

УДК 004.021:004.75

АВТОНОМНАЯ ПОСАДКА БПЛА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВИЗУАЛЬНОГО СЕРВОУПРАВЛЕНИЯ



В.Ф. Алексеев

Доцент кафедры проектирования информационно-компьютерных систем БГУИР, кандидат технических наук, доцент
alexvikt.minsk@gmail.com



Е.И. Бавбель

Аспирант кафедры проектирования информационно-компьютерных систем БГУИР
egorigorevichw9@gmail.com

В.Ф. Алексеев

Окончил Минский радиотехнический институт. Область научных интересов связана с разработкой методов и алгоритмов построения информационно-компьютерных систем, организацией учебного и научно-исследовательского процессов в техническом университете.

Е.И. Бавбель

Окончил Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники. Область научных интересов связана с исследованием методов и алгоритмов решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации.

Аннотация. Автономная посадка беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) играет важную роль в продвижении беспилотных систем к практическому применению. Однако традиционный метод управления посадкой на основе местоположения в значительной степени опирается на спутниковые системы навигации и позиционирования, которые нельзя применять в условиях слабых спутниковых сигналов, таких как помещения и долины. Для решения этих проблем в данной статье предлагается метод визуального сервоуправления автономной посадкой БПЛА на основе программного обеспечения Aerostack. Этот метод принимает изображение бортовой камеры в реальном времени в качестве входных данных и извлекает особенности меток на земле. Кроме того, создается закон визуального сервопривода автономной посадки для получения сигналов управления скоростью, которые могут точно направить дрон на посадку. По результатам экспериментов проводимыми за последние годы, показывают, что предложенный алгоритм может обеспечить надежную и точную автономную посадку без сигналов спутниковой навигации.

Ключевые слова: Автономная посадка, сервопривод, БПЛА.

Введение. В последние годы беспилотные летательные аппараты получили широкое распространение как в военной, так и в гражданской сферах из-за их потенциальной ценности в практическом применении. Автономная посадка БПЛА является одним из жизненно важных методов продвижения развития БПЛА. Многие приложения, такие как спасение при стихийных бедствиях, транспортировка грузов, требуют точной автономной посадки БПЛА для выполнения миссий [1]. Традиционный метод управления посадкой на основе местоположения в значительной степени опирается на спутниковые системы навигации и позиционирования. Однако существующие системы спутниковой навигации и позиционирования, такие как *GPS* и *BeiDou*, недостаточно точны в гражданской сфере, и навигационный сигнал легко теряется при наличии

препятствий над БПЛА, не говоря уже о закрытых помещениях и долинах. В связи с этим для решения этой проблемы очень эффективен метод визуального сервоуправления [2], который генерирует управляющий сигнал на основе визуальной обратной связи. Кроме того, поскольку датчики, используемые при визуальном сервоконтроле, в основном являются визуальными, измерение окружающей среды является бесконтактным. В то же время по сравнению с традиционным методом навигационного управления можно получить больший объем информации об окружающей среде и эффективно повысить точность управления. Исследования показали, что целым рядом авторов предлагается различные подходы к решению проблемы автономной посадки БПЛА. Тем не менее, эти подходы не учитывают масштабируемость интеграции других задач, таких как отслеживание маршрута и отслеживание целей. Для обеспечения высокого уровня автономности желательна масштабируемость поддержки нескольких миссий.

Авторами рассматриваются программное обеспечение *Aerostack* – архитектурная основа беспилотной авиационной системы. Эта архитектура основана на концепции модульности, позволяющей легко расширять другие миссии и другие виды платформ. Таким образом, на основе структуры *Aerostack* в данной статье предлагается подход к визуальному сервоуправлению автономной посадкой БПЛА. Такой подход не только обеспечивает полностью автономную и точную посадку, но также использует масштабируемость *Aerostack*. По результатам моделирования в данной среде можно сказать, что подход позволяет обеспечить надежную и точную автономную посадку.

