

Сравнительное исследование навигационных систем для автономных беспилотных летательных аппаратов в помещении

А. М. Боронахин¹, Нгуен Куок Хань^{2✉}, Нгуен Чонг Иен³

¹Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ"
им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

²Вьетнамский государственный технический университет им. Ле Куй Дона, Ханой, Вьетнам

³Академия наук и технологий, Ханой, Вьетнам

✉ nguyenquockhanh183@gmail.com

Аннотация

Введение. Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) являются активно развивающейся сферой в последние годы. Во всех областях применения БПЛА особое значение уделяется точности позиционирования. Спутниковая система навигации (GPS) является оптимальным методом позиционирования для наружной среды, однако для внутренней среды ослабление сигнала GPS становится серьезным препятствием при определении местоположения БПЛА. Проведено множество исследований, посвященных разработке различных технологий позиционирования в помещении, отвечающих критериям компактности и малой массы, подходящих для малогабаритных летательных аппаратов, включая оптический поток, инерциальную навигационную систему, ультразвук и т. д. В настоящее время имеется немного обзоров технологий позиционирования в помещениях для автономных БПЛА, основанных на поиске информации по соответствующим статьям и на сравнении датчиков. Недостатками этих обзоров является неполнота оценки по основным критериям и неконкретность рассмотрения принципов их работы. С этой целью в данной статье представлен обзор современных технологий позиционирования в помещении, их принципов работы и оценка по разным критериям: точности, рабочему диапазону, стоимости. Дается оценка перспективной технологии на основе машинного зрения.

Цель работы. Классификация современных технологий навигации в помещении для БПЛА, а также оценка рассматриваемых технологий по разным критериям.

Материалы и методы. Классификация методов внутреннего позиционирования БПЛА по типу сигнала, используемого для подключения, и способности обработки информации без внешних сигналов. Оценка методов по критериям: точность, рабочий диапазон, стоимость, а также по их преимуществам и недостаткам.

Результаты. Представлена таблица классификации и оценки технологий навигации БПЛА в помещении, проведено обзорное представление этой области.

Заключение. Проведен обзор систем навигации БПЛА во внутренней среде. Рассмотрена технология на основе машинного зрения как перспективная и многообещающая в данной области.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат (БПЛА), позиционирование в помещении, оценка характеристик, технологии, основанные на техническом зрении

Для цитирования: Боронахин А. М., Нгуен Куок Хань, Нгуен Чонг Иен. Сравнительное исследование навигационных систем для автономных беспилотных летательных аппаратов в помещении // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2024. Т. 27, № 4. С. 6–18. doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-4-6-18

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 15.04.2024; принята к публикации после рецензирования 17.05.2024; опубликована онлайн 27.09.2024

Comparative Review of Navigation Systems for Indoor Autonomous Unmanned Aerial Vehicles

Alexander M. Boronakhin¹, Nguyen Quoc Khanh^{2✉}, Nguyen Trong Yen³

¹ Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

² Le Quy Don Technical University, Hanoi, Vietnam

³ Academy of Science and Technology, Hanoi, Vietnam

✉ nguyenquockhanh183@gmail.com

Abstract

Introduction. In recent years, unmanned aerial vehicles (UAVs) have been a rapidly advancing field. In all areas of UAV application, positioning accuracy is of particular importance. For outdoor environments, satellite navigation systems (such as GPS) are always the method of choice. However, for indoor environments, GPS signal weakening becomes a serious obstacle for determining the UAV location. A number of studies have been carried out to develop various indoor positioning technologies that meet the criteria of compactness and light weight, thus suitable for small aircrafts, including optical flows, inertial measurement systems, ultrasound, etc. However, there is a lack of comparative studies reviewing indoor positioning technologies for autonomous UAVs. The existing reviews fail to provide a comprehensive assessment of such technologies and their operational principles according to the main criteria. In this connection, this paper aims to review modern indoor positioning technologies and their operational principles, conducting evaluation according to such criteria as accuracy, operating range, cost. The assessment of promising machine vision-based technologies is carried out.

Aim. To classify modern indoor navigation technologies for UAVs; to assess the technologies under consideration according to various criteria.

