

Архитектура системы автоматического управления группой малых беспилотных летательных аппаратов¹

А.В. Боковой

Аннотация. В статье рассматриваются методы и подходы к управлению группой малых беспилотных летательных аппаратов в условиях отсутствия сигнала с датчиков GPS/ГЛОНАСС с использованием известных маркеров. Работа охватывает вопросы распознавания маркеров, определения положений беспилотных летательных аппаратов и координации их движений. Описывается образец программной реализации системы навигации и управления, реализованного с использованием открытого программного обеспечения.

Ключевые слова: беспилотные летательные аппараты, визуальная навигация, система управления.

Введение

В текущий момент наблюдается повышенный интерес к малым беспилотным летательным аппаратам (БПЛА), как со стороны исследователей [1-7], так и со стороны коммерческих организаций [8-10]. Такой интерес вызван удешевлением компонентов для изготовления БПЛА, повышением их доступности на рынке, уменьшением размеров и повышением точности бортовых датчиков, а также увеличением производительности вычислителей, устанавливаемых на борт БПЛА. В связи с этим, круг решаемых такими робототехническими платформами задач растет с каждым годом.

Тем не менее, до сих пор существует ряд технических ограничений (особенно, если речь идет о БПЛА малых размеров), которые отражаются на точности и стабильности данных, получаемых с борта беспилотного летательного аппарата [11]. К таким ограничениям относятся энергопотреб-

ление датчиков, грузоподъемность БПЛА (не смотря на технический прогресс в этой области) и ограниченность пропускного канала беспроводной связи. Также, если в качестве среды, где проходит полет, выбрано помещение, то следует учитывать, что системы глобального позиционирования GPS/ГЛОНАСС будут недоступны. Таким образом, одной из перспективных задач на текущий момент является автоматическая навигация малых БПЛА по ограниченному набору датчиков (визуальных датчиков, ИНС, дальномеров и т.д.) с учетом зашумленности входящих данных.

Как более конкретная проблема в обозначенной области, рассматривается автоматизация навигации группы малых беспилотных летательных аппаратов по заранее известным маркерам [12, 13]. Навигация по маркерам может быть использована для автоматизации сортировки товаров в складских помещениях, доставки малогабаритных грузов, подробного картирования местности и т.д. На текущий момент, существуют

¹Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ грант №17-29-07053 офи_м

системы, позволяющие в той или иной степени решить поставленную задачу для одного малого беспилотного летательного аппарата [14-17]. Краткое описание таких систем будет дано ниже.

Рассмотрим практические реализации систем автоматического управления группой малых БПЛА. В работе [18] подробно описана система, позволяющая осуществлять автономное управление несколькими БПЛА в реальном времени. На борту каждого БПЛА установлен мощный вычислитель, позволяющий осуществлять обработку видеопотока и данных ИНС на борту. Картирование и локализация в таком случае происходит локально на каждом устройстве, после чего полученные данные передаются на станцию управления, где уже происходит глобальная локализация и картирование неизвестной местности, формирование управляющих команд для каждого БПЛА и обработка экстренных ситуаций. Учитывая специфику системы, ее применение возможно только для конкретной модели малого БПЛА (Sfly Hexacopter [19]), который обладает большей по сравнению с другими малыми БПЛА грузоподъемностью за счет особенностей его конструкции (гексоторная конструкция). Система управления роем БПЛА [20] позволяет управлять несколькими устройствами в заранее известной местности. Локализация на известной карте происходит средствами визуальных сенсоров, установленных на каждый БПЛА. Планирование траекторий и поведения каждого члена роя осуществляется с помощью алгоритма PSO [21] исходя из поставленных перед ними задач. Система “CVG Quadrotor Swarm” [22] включает в себя навигацию для группы БПЛА (не зависимо от его модели) как по известным маркерам, так и без них. Основное предназначение этой системы – навигация по заранее заданным траекториям. Несмотря на достоинства, описанные в работе, применимость системы вне лабораторных условий пока остается под сомнением. Беря во внимание все вышеописанное, можно сделать вывод о том, что задача автоматической навигации малых БПЛА по ограниченному количеству датчиков – актуальна.

Постановка задачи

Работа посвящена решению следующей задачи. Пусть даны несколько (от 2-х и более)

малых беспилотных летательных аппаратов мультироторного типа (квадрокоптер) и станция управления, к которой они подключены по беспроводному каналу. Каждый малых БПЛА оснащен набором датчиков. Минимальным набором для конкретной задачи являются датчики инерциальной навигационной системы (ИНС) и видеодатчик (единственная камера). Как правило, подобным набором датчиков обладает большинство современных БПЛА. Глобальные системы позиционирования считаются недоступными (основная среда использования системы - помещения).