Анализ принципов работы сервоуправления БПЛА. Полетная миссия дрона обычно включает в себя три этапа: взлет, выполнение конкретной задачи и последующая посадка. Общий процесс визуального сервоуправления автономной посадкой БПЛА показан на рисунке 1. Чтобы проверить эффективность автономной посадки авторами показан пример управления дроном таким образом, чтобы он направлялся к целевой области перед приземлением, и гарантировал, что координаты положения дрона будут подчиняться равномерному случайному распределению по площади.

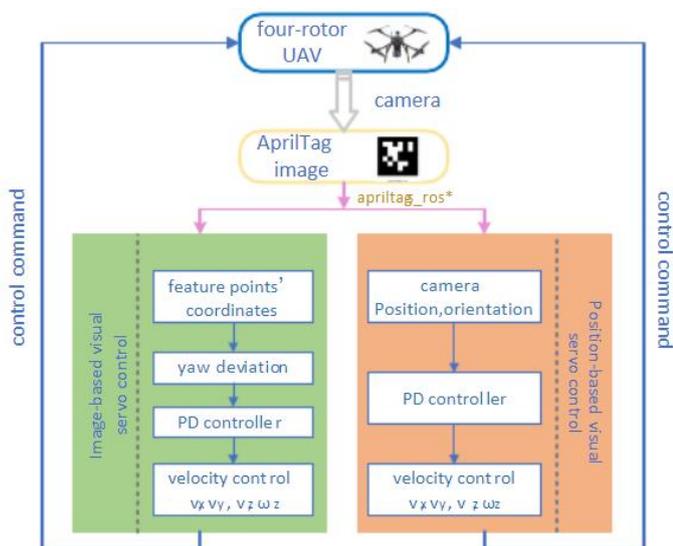


Рисунок 1. Процесс визуального сервоуправления

На протяжении всего проекта направленная вниз камера является основным источником данных для автономной посадки. Существует два способа реализации визуального сервопривода: визуальный сервопривод на основе положения (PBVS) и визуальный сервопривод на основе изображения (IBVS). Следует отметить, что алгоритмы управления в этих двух режимах не ограничены. Идеальная цель успешного приземления состоит в том, чтобы опорная планка касалась земли, а направленная вниз камера была направлена на метку на земле. Если камера

установлена непосредственно под дроном, опорная планка заблокирует дрон и закроет поле зрения камеры. В этом случае метка не будет распознана, поэтому рекомендуется установить камеру под правой рукой дрона. Когда дрон успешно приземляется, он не находится непосредственно над меткой, что мало влияет на оценку алгоритма миссии и управления.

Основываясь на платформе *Aerostack*, возможно расширить функциональность модуля визуального сервоуправления и реализации моделирования в *Gazebo* [3]. На рисунке 2 представлен проект архитектуры реализации автономной посадки БПЛА на основе визуального сервоуправления. В процессе автономной посадки камера, направленная вниз, захватывает изображение, а средство извлечения признаков извлекает особенности метки на земле. Контроллер движений генерирует сигналы управления скоростью для движения дрона на основе информации о функциях, тем самым управляя дроном так, чтобы он точно приземлился в заданное наземное положение.

