксперимента подсчитывалось время для посадки и точность позиционирования.

В таблице 2 представлены средние значения точности позиционирования ε и времени посадки τ для каждого значения процента уменьшения освещенности.

Table 2. The effect of poor lighting on landing time and accuracy

Таблица 2. Влияние плохой освещенности на время и точность посадки

p (%)	τ (с)	ε (м)
20	45,11 ± 4,250	0,18 ± 0,078
50	41,05 ± 1,771	0,20 ± 0,077
80	44,39 ± 4,620	0,27 ± 0,076

Таким образом, понижение уровня освещенности оказывает слабое влияние на распознавание и процесс посадки, однако очень слабая освещенность, например в ночное время суток, приводит к тому, что маркер перестает распознаваться на малых расстояниях (ориентировочно пять метров и ниже), но при этом сохраняется способность распознавания на большой высоте, в результате чего снижается точность посадки.

3.4. Влияние дождя на процесс посадки

Были проведены эксперименты по посадке с высоты 15 м с моделированием дождя $f_3(r)$ при значениях r 30, 60 и 90. Угол падения осадков в моделировании варьировался в диапазоне $(-30, 30)$. Для каждого значения r было проведено по 10 измерений точности позиционирования и времени посадки, все попытки оказались удачными. В таблице 3 представлены средние значения точности позиционирования ε и времени посадки τ для каждого значения интенсивности осадков.

Table 3. The influence of precipitation on landing time and accuracy

Таблица 3. Влияние осадков на время и точность посадки

r	τ (с)	ε (м)
30	46,89 ± 6,554	0,20 ± 0,080
60	52,46 ± 3,336	0,22 ± 0,093
90	60,76 ± 7,934	0,21 ± 0,049

При влиянии дождя наблюдается увеличение времени, затраченного на посадку при увеличении степени интенсивности осадков, однако дождь не влияет на точность окончательного позиционирования БПЛА относительно маркера.

3.5. Влияние тумана на процесс посадки

Были проведены эксперименты по посадке с высоты 15 м с моделированием тумана $f_4(\theta)$ при значениях θ 0,2, 0,5 и 0,8. Для каждого значения интенсивности тумана было проведено по 10 измерений точности позиционирования и времени посадки, все попытки оказались удачными. В таблице 4 представлены средние значения точности позиционирования ε и времени посадки τ для каждого значения интенсивности тумана.

Исходя из сравнения средних значений времени и точности посадки, влияние тумана на процесс распознавания маркера и посадки на платформу незначительно.

Table 4. Effect of fog on landing time and accuracy

θ	τ (с)	ε (м)
0,2	46,01 ± 3,274	0,21 ± 0,080
0,5	46,06 ± 4,311	0,22 ± 0,086
0,8	48,56 ± 3,787	0,21 ± 0,082

Таблица 4. Влияние тумана на время и точность посадки

3.6. Исследование комплексного влияния погодных условий на процесс посадки

Для исследования комплексного влияния нескольких внешних факторов, было проведено моделирование посадки БПЛА с высоты 15 м со следующими дополнительными внешними факторами:

- уменьшение освещенности на 80 % + комплексный ветер 12 м/с;
- осадки с интенсивностью $v = 1$ + комплексный ветер 12 м/с;
- уменьшение освещенности на 50 % + туман с интенсивностью $a = 0,5$;
- уменьшение освещенности на 50 % + осадки с интенсивностью $v = 1$;
- уменьшение освещенности на 50 % + осадки с интенсивностью $v = 1$ + комплексный ветер 9 м/с.

Значение интенсивности осадков при исследовании комплексного влияния погодных условий было сведено к минимальному значению ($v = 1$), так как предварительное моделирование показало, что прочие значения интенсивности осадков с совокупности с другими явлениями приводило к невозможности совершения посадки. Значение интенсивности $v = 1$ характеризует очень слабые осадки, морозящий дождь.

В каждом случае было произведено по 10 измерений точности и времени посадки, все попытки оказались удачными. В таблице 5 представлены средние значения точности позиционирования ε и времени посадки θ для каждого случая.