Каждый БПЛА обеспечивает непрерывную передачу информации с датчиков на станцию управления по беспроводному каналу, а также осуществляет прием и исполнение простых команд управления от станции. К таким командам можно отнести взлет, посадку, изменение угла тангажа, крена, рысканья, аварийное отключение двигателей и т.д. В среде, в которой будет осуществляться навигация, известным образом расставлены распечатанные на листах бумаги визуальные маркеры. Задача состоит в том, чтобы по имеющимся в каждый момент данным обеспечить автоматическую навигацию всех малых беспилотных летательных аппаратов по заданным траекториям.

Аппаратная организация системы автоматического управления

В качестве целевого малого беспилотного летательного аппарата мультироторного типа был выбран квадрокоптер Bebop Drone (Рис.1), на борту которого имеются следующие датчики:

- трехосевой акселерометр;
- трехосевой гироскоп;
- магнетометр;
- датчик давления (барометр);
- камера на основе КМОП-датчика с изменения угла наклона.

Bebop Drone обеспечивает передачу информации в реальном времени по беспроводному каналу Wi-Fi. Также, целевой БПЛА оснащен бортовым вычислителем, позволяющим производить сжатие и передачу видео с камеры в реальном времени с разрешением 320x240 пикселей с частотой до 30 кадров в секунду.



Рис. 1. а) Малый беспилотный летательный аппарат мультироторного типа Bebop Drone; б) схема расположения двигателей БПЛА

Bebop Drone оснащен бортовым автопилотом, осуществляющим стабилизацию БПЛА в воздухе, а также поддерживающим исполнения базовых команд (взлет, посадка, изменение углов крена, тангажа, рысканья, изменение наклона камеры) для управления БПЛА. В совокупности, описанная платформа отвечает всем требованиям, поставленным в задачах работы.

В качестве станции управления используется мощный ноутбук, обладающий следующими характеристиками:

- процессор: Intel Core i7-4510U с частотой 3,1 GHz;
- количество оперативной памяти: 8 Гб;
- графический процессор: NVidia GeForce 840M с поддержкой технологии параллельных вычислений CUDA.

Подобранная конфигурация позволяет осуществлять обмен и обработку информации с нескольких (от 2-х до 8-ми) БПЛА, включая обработку видеопотока алгоритмами компьютерного зрения в реальном времени на графическом процессоре с использованием технологий параллельных вычислений.

Для расширения канала беспроводной связи в паре с рабочей станцией используется беспроводная точка доступа Wi-Fi, работающая на частоте 2,4 ГГц стандарта IEEE 802.11g и IEEE 802.11n. Схема взаимодействия группы БПЛА и станции управления приведена на Рис. 2.

Станция управления обеспечивает всю логику управления БПЛА, включая распознавание визуальных маркеров на каждом видеопотоке, определение местоположения каждого БПЛА в конкретный момент времени, обработка аварийных ситуаций, построение карты и



Рис. 2. Схема коммуникации группы малых беспилотных летательных аппаратов и станции управления

определение положения БПЛА на карте, синхронизация движений БПЛА и т.д.

Программная архитектура и средства реализации системы

Основным фреймворком для реализации системы автоматического управления группой малых беспилотных летательных аппаратов был выбран популярный среди исследователей в области робототехники Robot Operating System (ROS)[23] Kinetic под управлением операционной системы Ubuntu 16.04. ROS обеспечивает модульность разрабатываемых под нее программ посредством организации выполнения программ в виде отдельных узлов и коммуникации между ними. Каждый узел работает независимо от остальных узлов, а обмен данными между узлами происходит с помощью топиков (topics) или сервисов (services).

В реализации использовались следующие программные средства:

- язык программирования C++11;

- открытая библиотека для работы с линейной алгеброй Eigen3;
- средства для визуализации и моделирования RViz[22];
- отрытый драйвер для базового управления и приема информации с Bebop Drone в среде ROS bebop_autonomy;
- открытая библиотека для работы с алгоритмами компьютерного зрения OpenCV, собранная с поддержкой технологии параллельных вычислений CUDA.

Система состоит из нескольких узлов, каждый из которых отвечает за отдельную задачу и может быть заменен или дополнен другими узлами при смене логики управления БПЛА или алгоритмов картирования, локализации и/или выделения маркеров. Архитектура системы представлена на Рис. 3.

Узел bebop_autonomy осуществляет прием и передачу данных от БПЛА к рабочей станции на низком уровне, предоставляя средства для высокоуровневого управления БПЛА посредством топиков. Схема входящих и исходящих топиков для демонстрационного узла bebop_marker_demo_node представлена на Рис. 4.

Узел aruco_extraction_N запускается для каждого беспилотного аппарата отдельно. С его помощью осуществляется обработка видеопотока, полученного с БПЛА N, происходит выделение маркеров на изображениях, определение положения БПЛА относительно маркеров и т.д. На вход узла подается видеопоток через топик /bebopN/image_raw. На выходе – координаты точек в пространстве, относительно маркеров, выделенных на изображениях.

Узел localization_and_mapping_node отвечает за локализацию каждого БПЛА в глобальной карте. На вход узлу поступает информация с каждого aruco_extraction N. Внутри localization_and_mapping_node хранится известная карта расположения визуальных маркеров. После поступления данных, узел обновляет положение каждого БПЛА в известной карте, находит их ориентацию, сравнивает текущее положение с заданной траекторией, а также производит мониторинг возникновения экстренных ситуаций (опасного сближения, столкновений).