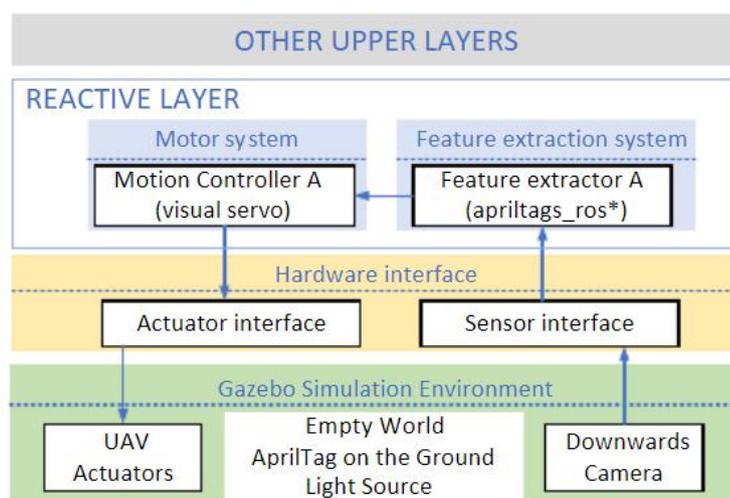


Рисунок 2. Проектирование архитектуры в *Aerostack*

Модуль визуального сервоуправления принадлежит к *Reactive Layer* структуры *Aerostack*. Экстрактор функций получен на основе пакета с открытым исходным кодом. Чтобы получить управляющие переменные, необходимые для визуального сервоуправления на основе изображения, необходимо добавить функцию публикации пиксельных координат центральной точки и четырех угловых точек тега (в данной статье пакет называется *apriltags_ros**). Стоит отметить, что в модулях расширенных функций используется метод связи узла *ROS* – *Topic*. Контроллер в системе может использовать различные функции, предоставляемые экстрактором функций, для генерации сигналов управления движением дрона с использованием другого алгоритма управления.

Создание среды моделирования. В *Gazebo* модели (рисунок 3), которые необходимо создать, – это в основном пустой мир (*AprilTag* на земле, источники света, БПЛА и камера, направленная вниз). Источники света, используемые в данной статье, являются точечными и располагаются непосредственно над меткой.

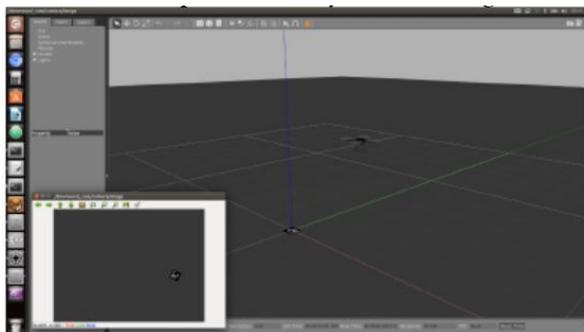


Рисунок 3. Эксперимент в Gazebo

Основное содержание симуляционного эксперимента заключается в загрузке проекта миссии верхнего уровня, написанного на языке *Python*, симуляции в среде *Gazebo* и получении экспериментальных данных. При автономной посадке БПЛА с использованием визуального сервоуправления, основанной на процессе автономной посадки *Aerostack*, вертикальная скорость БПЛА устанавливается равной 0,2 м/с, поэтому время, необходимое для фазы приземления, составляет примерно 20 секунд. Параметры *PD*-контроллера показаны на рисунке 4. Их можно настроить в соответствии с реальной ситуацией.

Table 1: PD Controller Parameters

PBVS	K_p	K_d	IBVS	K_p	K_d
x	0.9	0.005	u	0.001	0.00001
y	0.9	0.001	v	0.001	0.00001
yaw	0.3	0.001	yaw	0.01	0.0001

Рисунок 4. Параметры *PD*-контроллера

Визуальное управление сервоприводами на основе позиции. Приведены и проанализированы десять экспериментов по моделированию с использованием *PBVS* в различных условиях освещенности, отклонение положения приземления показано на рисунке 5 [4].

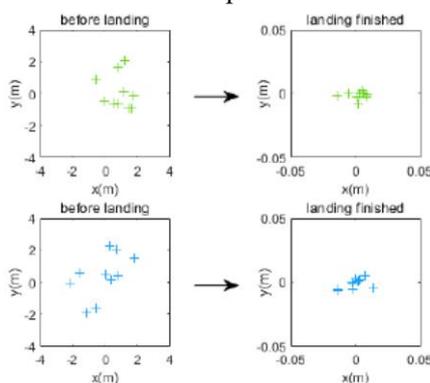


Рисунок 5. Отклонение позиции приземления (*PBVS*). Символы зеленого креста обозначают результаты экспериментов при 1-кратной интенсивности света, а синие – при 4-кратной интенсивности света

По теореме Пифагора можно подсчитать, что при 1-кратной силе света среднее отклонение положения при завершении приземления составляет 0,0069 м, а дисперсия – $1,0924 \cdot 10^{-5}$ м². Менее чем в 4 раза среднее отклонение положения составляет 0,0070 м, а отклонение – $3,0768 \cdot 10^{-4}$.