Materials and methods. The current technologies for UAV indoor positioning were classified by the signal type used for connection and their capability to process information without external signals. The technologies were assessed according to the following criteria: accuracy, operating range, cost, as well as their advantages and disadvantages.

Results. A classification and evaluation table of UAV indoor positioning technologies is proposed; a review of the current developments in the field is given.

Conclusion. A review of UAV indoor positioning technologies has been carried out. In addition, the prospects of machine vision-based technologies are outlined.

Keywords: unmanned aerial vehicle (UAV), indoor positioning, performance assessment, vision-based technologies

For citation: Boronakhin A. M., Nguyen Quoc Khanh, Nguyen Trong Yen. Comparative Review of Navigation Systems for Indoor Autonomous Unmanned Aerial Vehicles. 2024, vol. 27, no. 4, pp. 6–18. doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-4-6-18

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Submitted 15.04.2024; accepted 17.05.2024; published online 27.09.2024

Введение. С ростом технологий беспилотные летательные аппараты (БПЛА) стали чрезвычайно развивающейся сферой в последние годы. Отличительной чертой БПЛА является способность выполнения задачи как в наружной среде, так и в помещениях, а также способность перемещения в сложных и опасных для людей зонах [1, 2]. Применение БПЛА включает разведку, наблюдение, сельскохозяйственные работы и т. д. Во всех случаях точность определения местоположения всегда является важным вопросом. Для наружной среды

оптимальным решением для навигации является GPS (Global Positioning System). Однако для внутренней среды возникают многочисленные проблемы, если сигнал системы GPS ослабевает и становится нестабильным. Характерными чертами внутренней среды являются ограниченное пространство и высокая плотность препятствий, что влияет на размеры, массу и уровень автоматизации малогабаритных летательных аппаратов (МЛА). В настоящее время ученые разработали множество технологий для контроля и управления движением МЛА с ис-

пользованием небольших и легких датчиков. К ним относятся оптический поток, инерциальная навигационная система (ИНС), ультразвук и т. д. Однако каждая из этих технологий имеет свои недостатки: невысокая точность и большие объемы вычислений для системы оптического потока [3]; накопление погрешности с течением времени для ИНС; ультразвук же обеспечивает высокую точность, но имеет малый радиус действия [3]. Таким образом, перспективным направлением развития станет комбинирование методов для устранения недостатков каждой технологии.

В настоящее время существует немного обзоров технологий позиционирования в помещениях для автономных БПЛА. В [4] представлен обзор технологий позиционирования на основе поиска информации по соответствующим статьям в системе IEEE Xplore. Однако в этом исследовании не описаны подробно принципы работы каждого метода и их классификация. Кроме того, в нем не содержится достаточной информации о современных методах. В [3] представлено сравнение датчиков, используемых для позиционирования в помещении. Несмотря на то что была предложена классификация датчиков, оценка неполная, дана без учета точности и радиуса действия. Сравнительный отчет по технологиям позиционирования в помещениях представлен в [5], где особое внимание уделяется таким распространенным системам, как оптический поток, ультразвук, LIDAR и Vicon, но не предложена полная классификация, позволяющая получить представление о современных технологиях позиционирования. С этой целью в статье представлена подробная классификация технологий по различным критериям, а также оценка и анализ конкретных методов с целью предоставления более целостного обзора этой области. Кроме того, рассматривается технология на основе технического зрения – новое и многообещающее решение для применения позиционирования в помещениях. Особое внимание уделяется двум системам: "lighthouse" и захвату движения. Это новые пути, открывающие большие перспективы для развития БПЛА.

Классификация. Технологии позиционирования внутренней среды часто классифицируются по типу сигнала, используемого для

подключения и способности обработки информации без внешних сигналов. Обычно разделяют два типа: автоматические и полуавтоматические. На рис. 1 показана классификация технологии по этим критериям.