После обработки информации узлом localization_and_mapping_node, текущие положения

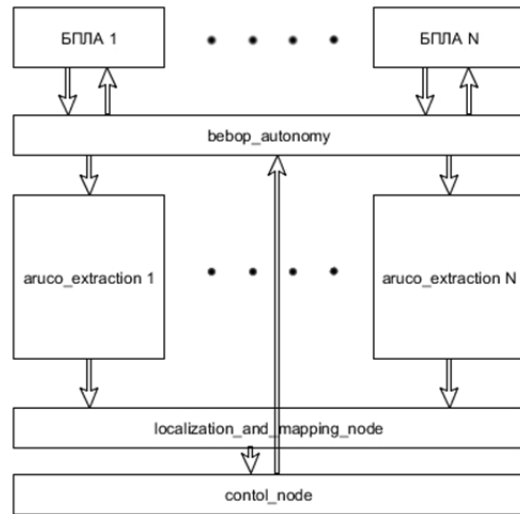


Рис. 3. Архитектура взаимодействия узлов в системе управления группой малых беспилотных летательных аппаратов

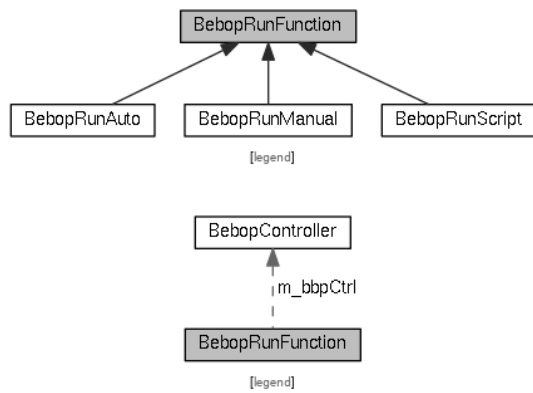


Рис. 4. Организация основного класса-интерфейса BebopRunFunction внутри узла control_node

каждого БПЛА передается узлу control_node, отвечающему за следование БПЛА по заданному маршруту. Узел производит корректировку управляющего вектора согласно текущему положению БПЛА и отдает команды непосредственно драйверу bebop_autonomy. Также, в процессе разработки был написан вспомогательный модуль bebop_keyboard_node для управления БПЛА с клавиатуры (с целью отладки и страховки на время экспериментов).

Модуль control_node организован таким образом, что можно дополнять его функционал без полной замены узла. В реализации предусмотрен интерфейс (Рис. 5), позволяющий полностью менять логику и способ управления