Угол отклонения от курса в начале и конце приземления показан на рисунке 6. При 1-кратной интенсивности света среднее отклонение от курса при посадке составляет 0,0147 рад, а дисперсия составляет $3,1363 \cdot 10^{-4}$. Напротив, среднее приземление при 4-кратном отклонении света составляет 0,0111 рад, а дисперсия – $1,5730 \cdot 10^{-4}$.

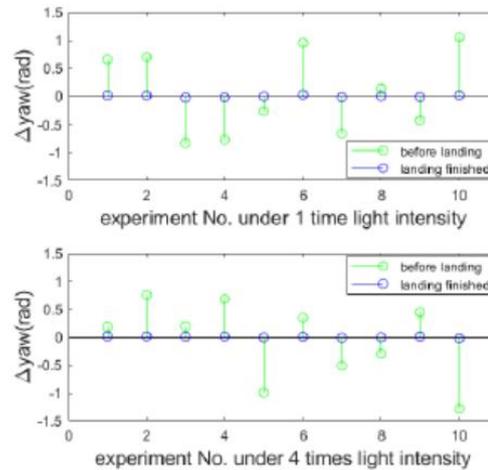


Рисунок 6. Отклонение от курса при посадке

Чтобы более интуитивно объяснить процесс приземления, отклонения положения и угла рыскания показаны на рисунке 7. Здесь показаны три приземления.

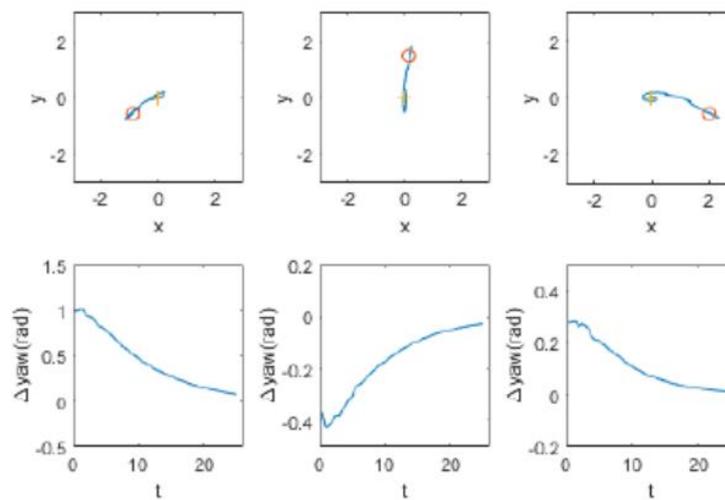


Рисунок 7. Отклонения положения и угла отклонения от курса в процессе приземления во временных рядах (PBVS). Круги относятся к начальным точкам, а символы «+» относятся к конечным точкам.

Визуальное управление сервоприводами на основе изображений. В тех же условиях моделирования, что и прежде приведем 10 экспериментов при различных условиях освещенности [4].