1. Оптический поток. Метод определения видимого движения пикселей плоскости изображения с одинаковой интенсивностью между двумя последовательными кадрами [2] позволяет определять положение, скорость и направление объекта. Точность системы зависит от характеристик датчика и рассматриваемого алгоритма. Алгоритм определения оптического потока основан на следующих свойствах [6, 7]: постоянная яркость, плавность изображения и незначительное смещение пикселей. Некоторые алгоритмы, используемые для БПЛА:

- метод Лукаса–Канаде [8]
- метод вычисления оптического потока Хорна–Шунка, минимизирующий локальные погрешности [9];
- метод Сринивасана для малогабаритных БПЛА [10];
- метод суммарной абсолютной разницы (SAD) в сочетании с ИНС [11];
- метод масштабно-инвариантного преобразования признаков (SIFT), представляющий оптический поток на основе корреляции характеристик с движениями пикселей [12, 13].

Техника оптического потока часто используется для решения таких задач, как посадка, распознавание пространства, обнаружение препятствий и регулировка скорости полета [5]. Преимуществом метода является использование подходящего для размеров МЛА компактного и легкого датчика, имеющего высокую автоматичность и не требующего вмешательства внешних систем. Тем не менее существуют и определенные недостатки: невозможность составления карт пространства в формате 3D; большое количество вычислений, которые требуют мощных вычислительных платформ. В [14] была предложена система позиционирования для БПЛА в помещении с использованием метода Лукаса–Канаде. Система применяет ошибку "вперед-назад", что повышает точность в процессе сопоставления признаков. В конечном итоге оценки движения зависят от подхода к плоскости отверстия камеры-обскуры. Новая