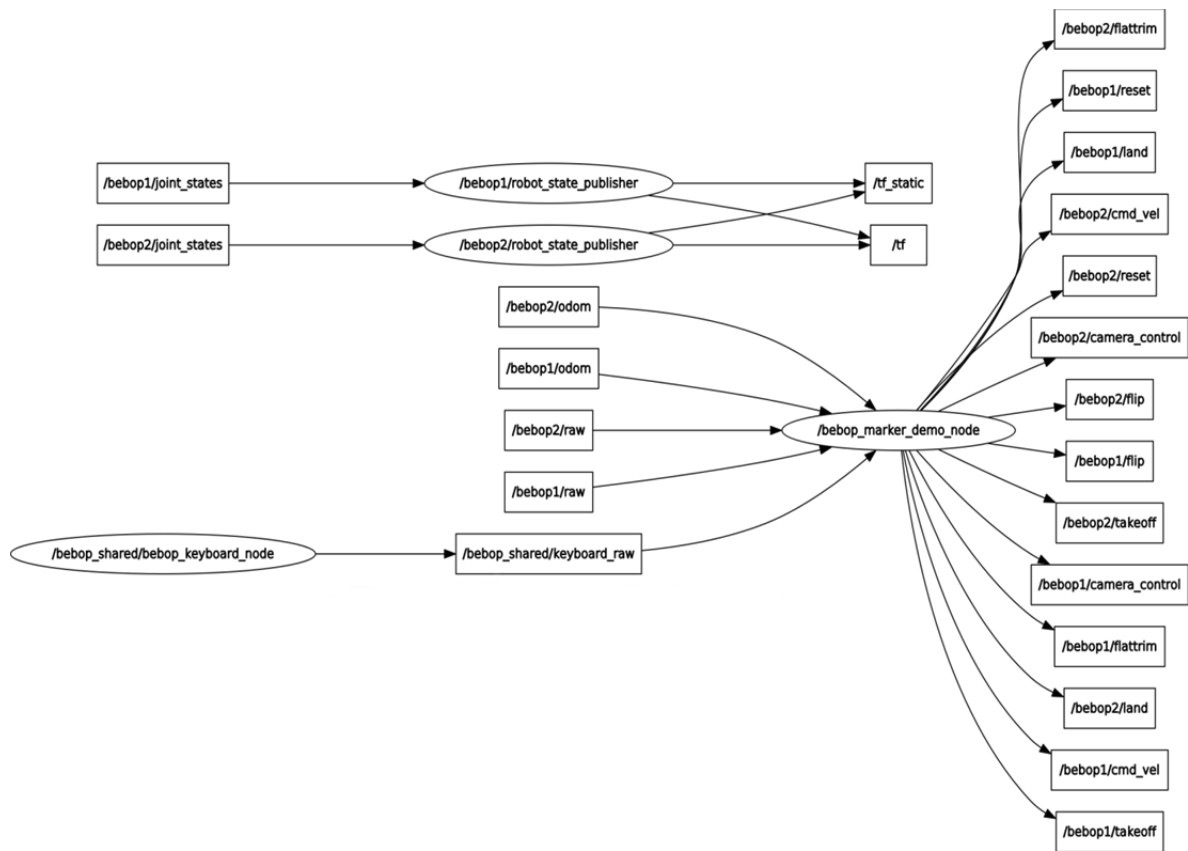


Рис. 5. Организация сообщения с экспериментальным узлом bebop_marker_demo_node

каждым БПЛА. В текущей реализации предусмотрены ручной способ управления, автоматический (с использованием вышеописанной логики) и управление с помощью примитивного скриптового языка. Ручной и скриптовый режимы предназначены для экспериментов и тестирования, производимых во время разработки системы, но успешно могут быть использованы для полуавтоматического управления.

Таким образом, описанный выше стек технологий и его организация составляют полную архитектуру разработанной системы автоматической навигации группы малых беспилотных летательных аппаратов. При изменении логики навигации БПЛА, протоколов взаимодействия или даже моделей БПЛА, соответствующие узлы могут быть заменены или программно дополнены в зависимости от конкретной задачи. Также, в силу независимости выполнения всех узлов друг от друга, отдельный функционал может быть легко добавлен в стек системы.

Метод визуальной навигации

Для определения положения малого БПЛА в текущий момент времени относительно известного маркера необходимо решить ряд задач, связанных с компьютерным зрением. К таким задачам относятся выделение маркеров на изображении и определения положения камеры БПЛА относительно этих маркеров. За все вычисления на этом этапе отвечает узел `aruco_extraction_N`.

В качестве основных маркеров было предложено использование маркеров `AruCo[25]` (Рис. 6) заранее известных размеров и расположений в пространстве друг относительно друга. Совокупность всех маркеров представляет из себя условную карту, по которой будет происходить навигация БПЛА. Рисунок на каждом маркере содержит в себе зашифрованный идентификатор.



Рис. 6. Примеры используемых для навигации маркеров ArucoCo

Распознавание таких маркеров на изображении происходит в несколько этапов (Рис. 7):

- 1) Предобработка изображения, преобразование в бинарный вид.
- 2) Выделение контуров маркеров.
- 3) Нормализация.
- 4) Определение идентификатора маркера.

На этапе предобработки изображения используется адаптивный фильтр Гаусса (adaptive Gaussian filter) [26], который позволяет отсеять шумы и искажения на изображении и преобразовать его в бинарный вид. Адаптивный фильтр не чувствителен к изменению освещения (за исключением случаев полной “засветки” или полного затемнения маркера).

После предобработки изображения, идет шаг выделения маркеров. Используя информацию о геометрической форме маркера (квадрат) задача сводится к выделению всех квадратов на изображении и его нормализации (устранению перспективных искажений, поворота и т.д.) с помощью метода RANSAC [27].

После выделения контуров маркеров, необходимо получить информацию об идентификаторе каждого маркера. Для этого нормализованный маркер разбивается на сетку, внутри каждой ячейки которой происходит определение каким цветом заполнена область (черным или белым) (Рис. 8) с учетом погрешности.

В результате проделанного шага, из маркера выделяется бинарная матрица из которой, в свою очередь, выделяется идентификатор, который представляет из себя натуральное число. После проделанных шагов необходимо определить положение БПЛА относительно маркеров на изображении.

Определение положения БПЛА

Учитывая, что геометрическая форма маркеров, а также их размеры – заранее известны, задача определения положения БПЛА сводится к *Perspective-n-Point* (PnP)[28] задаче. В таком случае, необходимо определить модель камеры:

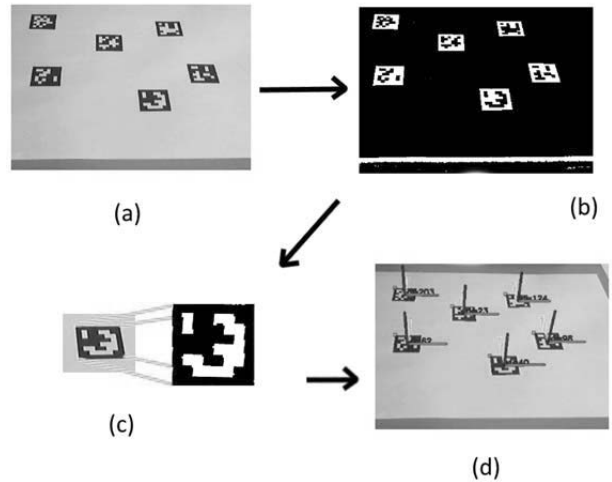


Рис. 7. Этапы выделения маркеров ArucoCo

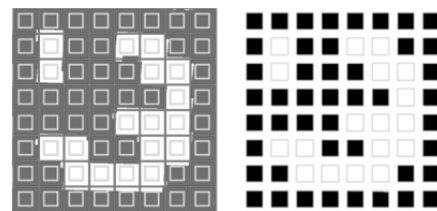


Рис. 8. Пример наложения сетки и извлечения информации внутри контура маркера ArucoCo

$$sm' = A[R|t]M',$$

где s – скаляр, определяющий масштаб (вычисляется по соотношению пикселей/метр);

m' – вектор координат проекции точки на изображении, спроецированной из трехмерного пространства;

A – матрица внутренних параметров камеры;

$[R|t]$ – матрица внешних параметров камеры;

M' – вектор координат точки в трехмерном пространстве.

Подробнее модель камеры определяется следующим образом:

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_1 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_2 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix},$$

где (u, v) – координаты точки на изображении;

f_x, f_y – фокальное расстояние в пикселях;

(c_x, c_y) – точка отклонения центра камеры;

(X, Y, Z) – координаты точки в пространстве.

Для устранения искажений, образованных линзой камеры и матрицей камеры, необходимо найти коэффициенты радиальной дисторсии k_1 - k_6 и коэффициенты тангенциальной дистор-

сии p_1 - p_2 . Для нахождения этих коэффициентов применяются методы калибровки камеры с использованием известного паттерна (в качестве паттерна в конкретном случае, могут быть использованы маркеры Aruco).

Таким образом, нахождение координаты точки в пространстве из ее проекции на изображение (с учетом полученных коэффициентов) имеет следующий вид:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} + t$$

$$x' = \frac{x}{z}$$

$$y' = \frac{y}{z}$$

$$x'' = x' \frac{1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6}{1 + k_4 r^2 + k_5 r^4 + k_6 r^6} + 2p_1 x' y'$$

$$+ p_2 (r^2 + 2x'^2)$$

$$y'' = y' \frac{1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6}{1 + k_4 r^2 + k_5 r^4 + k_6 r^6} + 2p_1 x' y'$$

$$+ p_2 (r^2 + 2y'^2)$$

$$r^2 = x'^2 + y'^2$$

$$u = f_x x'' + c_x$$

$$v = f_y y'' + c_y$$

После проделанных вычислений, нахождение матрицы внешней калибровки камеры БПЛА $[R/t]$ сводится к упомянутой PnP -задаче. Для повышения точности распознавания относительной позиции БПЛА также используется данные с инерциальной навигационной системы (а именно - гироскопов)[29, 30]. Также, данные ИНС позволяют не терять положение БПЛА в ситуации, когда на изображении не было выделено ни одного маркера.

Демонстрация программной реализации системы управления

Программная реализация системы была протестирована на 2-х малых беспилотных летательных аппаратах VeboP Drone.

Тестирование проводилось в помещении коридорного типа. Для визуализации построенной карты, а также текущих позиций каждого БПЛА, используется пакет RViz. На Рис. 9 показаны результаты работы программы для 2-х VeboP Drone'ов. На изображениях, полученных с камер, выделяются маркеры Aruco и определяются зашифрованные в них идентификаторы. Далее, система рассчитывает положение каждого БПЛА относительно распознанных маркеров. Уточнение позиции происходит с помощью датчиков ИНС в процессе расчета