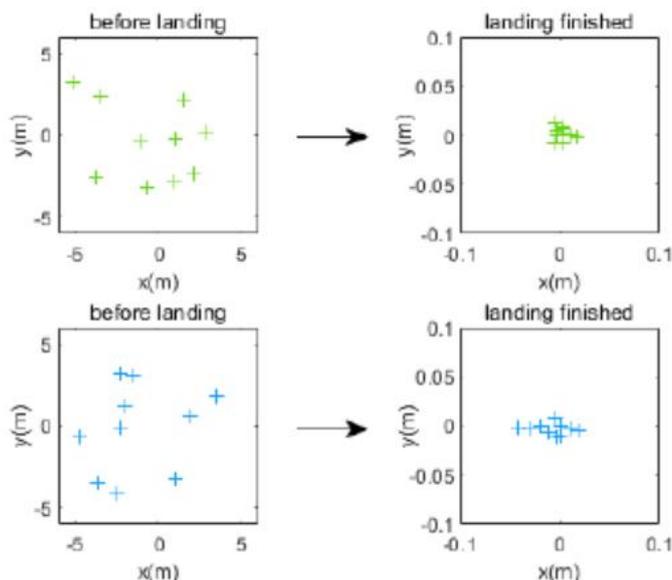


Рисунок 8. Отклонение посадочной позиции (IBVS). Зеленые крестики обозначают результаты экспериментов при 1-кратной интенсивности света, а синие – при 4-кратной интенсивности света

В соответствии с предыдущим данными мы можем получить отклонение положения, используя теорему Пифагора. Как показано на рисунке 8, при 1-кратной интенсивности света при приземлении отклонение положения составляет 0,0093 м, а отклонение составляет $2,2089 \cdot 10^{-5}$ м². При четырехкратной интенсивности освещения два результата составляют 0,0167 м и $1,4128 \cdot 10^{-4}$ м².

Отклонение угла рыскания в начале и конце приземления показано на рисунке 9. При 1-кратной интенсивности света среднее отклонение рыскания составляет 0,0044 рад, а дисперсия составляет $3,4383 \cdot 10^{-5}$. При четырехкратной интенсивности освещения среднее отклонение от курса составляет 0,0062 рад, а дисперсия – $4,3906 \cdot 10^{-5}$.

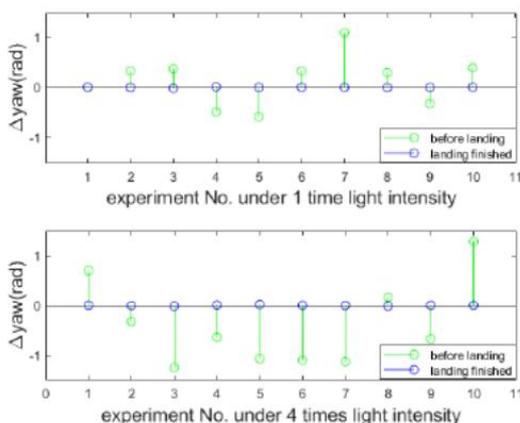


Рисунок 9. Отклонение от курса при посадке

Аналогичным образом, чтобы лучше описать процесс приземления, на рисунке 10 показаны изменения положения и угла отклонения от курса во время трех приземлений.

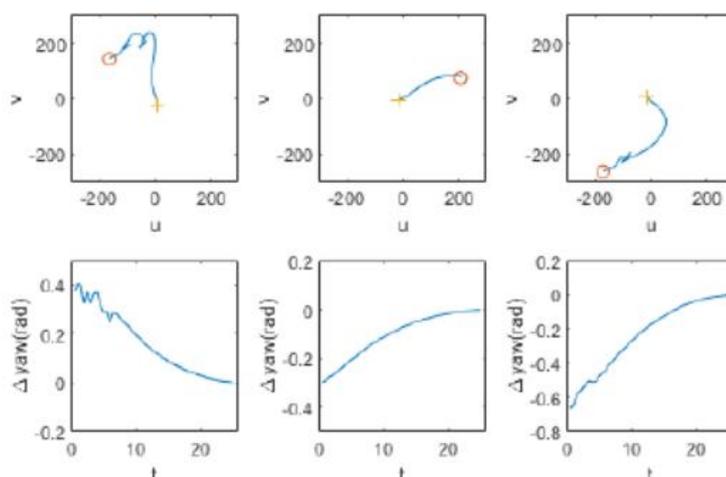


Рисунок 10. Отклонения положения и угла отклонения от курса в процессе приземления во временных рядах (IBVS). Кружки относятся к начальным точкам, а символы «+» относятся к конечным точкам

