

ВЗЛЕТ И ПОСАДКА МУЛЬТИКОПТЕРА В ДВИЖУЩИЙСЯ РОБОТИЗИРОВАННЫЙ КОНТЕЙНЕР С ПОМОЩЬЮ ВИЗУАЛЬНОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

Легович Ю.С., Русаков К.Д., Диане С.А.К.

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН

rusakov.msk@yandex.ru, legovichy@yandex.ru, diane@yandex.ru

Аннотация: Рассматривается проблема передвижения мультикоптера в длительных автономных миссиях. Проанализированы подходы к организации его взлета и посадки в роботизированный контейнер, совмещающий функции транспортировки и подзарядки аккумулятора. По результатам исследования разработаны структурные схемы мультикоптера и контейнера, функционирующих при отсутствии внешних навигационных систем.

Ключевые слова: беспилотные летательные аппараты, мультикоптеры, подвижной контейнер, пеленг, точная посадка

Введение

В настоящее время беспилотные летательные аппараты типа мультикоптера (МК) являются предметом исследования многих исследовательских центров, военных и гражданских компаний [1]. Благодаря их многофункциональности обеспечивается их применимость в широком спектре задач, например: поиск объектов, осмотр зданий [2], наблюдение, мониторинг и прогнозирования экологической обстановки [3] и т.д.

Однако, в настоящее время очевидны существенные ограничения применения мультикоптеров на больших пространствах – это относительно малая длительность автономной работы [4], а также малая дальность радиоканала передачи качественного видеоизображения. Для легких мультикоптеров, использующих Li-Po аккумуляторы, среднее время полета как правило не превышает 10-25 минут, что существенно ограничивает радиус их действия. Один из способов решения данной проблемы может заключаться в организации оптимального взаимодействия МК с мобильным контейнером (станцией), осуществляющим движение на большие расстояния с подзарядкой бортовых аккумуляторов

В настоящем исследовании рассмотрены основные задачи этой системы: 1. направление МК к контейнеру для зарядки или замены аккумуляторов; 2. навигация МК при движении до станции с применением средств визуального анализа изображений; 3. фиксация МК на станции; 4. подключение к БПЛА: снятие и размещение аккумуляторов; 5. транспортировка аккумуляторов; 6. подзарядка аккумуляторов.

1 Структурная схема мультикоптера

Для реализации вышеописанного функционала МК должен включать в свой состав ряд подсистем, обеспечивающих его автономное функционирование в режимах взлета, следования и посадки. На рис. 1 представлена структурная схема МК, применимого для решения данных задач.

. Для определения координат цели применяется бортовой радиоприемник с антенной, диаграмма направленности которой имеет острый максимум. Поворачивая антенну (или же весь корпус МК) в направлении достижения максимума сигнала на выходе усилителя антенны, определяют направление на источник радиосигнала. Этот процесс называют **пеленгованием**, а значения углов между направлениями на север и источник – пеленгом. Координаты источника радиоизлучения на местности рассчитываются по двум или более пеленгам из разных точек или по одному пеленгу и дальности от пеленгатора до источника. Таким образом, система **определения координат источников радиосигнала (пеленгатор) включает в свой состав узконаправленную антенну, усилитель радиосигнала, контроллер управления пеленгом антенны.**

2 Мобильный роботизированный контейнер для транспортировки мультикоптера

В целях обеспечения транспортировки мультикоптера на большие расстояния целесообразно использовать мобильный роботизированный контейнер (РК), который должен обеспечить выполнение следующих задач:

1. восстановление энергоснабжения МК; 2. стыковка МК и контейнера; 3. обмен информацией между контейнером и МК на этапах взлета и посадки.

Отметим, что в работе [8] разработаны два типа автоматических систем перезарядки МК на наземной платформе с зарядкой аккумулятора и с заменой на новый. Система подзарядки подключается как по контактной проводной схеме, так и по бесконтактной. В работе [8] предлагается три типа станций заряда аккумуляторов БЛА: Rollin' Mat, Concentric Circles, Honeycomb, они отличаются стоимостью, возможностями и функциями. Также в данной работе предложена система замены аккумулятора БЛА, однако замена разряженного аккумулятора требует согласованной конструкции его крепления на МК.