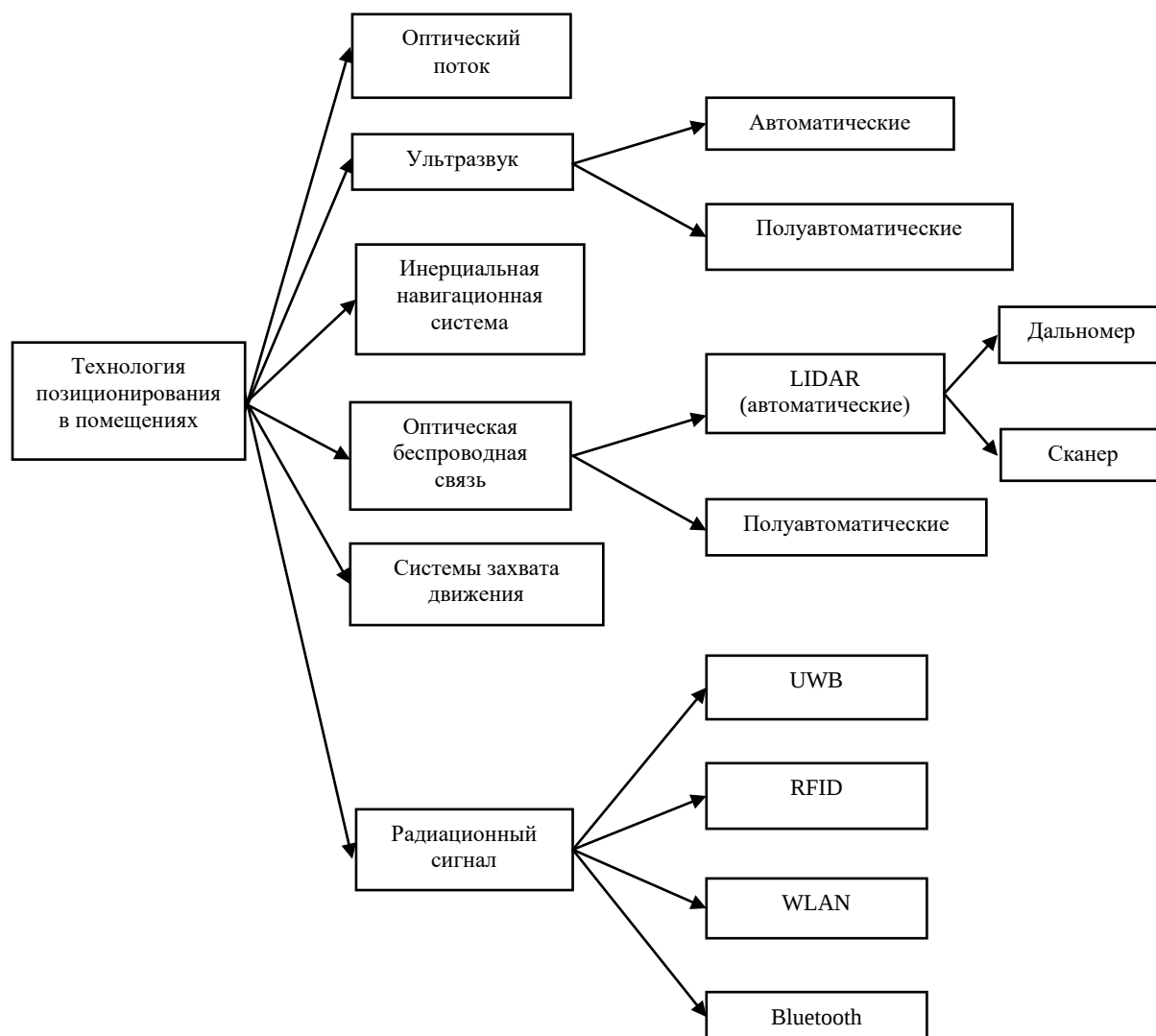


Рис. 1. Классификация технологий позиционирования БПЛА в помещениях

Fig. 1. Classification of indoor positioning technologies for UAV

система объединяет разреженные и плотные оптические потоки с расширенным фильтром Калмана для позиционирования БПЛА в помещении [15]. Отличительной особенностью здесь является использование измерений плотного оптического потока для оценки скорости БПЛА.

2. Ультразвук. Ультразвуковая система позиционирования в помещении использует высокочастотный звук как передаваемую волну для определения расстояния от приемника до передатчика. Ультразвуковая система позиционирования бывает как автоматической, так и полуавтоматической. Автоматическая система использует тот же принцип, что и летучая мышь: приемник и передатчик расположены на борту и передатчик испускает ультразвуковые волны в окружающую среду [5]. При столкно-

вении с препятствиями они отражаются, и система вычисляет расстояние от БПЛА до объекта на основе времени от момента испускания волны до момента ее приема. Автоматизированная ультразвуковая система используется для обнаружения объектов, поддержания дистанции и удержания высоты. Полуавтоматическая система использует фиксированные опорные точки [15]. Затем рассчитывается время пролета (Time of Flight – ToF) и триангуляции для определения абсолютного положения относительно некоторой фиксированной системы координат. Благодаря небольшой массе (несколько граммов), низкому энергопотреблению и доступной стоимости при высокой точности в несколько сантиметров ультразвуковые датчики исключительно полезны для применения

на БПЛА, особенно в помещениях, где требуется оборудование с ограниченной грузоподъемностью. Однако основным недостатком этой системы является небольшой радиус действия (несколько метров) и сильное влияние условий окружающей среды из-за поглощения звука (температура, влажность воздуха, давление) [3]. В [16] предложена система, сочетающая ультразвук и оптику для позиционирования БПЛА. Ультразвуковой модуль использует схему множественного доступа с временным разделением кодов для вычисления горизонтального положения БПЛА с помощью процедуры мультилатерации 2D. В [17] для оценки 3D-местоположения БПЛА используется система в помещении с 5 размещенными на потолке опорными точками, излучающими ультразвуковые волны.

3. Радиотехнический сигнал. Радиотехнические системы широко используются для определения абсолютного положения БПЛА во внутренней среде. Общие методы для радиотехнических систем включают индикацию измеренного уровня сигнала, измерение времени прибытия или триангуляцию. Основными технологиями, используемыми для позиционирования БПЛА в помещениях, являются WLAN, RFID, UWB и Bluetooth.