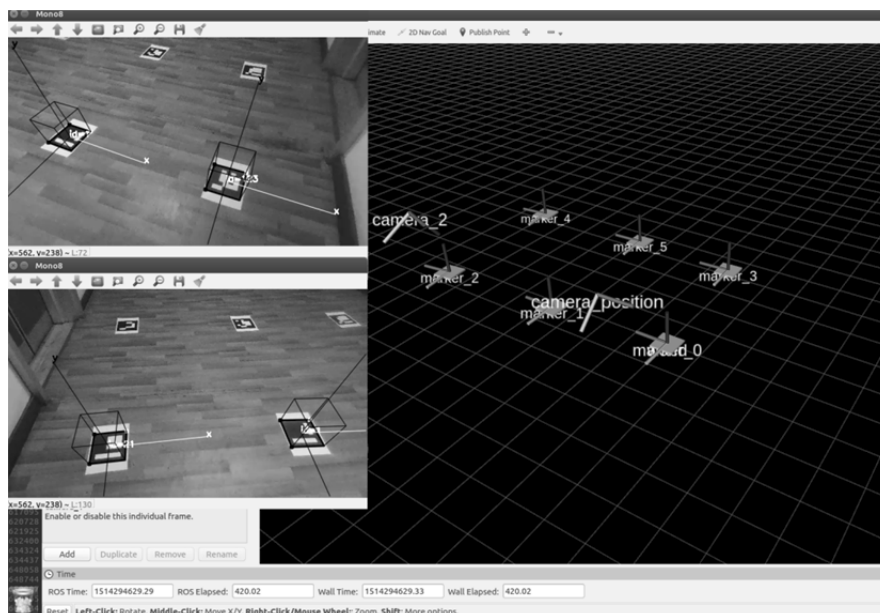


Рис. 9. Демонстрация работы системы для 2-х БПЛА VeboP Drone

текущего положения, основываясь на данных о предыдущих положениях БПЛА. На Рис. 9 метками «marker0-5» отмечены сами маркеры, позиция первого БПЛА – «camera_position», второго – «camera_2». Иллюстрация показывает, что помимо архитектуры и алгоритмов, в процессе работы также был получен действующий прототип системы.

Заключение

В работе рассмотрена архитектура системы управления группой малых беспилотных летательных аппаратов по визуальным маркерам, направленная на решение задачи автоматической навигации. Предложенная архитектура имеет модульную структуру, что позволяет расширять и/или менять функционал без внесения кардинальных изменений в саму архитектуру.

Описаны методы взаимодействия и протоколы обмена информации между модулями системы, а также описаны методы компьютерного зрения, использованные для выделения маркеров на изображениях и определения положения БПЛА.

Литература

- Adams S. M., Friedland C. J. A survey of unmanned aerial vehicle (UAV) usage for imagery collection in disaster research and management // 9th International Workshop on Remote Sensing for Disaster Response. – 2011. – С. 8.
- Nebiker S. et al. A light-weight multispectral sensor for micro UAV—Opportunities for very high resolution airborne remote sensing // The international archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences. – 2008. – Т. 37. – №. B1. – С. 1193-1199.
- Nex F., Remondino F. UAV for 3D mapping applications: a review // Applied Geomatics. – 2014. – Т. 6. – №. 1. – С. 1-15.
- Ruffier F. et al. Bio-inspired optical flow circuits for the visual guidance of micro air vehicles // Circuits and Systems, 2003. ISCAS'03. Proceedings of the 2003 International Symposium on. – IEEE, 2003. – Т. 3. – С. III-III.
- Макаров Д.А., Панов А.И., Яковлев К.С. Архитектура многоуровневой интеллектуальной системы управления беспилотными летательными аппаратами // Искусственный интеллект и принятие решений, 3, 2015. С.18-32.
- Архипкин А.В., Комченков В.И., Корольков Д.Н., Петров В.Ф., Симонов С.Б., Терентьев А.И. Задачи группового управления роботами в робототехническом комплексе пожаротушения // Труды СПИИРАН. 2016. Вып. 45. С. 116-129.
- Ронжин Андрей Леонидович, Юсупов Рафаэль Мидхатович Многомодальные интерфейсы автономных мобильных робототехнических комплексов // Известия ЮФУ. Технические науки. 2015. №1 (162). С.195-206
- Finn R. L., Wright D. Unmanned aircraft systems: Surveillance, ethics and privacy in civil applications // Computer Law & Security Review. – 2012. – Т. 28. – №. 2. – С. 184-194.
- Grenzdörffer G. J., Engel A., Teichert B. The photogrammetric potential of low-cost UAVs in forestry and agriculture // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. – 2008. – Т. 31. – №. B3. – С. 1207-1214.
- Jordan B. R. A bird's-eye view of geology: The use of micro drones/UAVs in geologic fieldwork and education // GSA Today. – 2015. – Т. 25. – №. 7. – С. 50-52.
- Metge J. et al. Dynamic magnetic field compensation for micro UAV attitude estimation // Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), 2013 International Conference on. – IEEE, 2013. – С. 725-733.
- Яковлев К.С., Петров А.В., Хитков В.В. Программный комплекс навигации и управления беспилотными транспортными средствами // Информационные технологии и вычислительные системы, 3, 2013. С. 72-83.
- Яковлев К. С. и др. Система навигации группы БЛА на основе маркеров // Робототехника и техническая кибернетика. – 2014. – №. 4. – С. 44-48.
- Sebesta K. D., Boizot N. A real-time adaptive high-gain EKF, applied to a quadcopter inertial navigation system // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2014. – Т. 61. – №. 1. – С. 495-503.
- Wang F. et al. An efficient uav navigation solution for confined but partially known indoor environments // Control & Automation (ICCA), 11th IEEE International Conference on. – IEEE, 2014. – С. 1351-1356.
- Wang F. et al. A mono-camera and scanning laser range finder based UAV indoor navigation system // Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), 2013 International Conference on. – IEEE, 2013. – С. 694-701.
- Siebert S., Teizer J. Mobile 3D mapping for surveying earthwork projects using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) system // Automation in Construction. – 2014. – Т. 41. – С. 1-14.
- Scaramuzza D. et al. Vision-controlled micro flying robots: from system design to autonomous navigation and mapping in GPS-denied environments // IEEE Robotics & Automation Magazine. – 2014. – Т. 21. – №. 3. – С. 26-40.
- Achtelik M. et al. Sfly: Swarm of micro flying robots // Intelligent Robots and Systems (IROS), 2012 IEEE/RSJ International Conference on. – IEEE, 2012. – С. 2649-2650.
- Saska M. et al. Swarm distribution and deployment for cooperative surveillance by micro-aerial vehicles // Journal of Intelligent & Robotic Systems. – 2016. – Т. 84. – №. 1-4. – С. 469-492.
- Shi Y., Eberhart R. C. Empirical study of particle swarm optimization // Evolutionary Computation, 1999. CEC 99. Proceedings of the 1999 Congress on. – IEEE, 1999. – Т. 3. – С. 1945-1950.
- Sanchez-Lopez J. L. et al. A reliable open-source system architecture for the fast designing and prototyping of autonomous multi-uav systems: Simulation and experimen-