Обобщая опыт разработки существующих систем стыковки и перезарядки, можно предложить структурную схему мобильного роботизированного контейнера, представленную на рис. 1.

Зарядное устройство, обеспечивающее зарядку аккумулятора, подключается посредством специальной контактной системы являющейся частью многофункционального механизма соединения МК с роботизированным контейнером, осуществляющем функции транспортировки.

Вертолетная площадка имеет контрастную разметку геометрии поверхности контейнера, предназначенную для точной посадки. Форма посадочной площадки может быть плоская, тороидальная с механическими направляющими к центру площадки в зависимости от способа навигации при посадке: система технического зрения, система локальной навигации, система глобальной навигации.

Система фиксации позволяет быстро и надежно прикрепить раму мультикоптера к основанию посадочной площадки. Возможны механические или магнитные способы крепления.

Показания датчика высоты корректируется по показаниям датчика температуры окружающего воздуха в процессе посадки.



Рис. 1. Структурная схема мультикоптера (слева) и роботизированного контейнера (справа)

3 Управление полетом мультикоптера в режиме преследования цели

В работе [9] рассматривается методика определения курса, скорости и дистанции до цели (преследуемого морского объекта). В работе изложены принципы построения комплексного метода определения параметров цели при одном маневре курсом. В нашем случае преследователь – это мультикоптер, а преследуемый – это мобильный контейнер. Требуется определить скорость перемещения контейнера и расстояние до него. Необходимость выполнения маневра по корректировке расстояния и пеленга при принятых ограничениях на движение цели обуславливает следующие уравнения движения:

$$\frac{dD}{dt} = V \cos(P - C) \quad (1)$$

$$\frac{dP}{dt} = -\frac{V \sin(P - C)}{D(t)} \quad (2)$$

где:

P - пеленг МК на контейнер,

D- дистанция между контейнером и МК,

t- время,

V - относительная скорость контейнера,

C - относительный курс контейнера.

При этом дистанция от МК до контейнера вычисляется следующим образом:

$$D = \frac{2V \left(\frac{d\Delta \ln(D)}{dt} \cos(P-C) - \frac{d\Delta P}{dt} \sin(P-C) \right)}{\frac{d\Delta P^2}{dt} + \frac{d\Delta \ln(D)^2}{dt}} \quad (3)$$

4 Управление посадкой мультикоптера на основе технического зрения

Автономная посадка МК в настоящее время рассматривается не только на фиксированную площадку, но и на мобильную платформу (контейнер), осуществляющую движение в различных средах. Посадка МК реализуется с помощью различных систем локальной навигации и анализа окружающей территории. Автономная высокоточная посадка до сих пор остается одной из самых сложных задач для МК. Инерциальные навигационные системы (ИНС) и глобальные навигационные спутниковые системы (GPS) являются основой навигационной системы летательного аппарата. Однако, ИНС накапливает ошибки при интегрировании местоположения и скорости транспортного средства, а GPS перестает работать, когда спутники закрыты зданиями, листвою деревьев и даже при сильном тумане. По этой причине приземление на основе технического зрения получило широкое развитие. В работе [5] приведен подробный обзор задач автономной посадки. В работе [6] рассматривается система управления посадкой БПЛА на подвижную платформу. Предлагается алгоритм обнаружения и локализации подвижной посадочной площадки на основе технического зрения с использованием широкоугольной видеокамеры с высоким разрешением. Анализ видеопотока позволяет оценить положение и скорость подвижной платформы относительно БПЛА. Приводятся результаты летных испытаний.

В работе [7] анализируется алгоритм автономной посадки БЛА на палубу корабля. Эксперименты выполнялись с имитацией динамики различных кораблей и волнения моря с помощью подвижной посадочной площадки с шестью степенями свободы. Примененная система технического зрения использует фильтр Калмана в процессе определения положения БЛА относительно платформы, имеющей специальные графические метки.