3.1. Сверхширокополосный диапазон (UWB) является одной из наиболее широко используемых технологий для позиционирования в помещениях. Система основана на широкой полосе пропускания (несколько сотен мегагерц) в диапазоне коротких временных импульсов (1 нс) для обеспечения точности в пределах нескольких сантиметров [3]. Самым большим преимуществом использования UWB является его высокая устойчивость к многолучевому распространению. Это можно объяснить использованием широкой полосы пропускания, что облегчает обнаружение запаздывающих сигналов. Технология UWB работает на малой длине волны, в которой часть сигнала способна проникать сквозь такие материалы, как стекло, бетон и дерево, что обеспечивает возможность позиционирования в помещении в условиях отсутствия прямой видимости (NLOS), когда часто присутствуют препятствия [16–18]. С другой стороны, часть сигнала поглощается объектами, что сильно затрудняет определение местоположения на

больших расстояниях. Таким образом, извлечение информации из сигнала является большой проблемой для этой технологии. UWB использует методы измерения времени прибытия (Time of Arrival – ToA) и разницы во времени прибытия (Time Difference of Arrival – TDoA) для определения местоположения БПЛА в помещении [18]. В [19] представлен подход к позиционированию БПЛА во внутренней среде с использованием UWB, основанный на TDoA. Система использует 8 приемных узлов, закрепленных на стенах, и метку, расположенную на БПЛА. В [20] представлен новый подход к построению 3D-карты, сочетающий UWB и облака точек. Карта используется в методе локализации Монте-Карло для оценки положения БПЛА.

3.2. Идентификация радиочастоты (RFID) – это технология, использующая радиоволны для идентификации и отслеживания меток. БПЛА, использующий систему RFID, оснащен считывающим устройством с распознающей антенной, собирающим информацию о местоположении закрепленных меток, на основании чего вычисляется относительное местоположение устройства [18]. Метки RFID делятся на два типа: пассивные и активные. Пассивные метки работают по принципу индукции без использования батареи, в отличие от активных меток. Основными методами, используемыми в системах RFID, являются ячейка происхождения (Cell of Origin – CoO), ToA и индикатор уровня полученного сигнала (Received Signal Strength Indicator – RSSI). Из них наиболее распространенным является CoO из-за простоты вычислений [21]. Точность системы во многом зависит от плотности меток, а также от радиуса действия и обычно составляет от 1 до 5 м [5]. Поскольку такой точности недостаточно для применения позиционирования в помещении, в настоящее время точность системы RFID улучшается комбинированием нескольких систем позиционирования. В [22] спроектирован автономный БПЛА для задачи инвентаризации склада. БПЛА оснащен системой позиционирования, включающей алгоритм обхода препятствий и алгоритм планирования и навигации на основе стигмергии.

3.3. WLAN (беспроводная локальная сеть, стандарт IEEE 802.11) может использоваться

для определения местоположения мобильных устройств в помещении. Наиболее очевидными преимуществами системы WLAN являются ее широкая доступность во многих помещениях и возможность использования стандартных мобильных устройств [18]. Зона покрытия WLAN значительная – от 50 до 100 м. Кроме того, сигнал Wi-Fi способен проникать сквозь объекты, поэтому требования к прямой видимости отсутствуют [23]. Распространенным методом, используемым для WLAN, является "отпечаток пальца" (fingerprint) на основе RSSI, но это неточный метод для определения местоположения БПЛА в помещении (точность от 2 м), поэтому его обычно комбинируют с другими технологиями для повышения эффективности. Точность системы WLAN обычно зависит от сложности структуры системы. В [24] предложен метод многомерного шкалирования и взвешенной локализации центра для определения расстояния от БПЛА до существующей инфраструктуры Wi-Fi.

3.4. Bluetooth – это стандарт беспроводной связи для беспроводных персональных сетей, созданный Bluetooth Special Interest Group. Bluetooth является довольно разумным выбором для определения местоположения БПЛА в помещении из-за его низкой стоимости и низкого энергопотребления. Однако точность системы не гарантируется (в пределах 2 м). Радиус действия Bluetooth довольно мал – от 5 до 10 м [18]. Используемыми методами являются RSSI и ToA. В настоящее время исследования Bluetooth продолжаются из-за его компактности и простоты способа связи. В [25] представлена система патрулирования БПЛА на основе системы Bluetooth.