Table 5. The influence of complex conditions on landing time and accuracy

Внешние факторы F	τ (с)	ε (м)
Уменьшение освещенности на 80 % + комплексный ветер 12 м/с	105,50 ± 18,933	0,29 ± 0,087
Осадки с интенсивностью $v = 1$ + комплексный ветер 12 м/с	188,72 ± 34,100	0,24 ± 0,080
Уменьшение освещенности на 50 % + туман с интенсивностью $a = 0,5$	44,32 ± 4,467	0,20 ± 0,086
Уменьшение освещенности на 50 % + осадки с интенсивностью $v = 1$	56,61 ± 3,529	0,25 ± 0,077
Уменьшение освещенности на 50 % + осадки с интенсивностью $v = 1$ + комплексный ветер 9 м/с	112,88 ± 7,976	0,24 ± 0,082

Таблица 5. Влияние комплексных условий на время и точность посадки

Данные результаты показывают, что наибольшее влияние на процесс посадки как с точки зрения времени, так и с точки зрения точности позиционирования, оказывает введение ветра, поскольку ветровые возмущения напрямую влияют на управление БПЛА, а не на распознавание маркера как другие внешние факторы. Наихудшие результаты демонстрируются при комбинации осадков, которые сами по себе также продемонстрировали влияние на процесс посадки, и ветра.

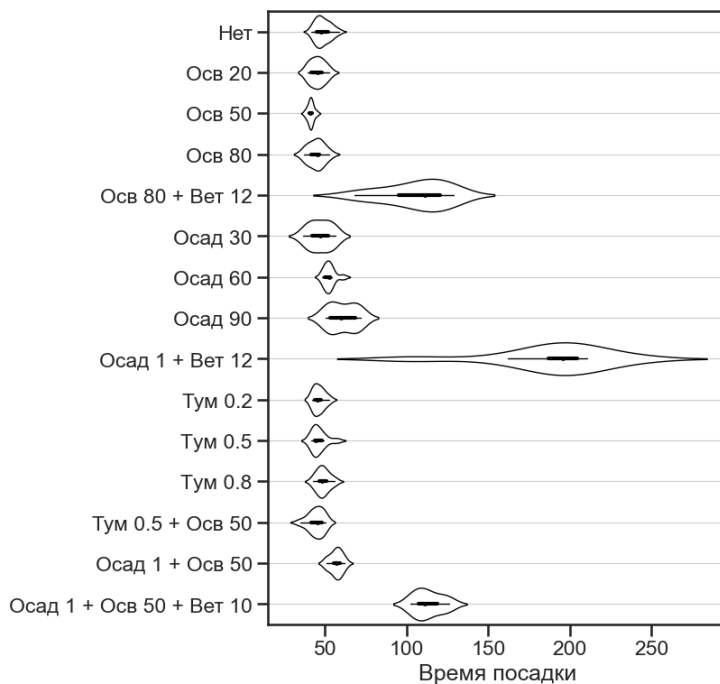


Fig. 4. Violin plots of landing time data in experiments with various external factors

Рис. 4. Скрипичные графики данных времени посадки в экспериментах с различными внешними факторами

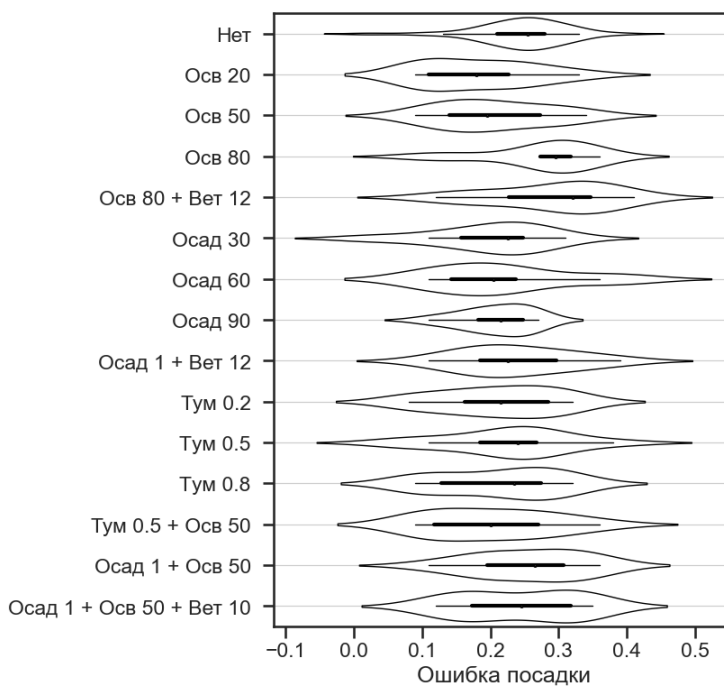


Fig. 5. Violin plots of fit accuracy data in experiments with various external factors

Рис. 5. Скрипичные графики данных точности посадки в экспериментах с различными внешними факторами