- tation // *Journal of Intelligent & Robotic Systems*. – 2016. – Т. 84. – №. 1-4. – С. 779-797.
23. Quigley M. et al. ROS: an open-source Robot Operating System // *ICRA workshop on open source software*. – 2009. – Т. 3. – №. 3.2. – С. 5.
 24. Kam H. R. et al. RViz: a toolkit for real domain data visualization // *Telecommunication Systems*. – 2015. – Т. 60. – №. 2. – С. 337-345.
 25. Garrido-Jurado S. et al. Automatic generation and detection of highly reliable fiducial markers under occlusion // *Pattern Recognition*. – 2014. – Т. 47. – №. 6. – С. 2280-2292.
 26. Deng G., Cahill L. W. An adaptive Gaussian filter for noise reduction and edge detection // *Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference, 1993.*, 1993 IEEE Conference Record. – IEEE, 1993. – С. 1615-1619.
 27. Hast A., Nysjö J., Marchetti A. Optimal ransac-towards a repeatable algorithm for finding the optimal set. – 2013.
 28. Quan L., Lan Z. Linear n-point camera pose determination // *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*. – 1999. – Т. 21. – №. 8. – С. 774-780.
 29. Забегаев А. Н., Павловский В. Е. Адаптация фильтра Калмана для использования с локальной и глобальной системой навигации // *Препринты Института прикладной математики им. МВ Келдыша РАН*. – 2010. – №. 0. – С. 82-24.
 30. Трушков В.В., Хачумов В.М. Определение ориентации объектов в трехмерном пространстве – *Автометрия*, № 3, 2008, с. с.75-79..

Боковой Андрей Валерьевич. Младший научный сотрудник ФИЦ ИУ РАН. Окончил РУДН в 2016 году. Количество печатных работ: 10. Область научных интересов: компьютерное зрение, навигация, робототехника, методы картирования и локализации. E-mail: bokovoy@isa.ru

Automatic control system's architecture for group of small unmanned aerial vehicles

A.V. Bokovoy

This paper presents methods and algorithms for vision marker-based automatic control of small aerial vehicles group in GPS/GLONASS-denied environment. We explain the purposed methods for marker recognition, vision-based unmanned aerial vehicle's localization and their movement coordination. We introduce the preproduction model of our navigation system based on open-source projects.

Keywords: unmanned aerial vehicles, vision-based navigation, control system.

References

1. Adams S. M., Friedland C. J. A survey of unmanned aerial vehicle (UAV) usage for imagery collection in disaster research and management // *9th International Workshop on Remote Sensing for Disaster Response*. – 2011. – С. 8.
2. Nebiker S. et al. A light-weight multispectral sensor for micro UAV—Opportunities for very high resolution airborne remote sensing // *The international archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences*. – 2008. – Т. 37. – №. B1. – С. 1193-1199.
3. Nex F., Remondino F. UAV for 3D mapping applications: a review // *Applied Geomatics*. – 2014. – Т. 6. – №. 1. – С. 1-15.
4. Ruffier F. et al. Bio-inspired optical flow circuits for the visual guidance of micro air vehicles // *Circuits and Systems, 2003. ISCAS'03. Proceedings of the 2003 International Symposium on*. – IEEE, 2003. – Т. 3. – С. III-III.
5. Макаров Д.А., Панов А.И., Яковлев К.С. Архитектура многоуровневой интеллектуальной системы управления беспилотными летательными аппаратами // *Искусственный интеллект и принятие решений*, 3, 2015. С.18-32.
6. Архипкин А.В., Комченков В.И., Корольков Д.Н., Петров В.Ф., Симонов С.Б., Терентьев А.И. Задачи группового управления роботами в робототехническом комплексе пожаротушения // *Труды СПИИРАН*. 2016. Вып. 45. С. 116-129.
7. Ронжин Андрей Леонидович, Юсупов Рафаэль Мидхатович Многомодальные интерфейсы автономных мобильных робототехнических комплексов // *Известия ЮФУ. Технические науки*. 2015. №1 (162). С.195-206
8. Finn R. L., Wright D. Unmanned aircraft systems: Surveillance, ethics and privacy in civil applications // *Computer Law & Security Review*. – 2012. – Т. 28. – №. 2. – С. 184-194.
9. Grenzdoerffer G. J., Engel A., Teichert B. The photogrammetric potential of low-cost UAVs in forestry and agriculture // *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. – 2008. – Т. 31. – №. B3. – С. 1207-1214.
10. Jordan B. R. A bird's-eye view of geology: The use of micro drones/UAVs in geologic fieldwork and education // *GSA Today*. – 2015. – Т. 25. – №. 7. – С. 50-52.
11. Metge J. et al. Dynamic magnetic field compensation for micro UAV attitude estimation // *Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), 2013 International Conference on*. – IEEE, 2013. – С. 725-733.
12. Яковлев К.С., Петров А.В., Хитьков В.В. Программный комплекс навигации и управления беспилотными транспортными средствами // *Информационные технологии и вычислительные системы*, 3, 2013. С. 72-83.
13. Яковлев К. С. и др. Система навигации группы БЛА на основе маркеров // *Робототехника и техническая кибернетика*. – 2014. – №. 4. – С. 44-48.