4. Системы захвата движения – современные системы, которые позволяют воссоздать движение отслеживаемого объекта, обычно используются в виртуальной реальности, а также в создании анимации. Навигация во внутренней среде также является интересной областью применения для этих систем [3]. Система состоит из нескольких камер с отдельными зонами покрытия [5]. Камеры используют инфракрасные светодиоды для создания изображений, которые после фильтрации становятся черными за исключением прикрепленных к БПЛА шаров, отражающих инфракрасный свет. Наземный

центральный компьютер подключается к камерам через специальную сеть, собирает и обрабатывает данные, восстанавливает движение БПЛА в реальном времени. Точность системы захвата движения может достигать нескольких миллиметров, что является идеальной точностью для внутреннего позиционирования. Однако стоимость развертывания системы довольно высока (до 30 тыс. долларов США) и подходит только для специализированных лабораторий. В [26] представлен алгоритм управления БПЛА на основе визуального сервоуправления с использованием системы Vicon.

5. ИНС – это распространенная в навигации система, используемая для оценки положения, скорости, а также направления. Основными компонентами ИНС являются: 3 акселерометра для измерения линейного ускорения, 3 гироскопа для измерения угловой скорости и/или магнитометра для измерения силы и направления магнитного поля. Точность положения во многом зависит от качества первоначального положения и ориентации [18]. Преимуществами ИНС являются автономность, высокая частота обновления, высокая стабильность, что подходит для кратковременного позиционирования. Основным недостатком этой системы является накопление ошибок с течением времени, поскольку система использует метод интегрирования для определения положения и ориентации [27]. Для преодоления этого недостатка в настоящее время ИНС обычно сочетаются с низкочастотными системами для обновления позиционирования, чтобы устранить накопленные ошибки. В [27] ИНС объединяется с одной камерой на борту для построения трехмерной карты и локализации БПЛА в помещении.

6. Оптическая беспроводная связь (OWC) – перспективная технология для локализации и 3D-картирования, которая обеспечивает высокую пропускную способность, гибкость, масштабируемость, простоту использования, высокую безопасность и скорость и может заменить радиотехнические во многих применениях в будущем [28]. Для позиционирования БПЛА во внутренней среде можно разделить на два типа: автоматические (системы LIDAR) и полуавтоматические, использующие фиксированные опорные точки для позиционирования.

6.1. LIDAR – это активная технология ди-

станционного зондирования, использующая лазерные датчики. Существует два типа датчиков LIDAR: дальнометры и сканеры. Дальнометры аналогичны автоматическим ультразвуковым системам, характеризуются одним лазерным лучом, излучаемым передатчиком и отражаемым от препятствия [29]. Для измерения расстояния от устройства до препятствия используется метод ToF. Сканер же характеризуется сканирующей плоскостью, собирает полную информацию о времени возврата лазерных лучей и представляет информацию об исследуемой области в виде 3D-облака точек [30]. Как правило, для моделирования полной среды одного сканирования недостаточно, а управление облаком точек довольно сложно, поэтому сканеры LIDAR обычно имеют высокую цену. Точность LIDAR может достигать миллиметров. В [31] данные LIDAR объединяются с данными ИНС для компенсации ошибок, вызванных изменяющейся плоскостью сканирования. Данные LIDAR также используются для оценки ошибок, вызванных MEMS-датчиками, с помощью фильтра Калмана.

6.2. Опорные системы позиционирования. Полуавтоматические системы используют фиксированные опорные точки для определения местоположения мобильных устройств с помощью световых сигналов. При этом передатчик может быть установлен стационарно, а приемник – на БПЛА или наоборот. В опорных системах используется множество методов. Для систем с одним входом и одним выходом обычно применяется RSS, для нескольких входов и выходов – угол прибытия (Angle of Arrival – AoA) или ToA [28]. В этой технологии используется широкий диапазон длин волн (включая видимый свет и инфракрасный), обеспечивающий высокую пропускную способность для целей связи. Преимуществами системы являются гибкость, низкая стоимость, простота развертывания при сохранении высокой производительности (точность в пределах нескольких сантиметров). Недостатками этой системы являются проблема затухания из-за многолучевости и влияние внешних световых условий (солнечный свет, искусственное освещение). Кроме того, опорные системы предъявляют высокие требования к прямой видимо-

сти (LOS), что является большой проблемой при позиционировании в помещении, где присутствует много препятствий.