	Нет	Осв 20	Осв 50	Осв 80	Осв 80 + Вет 12	Осад 30	Осад 60	Осад 90	Осад 1 + Вет 12	Тум 0.2	Тум 0.5	Тум 0.8	Тум 0.5 + Осв 50	Осад 1 + Осв 50	Осад 1 + Осв 50 + Вет 10
Нет	-	0.06	8.09E-06	0.032	1.31E-06	0.489	0.013	8.97E-05	1.31E-06	0.121	0.083	0.846	0.032	8.11E-05	1.31E-06
Осв 20		-	0.045	0.762	1.83E-04	0.597	0.002	4.40E-04	1.83E-04	0.678	0.791	0.121	0.94	3.30E-04	1.83E-04
Осв 50			-	0.089	1.83E-04	0.045	1.83E-04	1.83E-04	1.83E-04	0.002	0.002	3.30E-04	0.049	1.83E-04	1.83E-04
Осв 80				-	1.83E-04	0.385	0.001	4.40E-04	1.83E-04	0.364	0.734	0.064	1.0	3.30E-04	1.83E-04
Осв 80 + Вет 12					-	1.83E-04	1.83E-04	4.40E-04	0.001	1.83E-04	1.82E-04	1.83E-04	1.83E-04	1.83E-04	0.623
Осад 30						-	0.076	0.004	1.83E-04	0.91	0.91	0.521	0.427	0.005	1.83E-04
Осад 60							-	0.021	1.83E-04	0.001	0.004	0.031	0.001	0.021	1.83E-04
Осад 90								-	1.83E-04	4.40E-04	0.001	0.002	1.83E-04	0.326	1.83E-04
Осад 1 + Вет 12									-	1.83E-04	1.82E-04	1.83E-04	1.83E-04	1.83E-04	0.002
Тум 0.2										-	0.734	0.14	0.521	3.30E-04	1.83E-04
Тум 0.5											-	0.14	0.734	0.001	1.82E-04
Тум 0.8												-	0.064	0.001	1.83E-04
Тум 0.5 + Осв 50													-	1.83E-04	1.83E-04
Осад 1 + Осв 50														-	1.83E-04
Осад 1 + Осв 50 + Вет 10															-

Fig. 6. Results of pairwise Mann-Whitney test for landing time samples

Рис. 6. Результаты попарного теста по критерию Манна—Уитни для выборок времени посадки

4. Анализ полученных результатов

Для резюмирования результатов экспериментов и оценки влияния различных внешних условий проведем графический и статистический анализ полученных экспериментальных данных при посадке с высоты 15 м без внешних факторов и с включением всех различных внешних факторов. На рисунках 4, 5 представлены скрипичные графики времени посадки и точности позиционирования при посадке во всех проведенных экспериментах.

На графиках наблюдается значительное влияние ветра и осадков на время посадки, чего нельзя сказать о точности посадки. Также исходя из графического анализа можно предположить, что не все данные следуют нормальному распределению.

Для дальнейшего анализа результатов принято решение обратиться к статистическим методам для выяснения наличия статистически значимой разницы в полученных результатах. Для начала, была проведена первоначальная оценка данных по критерию Шапиро—Уилка [17]. Она показала, что данные не следуют нормальному распределению. Это означает, что применение традиционных статистических методов, таких как критерий Стьюдента, становится неприемлемым. Вместо этого, был использован критерий Манна—Уитни [18], который позволяет проводить статистический анализ без предположений о распределении данных и не чувствителен к размеру выборки. За нулевую гипотезу было взято отсутствие значимых различий между выборками, данная гипотеза отвергалась при p -значении проведенного теста меньше либо равного 0,05. Тест производился попарно между двумя выборками каждый с каждым. Результаты теста приведены на рисунках 6, 7.

Исходя из полученных результатов, можно заключить следующее:

1. На текущем этапе визуальная оценка и полученные результаты моделирования позволяют делать выводы об адекватности используемых моделей погодных условий. БПЛА ожидаемо реагирует на моделируемые внешние факторы, что описано в таблицах 1–5 и наблюдается на рисунках 4, 5. Оценка соответствия моделей работы БПЛА при осадках и тумане в реальной