В этой статье была использована известны несколько визуальных маркеров: «ArUco» метка, светодиодная метка, а также метка в виде детектированного объекта пеленгования [10, 11, 14, 15]. На примере ArUco метки. сначала исходное изображение (рис. 2) было преобразовано в изображение в градациях серого, а затем в двоичное изображение с использованием метода адаптивного порогового значения в целях достижения кратчайшего времени обработки. Следующим шагом было нахождение контуров изображения. Для этой цели был использован алгоритм Сузуки [12] в библиотеке OpenCV. Данный метод дает на выходе список четырехугольников, описывающих контур изображения. Затем контуры, которые содержали площадь менее одной пятой нашего изображения, а также контуры, содержащие более или менее четырех углов, удаляются, поскольку они, вероятно, не имеют действительных маркеров, и их нельзя обнаружить. После этого порог обнаруженной области рассчитывается заново посредством алгоритма Оцу [13].

Стандартная ArUco метка рассматривается как двоичная матрица $7 * 7$. Эта матрица создает 10-битный код, который позволяет обнаруживать 1024 различных маркера. После этого углы маркеров определяются с помощью функции `cornerSubpixel` библиотеки OpenCV. Однако стоит упомянуть, что использовать этот метод для всех контуров на первом этапе затруднительно из-за его огромной нагрузки на процесс. Средняя частота обработки изображений составляет примерно 24 кадра в секунду.

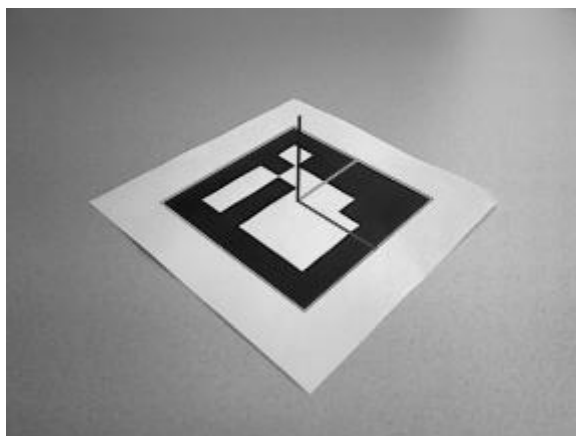


Рис. 2 Вид ArUco метки в градациях серого

Рассматривая, более подробно алгоритм посадки мультикоптера как на движущуюся платформу, так и на стационарную можно отметить следующее. Во-первых, мультикоптер находится далеко от места посадки, а ArUco метка находится в поле зрения фронтальной камеры. Положение мультикоптера будет рассчитываться без ArUco метки, и мультикоптер будет двигаться к ArUco метке. В качестве контроллера для выполнения этой задачи может являться алгоритм пеленга МК на контейнер.

Таким образом алгоритм управления посадкой на платформу предлагается следующий:

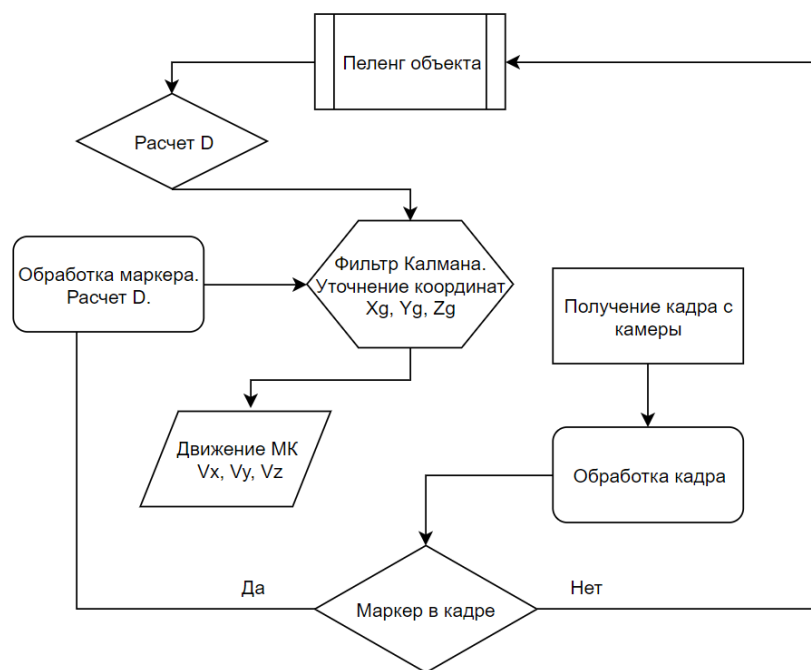


Рис. 2 Алгоритм управления посадкой на платформу

5 Экспериментальные исследования алгоритмов визуальной локализации цели

Проверка работоспособности и эффективности предложенных алгоритмов проводилась на разработанном аппаратно-программном обеспечении, реализующем рассмотренные методы локализации визуальных ориентиров как в задачах следования за целью, так и посадки в роботизированный контейнер.