В симуляционном эксперименте алгоритмы визуального сервоуправления на основе положения и изображения показывают хорошую надежность и точность при автономной посадке дрона, что указывает на то, что автономная посадка достигается без спутниковой навигации и инерциальных навигационных датчиков. Но следует отметить, что в реальных приложениях все еще существует много проблем. В конце концов, среда моделирования не может полностью моделировать реальную среду. Например, в *Gazebo* невозможно смоделировать сложные световые и воздушные потоки, что может оказать большое влияние на устойчивость и надежность автономных площадок.

Заключение. Чтобы решить существующие проблемы неточного положения приземления и высокой зависимости от спутниковой навигации во время приземления БПЛА, в статье проведен анализ, и обработка данных полученные в ходе моделирования в программной среде и рассмотрен полностью автономный подход визуального сервоуправления приземлением БПЛА на основе платформы *Aerostack*. Основная работа на такой платформе включает в себя: проектирование миссии верхнего уровня, построение среды моделирования, расширение функций пакета *apriltags_ros*, добавление узла визуального сервоуправления на основе позиции и изображения в *Aerostack* и построение канала связи между *Aerostack* и *Gazebo*. Основываясь на этом, были проверена осуществимость общей конструкции. Предложенные алгоритмы визуального сервоуправления могут обеспечить надежную и точную цель приземления без спутниковой навигации.

Список литературы

- [1] Maza, I., Caballero, F., Capitán, J., Martínez-de-Dios, J. R., & Ollero, A. (2011). Experimental results in multi-UAV coordination for disaster management and civil security applications. *Journal of intelligent & robotic systems*, 61(1-4), pp. 563-585.
- [2] Chaumette, F., & Hutchinson, S. (2006). Visual servo control. I. Basic approaches. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 13(4), pp. 82-90.
- [3] Rodríguez-Ramos, A., Sampedro, C., Carrio, A., Bavle, H., Fernández, R. A., Milošević, Z., & Campoy, P. (2016, October). A monocular pose estimation strategy for uav autonomous navigation in gnss-denied environments. In *Proceedings of the International Micro Air Vehicle Conference and Flight Competition*, Beijing, China (pp. 17-22).
- [4] Guanzheng Wang, Zhihong Liu, and Xiangke Wang. 2019. UAV Autonomous Landing using Visual Servo Control based on Aerostack. In *Proceedings of the 3rd International Conference on Computer Science and*

Application Engineering (CSAE '19). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, Article 127, pp. 1–6.

Авторский вклад

Алексеев Виктор Федорович – руководство исследованием в области автономного полета, в частности визуального сервоуправления.

Бавбель Егор Игоревич – постановка задачи исследования метода визуального сервоуправления, анализ результатов моделирования на платформе *Aerostack* и последующей интеграции в *Gazebo*.

AUTONOMOUS UAV LANDING USING VISUAL SERVO CONTROL

V.F. Alexseev

E.I. Bavbel

*Associate Professor, Department
of Information Computer Systems
Design, PhD of Technical
sciences, Associate Professor*

*Postgraduate student, Department
of Information Computer Systems
Design BSUIR*

Abstract. Autonomous landing of unmanned aerial vehicles (UAVs) plays an important role in advancing unmanned systems to practical applications. However, the traditional location-based landing control method relies heavily on satellite navigation and positioning systems, which cannot be applied in environments with weak satellite signals, such as indoors and valleys. To solve these problems, this paper proposes a visual servo control method for autonomous UAV landing based on *Aerostack* software. This method takes the real-time airborne camera image as input and extracts the features of marks on the ground. In addition, a visual servo law of autonomous landing is created to obtain speed control signals that can accurately guide the drone to land. Based on the results of experiments conducted in recent years, they show that the proposed algorithm can provide reliable and accurate autonomous landing without satellite navigation signals.

Keywords: Autonomous landing, servo drive, UAV