	Нет	Осв 20	Осв 50	Осв 80	Осв 80 + Вет 12	Осад 30	Осад 60	Осад 90	Осад 1 + Вет 12	Тум 0.2	Тум 0.5	Тум 0.8	Тум 0.5 + Осв 50	Осад 1 + Осв 50	Осад 1 + Осв 50 + Вет 10
Нет	-	0.03	0.129	0.084	0.068	0.074	0.126	0.052	0.551	0.291	0.481	0.362	0.142	0.78	1.0
Осв 20		-	0.544	0.028	0.017	0.495	0.425	0.363	0.198	0.57	0.225	0.544	0.622	0.082	0.14
Осв 50			-	0.103	0.058	0.91	0.85	0.82	0.427	0.97	0.65	0.94	0.909	0.161	0.405
Осв 80				-	0.427	0.028	0.198	0.019	0.325	0.081	0.089	0.075	0.082	0.677	0.623
Осв 80 + Вет 12					-	0.037	0.15	0.034	0.173	0.049	0.112	0.041	0.058	0.363	0.198
Осад 30						-	0.94	0.88	0.449	0.82	0.448	0.677	0.94	0.212	0.344
Осад 60							-	0.791	0.57	1.0	0.57	1.0	0.82	0.383	0.623
Осад 90								-	0.495	0.82	0.519	0.733	0.85	0.185	0.406
Осад 1 + Вет 12									-	0.596	0.91	0.622	0.384	0.705	0.91
Тум 0.2										-	0.85	0.94	0.85	0.226	0.405
Тум 0.5											-	0.97	0.649	0.449	0.623
Тум 0.8												-	0.879	0.272	0.344
Тум 0.5 + Осв 50													-	0.197	0.325
Осад 1 + Осв 50														-	0.733
Осад 1 + Осв 50 + Вет 10															-

Fig. 7. Results of pairwise Mann-Whitney test for landing time samples

Рис. 7. Результаты попарного теста по критерию Манна—Уитни для выборок времени посадки

среде являются частью дальнейших исследований, где будет проведено сравнение моделирование и реальных экспериментов.

2. При сравнении выборки без внешних условий с каждой другой выборкой, наблюдается статистически значимое влияние на время посадки таких внешних факторов, как освещенность (при снижении интенсивности от 50), осадки (при интенсивности от 60) и ветер. В результате введения ветра ухудшается способность распознавания маркера в темное время суток в результате чего БпЛА требуется больше времени для сближения с платформой.
3. Туман не оказывает значимого влияния на время посадки сам по себе, однако в комплексе со снижением освещенности, начинает влиять на время посадки.
4. Введение осадков приводит к статистически значимым изменениям времени посадки по сравнению со всеми прочими экспериментами, что также указывает на высокую степень влияния данного внешнего фактора. С ростом интенсивности осадков уменьшается производительность детектирования маркера как на больших расстояниях, так и на малых, с уменьшением расстояния способность распознавать маркер ослабевает, более того чем интенсивнее осадки, тем сложнее сблизиться с платформой из-за периодических проблем с распознаванием.
5. Любые ветровые возмущения в совокупности с дестабилизацией распознавания препятствуют совершению посадки. Поэтому маневр возможен только при очень слабых осадках. Таким образом возможность посадки на маркер при дожде с ветром ставится под сомнение. Что является критической ситуацией для БпЛА и должно учитываться при его функционировании. Введение ветра в комбинацию с любым внешним фактором приводит к значительному увеличению времени посадки.
6. Исходя из данных на рисунке 7, можно сделать вывод, что рассмотренные внешние условия не оказывают значительного влияния на пространственную точность позиционирования БпЛА при посадке, кроме комбинации внешних факторов освещенности и ветра, где продемонстрированы статистически значимые различия с множеством других выборок.

Заключение

Целью данной работы было исследование влияния внешних условий на процесс автоматизированной посадки БПЛА-квадрокоптера на подвижную платформу с использованием компьютерного зрения. Для этого были проведены эксперименты с различными комбинациями внешних факторов, таких как освещенность, туман, осадки и ветер. Были измерены время посадки и пространственная точность позиционирования по завершению посадки. Был проведен статистический анализ полученных данных с использованием критерия Манна–Уитни. Основные результаты исследования можно сформулировать следующим образом:

1. Внешние условия сильно влияют на время посадки БПЛА, но не на точность посадки.
2. Освещенность, осадки и ветер – самые важные факторы, которые нужно учитывать при посадке.
3. Туман усиливает эффект от других внешних условий, а дождь и ветер вместе могут сделать посадку невозможной.