Одна из задач прикладного применения алгоритмов визуальной локализации цели связана с определением размеров графической метки. Ее решение может быть основано на анализе геометрической схемы, представленной на рис. 3.

Соотношения между удаленностью целевого объекта от камеры и линейными размерами графической метки задаются следующей системой равенств:

$$\begin{cases} \frac{\beta}{\alpha} = \frac{n_x}{W}, \\ \beta = \frac{D}{L}, \end{cases} \quad (4)$$

где n_x – минимально допустимый для алгоритма распознавания размер метки в пикселях, α – угол раскрытия камеры по горизонтали в радианах, β – угловой размер визуальной метки в радианах, W – ширина изображения в пикселях, L – расстояние до цели, D – искомый линейный размер визуальной метки.

Отметим, что второе соотношение в (4) справедливо при $L \gg D$.

Выражая размер метки из приведенной системы равенств, получаем:

$$D = L \cdot \alpha \cdot \frac{n_x}{W} \quad (5)$$

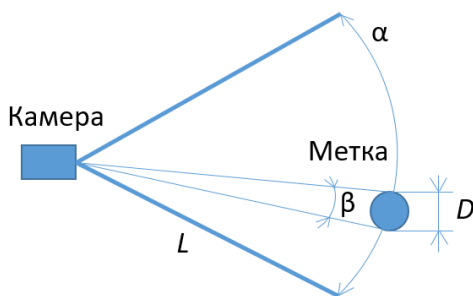


Рис. 3. Схема расположения визуальной метки в поле зрения камеры (вид сверху)

Рассмотрим постановку задачи определения размера метки для задачи следования МК на расстоянии 2 м от роботизированного контейнера, закрепленного на транспортном средстве: $D = 2$ м, $\alpha = 90^\circ$, $n_x = 30$, $W = 1280$. Из формулы (5) получим: $D = 0,074$ м. Таким образом, для эффективного распознавания метка должна иметь размеры 8×8 см.

Для отработки алгоритмов слежения за целью был разработан экспериментальный образец системы, состоящей из двух роботизированных мобильных платформ (рис. 3). Одна из платформ выступает в роли ведущего агента, другая – в роли ведомого (рис. 4 Структура аппаратного обеспечения мобильной платформы приведена на рис. 5.