14. Sebesta K. D., Boizot N. A real-time adaptive high-gain EKF, applied to a quadcopter inertial navigation system // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2014. – Т. 61. – №. 1. – С. 495-503.
15. Wang F. et al. An efficient uav navigation solution for confined but partially known indoor environments // Control & Automation (ICCA), 11th IEEE International Conference on. – IEEE, 2014. – С. 1351-1356.
16. Wang F. et al. A mono-camera and scanning laser range finder based UAV indoor navigation system // Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), 2013 International Conference on. – IEEE, 2013. – С. 694-701.
17. Siebert S., Teizer J. Mobile 3D mapping for surveying earthwork projects using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) system // Automation in Construction. – 2014. – Т. 41. – С. 1-14.
18. Scaramuzza D. et al. Vision-controlled micro flying robots: from system design to autonomous navigation and mapping in GPS-denied environments //IEEE Robotics & Automation Magazine. – 2014. – Т. 21. – №. 3. – С. 26-40.
19. Achtelik M. et al. Sfly: Swarm of micro flying robots // Intelligent Robots and Systems (IROS), 2012 IEEE/RSJ International Conference on. – IEEE, 2012. – С. 2649-2650.
20. Saska M. et al. Swarm distribution and deployment for cooperative surveillance by micro-aerial vehicles //Journal of Intelligent & Robotic Systems. – 2016. – Т. 84. – №. 1-4. – С. 469-492.
21. Shi Y., Eberhart R. C. Empirical study of particle swarm optimization //Evolutionary Computation, 1999. CEC 99. Proceedings of the 1999 Congress on. – IEEE, 1999. – Т. 3. – С. 1945-1950.
22. Sanchez-Lopez J. L. et al. A reliable open-source system architecture for the fast designing and prototyping of autonomous multi-uav systems: Simulation and experimentation // Journal of Intelligent & Robotic Systems. – 2016. – Т. 84. – №. 1-4. – С. 779-797.
23. Quigley M. et al. ROS: an open-source Robot Operating System // ICRA workshop on open source software. – 2009. – Т. 3. – №. 3.2. – С. 5.
24. Kam H. R. et al. RViz: a toolkit for real domain data visualization // Telecommunication Systems. – 2015. – Т. 60. – №. 2. – С. 337-345.
25. Garrido-Jurado S. et al. Automatic generation and detection of highly reliable fiducial markers under occlusion //Pattern Recognition. – 2014. – Т. 47. – №. 6. – С. 2280-2292.
26. Deng G., Cahill L. W. An adaptive Gaussian filter for noise reduction and edge detection // Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference, 1993., 1993 IEEE Conference Record. – IEEE, 1993. – С. 1615-1619.
27. Hast A., Nysjö J., Marchetti A. Optimal ransac-towards a repeatable algorithm for finding the optimal set. – 2013.
28. Quan L., Lan Z. Linear n-point camera pose determination //IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence. – 1999. – Т. 21. – №. 8. – С. 774-780.
29. Забегаев А. Н., Павловский В. Е. Адаптация фильтра Калмана для использования с локальной и глобальной системой навигации //Препринты Института прикладной математики им. МВ Келдыша РАН. – 2010. – №. 0. – С. 82-24.
30. Трушков В.В., Хачумов В.М. Определение ориентации объектов в трехмерном пространстве – Автометрия, № 3, 2008, с. с.75-79.

Bokovoy Andrey. Ph.D student of department of Science of Peoples' Friendship University of Russia, junior researcher in Federal Research Center «Computer Science and Control» of Russian Academy of Sciences. Research interests: computer vision, unmanned aerial vehicles, vision-based simultaneous localization and mapping methods. The number of publications: 10.
E-mail: bokovoy@isa.ru