Таким образом, данное исследование показало, что внешние условия являются важным фактором, который нужно учитывать при разработке системы автоматической посадки БПЛА на подвижную платформу. Для повышения эффективности и безопасности такой системы необходимо разработать алгоритмы, которые будут адаптироваться к различным условиям и корректировать параметры посадки в зависимости от них. Также необходимо провести дополнительные эксперименты с другими типами маркеров, которые могут быть более устойчивы к внешним факторам. Кроме того, необходимо исследовать возможность использования других источников информации для определения места посадки, например, инерциальных датчиков или радиосигналов.

References

- [1] A. Motienko, I. Vatamaniuk, and A. Saveliev, “Development of technical appearance of human-machine interface for group control of unmanned robots when performing agricultural tasks”, *Robotics and Technical Cybernetics*, vol. 16, no. 4, pp. 299–311, 2021.
- [2] A. Ronzhin and A. Saveliev, “Artificial intelligence systems for solving problems of agro-industrial complex digitalization and robotization”, *Agricultural Machinery and Technologies*, vol. 16, no. 2, pp. 22–29, 2022.
- [3] A. Saveliev, V. Lebedeva, I. Lebedev, and M. Uzdiaev, “An approach to the automatic construction of a road accident scheme using UAV and deep learning methods”, *Sensors*, vol. 22, no. 12, p. 4728, 2022.
- [4] A. Nosov *et al.*, “Case study of transporting blood components using an unmanned aerial vehicle”, *Disaster Medicine*, vol. 3, pp. 65–69, 2022.
- [5] A. Saveliev, E. Aksamentov, and E. Karasev, “Automated terrain mapping based on mask R-CNN neural network”, *International Journal of Intelligent Unmanned Systems*, vol. 10, no. 2/3, pp. 267–277, 2022.
- [6] V. Lebedeva, K. Kamynin, I. Lebedev, L. Kuznetsov, and A. Saveliev, “Method for distributed mapping of terrain by a heterogeneous group of robots based on google cartographer”, in *Proceedings of the Computational Methods in Systems and Software*, vol. 596, 2022, pp. 584–597.
- [7] A. Saveliev and I. Lebedev, “Method of autonomous survey of power lines using a multi-rotor UAV”, in *Frontiers in Robotics and Electromechanics*, Springer, 2023, pp. 359–376.
- [8] Y. Vasunina, D. Anikin, and A. Saveliev, “Algorithm of UAV trajectory creation for data collecting from seismological sensors”, in *International Russian Automation Conference (RusAutoCon)*, 2023, pp. 747–752.

- [9] D. Anikin, A. Ryabinov, A. Saveliev, and A. Semenov, "Autonomous landing algorithm for UAV on a mobile robotic platform with a fractal marker", in *Interactive Collaborative Robotics (ICR)*, 2023, pp. 357–368.
- [10] J. Morales, I. Castelo, R. Serra, P. U. Lima, and M. Basiri, "Vision-based autonomous following of a moving platform and landing for an unmanned aerial vehicle", in *Sensors*, vol. 23, 2023, p. 829.
- [11] P. Wang, C. Wang, J. Wang, and M. Meng, "Quadrotor autonomous landing on moving platform", in *Procedia Computer Science*, vol. 209, 2022, pp. 40–49.
- [12] A. Paris, B. Lopez, and J. How, "Dynamic landing of an autonomous quadrotor on a moving platform in turbulent wind conditions", in *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2020, pp. 9577–9583.
- [13] Y. Feng, C. Zhang, S. Baek, S. Rawashdeh, and A. Mohammadi, "Autonomous landing of a UAV on a moving platform using model predictive control", in *Drones*, vol. 2, 2018, p. 34.
- [14] J. Wubben *et al.*, "A vision-based system for autonomous vertical landing of unmanned aerial vehicles", in *23rd International Symposium on Distributed Simulation and Real Time Applications (DS-RT)*, 2019, pp. 1–7.
- [15] Z. Zhao *et al.*, "Vision-based autonomous landing control of a multi-rotor aerial vehicle on a moving platform with experimental validations", in *IFAC-PapersOnLine*, vol. 55, 2022, pp. 1–6.
- [16] T. Matsui and M. Ikehara, "Gan-based rain noise removal from single-image considering rain composite models", in *28th European Signal Processing Conference (EUSIPCO)*, 2021, pp. 665–669.
- [17] S. Shapiro and M. Wilk, "An analysis of variance test for normality", in *Biometrika*, vol. 52, 1965, pp. 591–611.
- [18] H. Mann and D. Whitney, "On a test of whether one of two random variables is stochastically larger than the other", in *The annals of mathematical statistics.*, vol. 18, 1947, pp. 50–60.