Рис. 4. Фрагмент натурного моделирования задачи визуального слежения

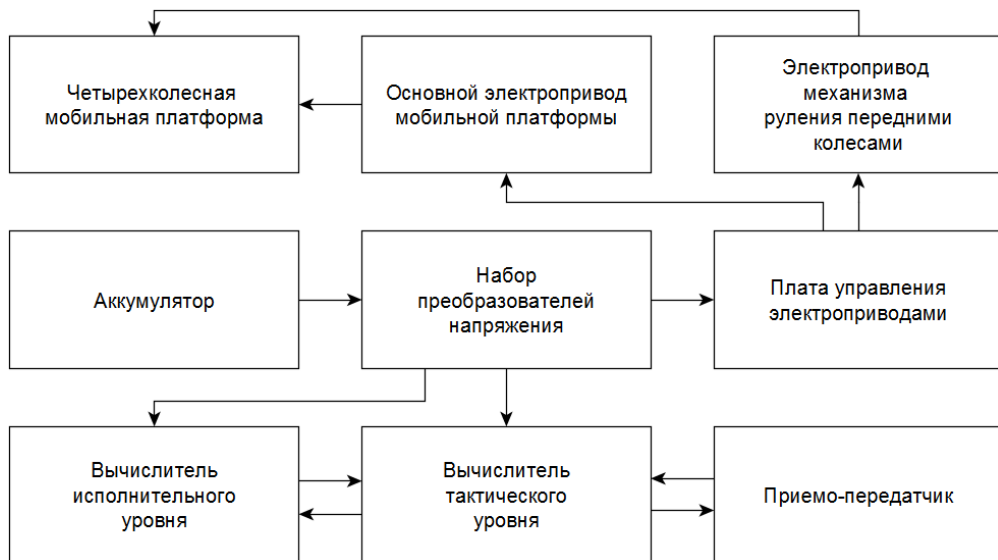


Рис. 5. Структура аппаратного обеспечения роботизированной мобильной платформы

На ведущем роботе закрепляются средства визуального опознавания. Алгоритм не требует использования специальных графических меток а основывается на применении алгоритмов трекинга, описанных выше. Преимущества данного подхода заключаются в увеличении дальности эффективного детектирования цели, согласно формуле 888, поскольку значение n_x для визуального образа робота значительно превышает соответствующее значение для малогабаритной графической метки (рис. 6). Вместе с тем недостатками данного подхода являются его относительная ресурсоемкость и подверженность к смещению центра или полной потере отслеживаемого образа, в особенности в условиях низкой освещенности.

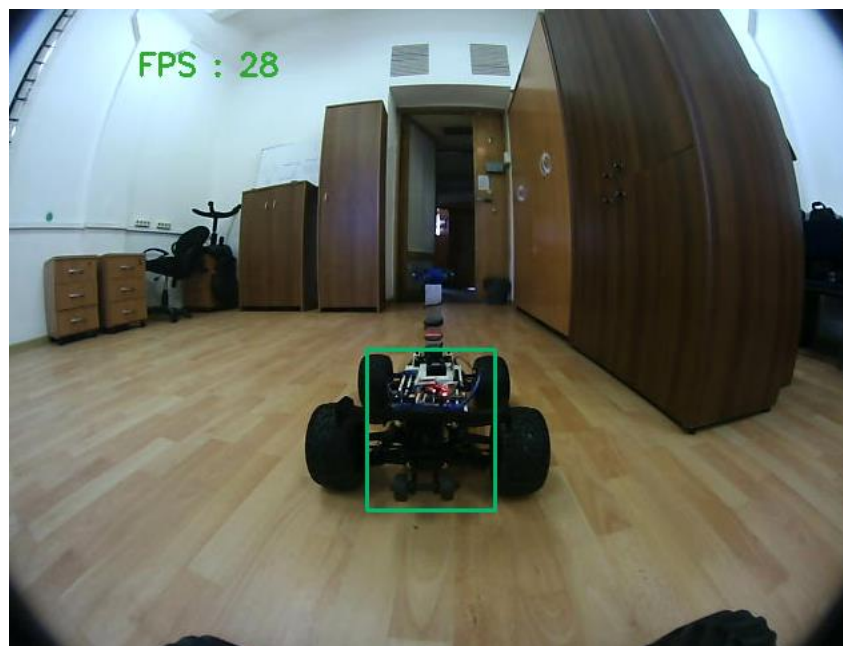


Рис. 6. Видеокادر с бортовой камеры ведомого робота в режиме визуального трекинга ведущего

И, наконец, третий способ исполнения графической метки основывается на применении QR-кодов. Изображения подобных меток позволяют не только определить матрицу пространственной трансформации связанного с ними объекта или участка поверхности, но и однозначно идентифицировать несколько подонных объектов расположенных на одном видеокadre (рис. 7).

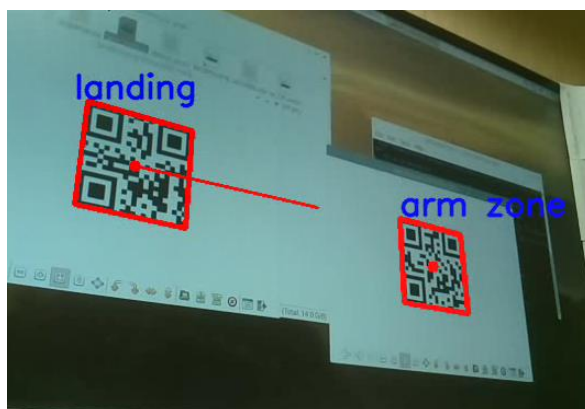


Рис. 7. Одновременная идентификация и оценка пространственного расположения нескольких визуальных меток в формате QR-кодов

Заключение

Использование герметичного роботизированного контейнера позволяет оперативно перемещать МК в различных средах (наземной, надводной и даже подводной) без временных затрат на перевод конструкции МК из полетного режима в транспортный и обратно. В результате значительно расширяется область эффективного применения МК. Главной проблемой в настоящее время является обеспечение высокой надежности автономной посадки МК на подвижную платформу на открытом воздухе с учетом влияния погодных условий. Дальнейшие исследования будут посвящены поиску методов обеспечения высокой надежности процесса посадки в контейнер, закрепленный на автомобиле, двигающемся по бездорожью.

Работа подготовлена при поддержке программы президиума РАН №30 "Теория и технологии многоуровневого децентрализованного группового управления в условиях конфликта и кооперации".

Литература

1. Барбасов В.К., Гречищев А.В. Мультироторные беспилотные летательные аппараты, представленные на российском рынке: обзор // Инженерные изыскания. 2014. № 8. С. 27-31.
2. Legovich Yu.S., Diane S.A.K., Rusakov K.D. Integration of modern technologies for solving territory patrolling problems with the use of heterogeneous autonomous robotic systems / Proceedings of the 11th International Conference "Management of Large-Scale System Development" (MLSD). Moscow: IEEE, 2018.
3. Legovich Yu.S., Efremov A.Yu., Fateeva Yu.G. Modern Approaches Assurance to the Problem of Detecting the Point Source of Atmospheric Air Pollution with the Use of Unmanned Aerial Vehicles / Proceedings of the 11th International Conference "Management of Large-Scale System Development" (MLSD). Moscow: IEEE, 2018.
4. Павлова Н.В., Смеюха А.В. Повышение эффективности выполнения полетного задания современными маневренными летательными аппаратами // Труды МАИ. 2016. №87.
5. Kong, W.; Zhou, D.; Zhang, D.; Zhang, J. Vision-based autonomous landing system for unmanned aerial vehicle: A survey. In Proceedings of the 2014 International Conference on Multisensor Fusion and Information Integration for Intelligent Systems (MFI), Beijing, China, 28–29 September 2014; pp. 1–8.
6. Kim J.W., Jung Y.D., Lee D.S., Shim D. H. Landing Control on a Mobile Platform for Multi-copters using an Omnidirectional Image Sensor // Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2016, vol. 84, pp. 529–541.
7. Sanchez-Lopez J.L., Pestana J., Saripalli S., Campoy P. An Approach Toward Visual Autonomous Ship Board Landing of a VTOL UAV // Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2014, vol. 74, pp. 113–127
8. Kemper P.F., Suzuki K.A.O., Morrison J.R. UAV Consumable Replenishment: Design Concepts for Automated Service Stations // Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2011, vol. 61, pp. 369–397
9. Г. Л. Поляк. Определение координат и параметров движения при маневрировании цели или преследователя. Вестник ВГУ. Серия: физика. Математика. 2016. № 2

10. *M. F. Sani and G. Karimian*, "Automatic navigation and landing of an indoor AR. drone quadrotor using ArUco marker and inertial sensors," 2017 International Conference on Computer and Drone Applications (IConDA), Kuching, 2017, pp. 102-107
11. *S. Garrido-Jurado, R. Muñoz-Salinas, F. J. Madrid-Cuevas, and M. J. Marín-Jiménez*, "Automatic generation and detection of highly reliable fiducial markers under occlusion," *Pattern Recognition*, vol. 47, pp. 2280-2292, 2014
12. *S. Suzuki*, "Topological structural analysis of digitized binary images by border following," *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, vol. 30, pp. 32-46, 1985.
13. *N. Otsu*, "A threshold selection method from gray-level histograms," *Automatica*, vol. 11, pp. 23-27, 1975.
14. *H. Tribak, Y. Zaz*, QR Code Recognition based on Principal Components Analysis Method. (IJACSA) International Journal of Advanced Computer Science and Applications, Vol. 8, No. 4, 2017
15. *J. F. Henriques, R. Caseiro, P. Martins, J. Batista*, High-Speed Tracking with Kernelized Correlation Filters. 2014. arXiv:1404.7584