Как упоминалось ранее, каждая технология имеет свои преимущества и недостатки, поэтому комбинированные подходы для преодоления слабых сторон отдельных технологий являются перспективным направлением. В таблице приведено сравнение технологий позиционирования и навигации БПЛА в помещениях. Технологии оцениваются по следующим параметрам: точность, рабочий диапазон, стоимость, а также их преимущества и недостатки.

Система позиционирования Lighthouse (Valve Lighthouse – LH) изначально разрабатывалась для приложений виртуальной реальности, но затем, ввиду потенциала в области локализации и картирования, система была доработана для внутреннего позиционирования роботов [32–34]. Преимуществами этой системы являются низкая стоимость, простота в транспортировке и использовании, а также возможность автономной работы без центрального компьютера. Точность системы LH для контроллеров и устройств слежения была показана в [34, 35]. В [36] реализовали систему внутреннего позиционирования для БПЛА с использованием 1 или 2 станций LH. Программное обеспечение с открытым исходным кодом может работать на БПЛА в режиме реального времени и запускать алгоритм децентрализованной фильтрации. Система позиционирования LH состоит из двух основных частей: станции и сенсорной платы. Станция LH состоит из вращающихся барабанов, формирующих плоскости инфракрасного света. В настоящее время существует 2 версии станции LH (рис. 2): LH1 содержит 2 вращающихся барабана, расположенных перпендикулярно; LH2 содержит один вращающийся барабан с 2 наклонными плоскостями. LH2 превосходит LH1 по конструкции, при этом снижаются затраты на производство. Сенсорная плата включает 4 датчика, способных обнаруживать плоскости инфракрасного света от LH, и вычисляет на этой основе положение БПЛА в системе координат, связанной со станцией.

Для внутреннего позиционирования БПЛА предложено два основных метода (рис. 3): метод пересекающихся лучей при использовании

Сравнение технологий позиционирования и навигации БПЛА в помещениях
Comparison of UAV positioning and navigation technologies in indoor environments

Технология	Точность	Рабочий диапазон	Стоимость	Преимущества	Недостатки
Оптический поток	~ 10 см	От 80 мм до бесконечности	Средняя	Компактность, стабильность	Невозможность отображения пространства, большой объем встроенных вычислений
Ультразвук	3...4 см	До 2...3 м	Низкая	Низкая стоимость, мощность	Влияние температуры и влажности
UWB	Несколько см	~ 100 м	Высокая	Высокая устойчивость к многолучевому распространению	Высокая стоимость
RFID	1...5 м	~ 100 м	Низкая	Простая реализация	Низкая точность, влияние многолучевого распространения
WLAN	1 м	50...100 м	Низкая	Повторное использование инфраструктуры	Низкая точность, компромисс между точностью и сложностью
Bluetooth	2 м	5...10 м	Низкая	Низкое потребление и стоимость	Низкая точность
Захват движения	Несколько мм	~30 м	Высокая	Высокая скорость, высокое разрешение	Высокая стоимость, требование специальной установки для работы
ИНС	Несколько см	∞	Низкая	Автономность, высокая частота обновления, высокая стабильность	Накопление ошибок с течением времени
LIDAR	Несколько мм	~ 10 м	Высокая	Высокая точность и надежность	Большой объем встроенных вычислений, нестабильность в больших помещениях, проблемы вблизи границ стекла
Опорная световая система	1...2 см	4...5 м	Низкая	Гибкость, низкая стоимость, простота реализации	Проблема затухания из-за многолучевости и влияние внешних световых условий

2 станций и модель измерения расширенного фильтра Калмана для 1 станции. Для оценки точности системы в каждом случае авторы сравнили полученные данные с данными системы захвата движения (ошибка системы захвата движения в пределах миллиметров считается исходными данными для сравнения с другими системами). Полученные результаты показывают, что точность LH2 выше, чем у LH1, благодаря механической простоте конструкции и улучшенным возможностям калибровки. Кроме того, метод с использованием измерения расширенного фильтра Калмана обеспечивает более низкую эффективность, чем метод пересекающихся лучей как для LH1, так и для LH2. Это говорит о том, что помехи от ИНС больше, чем от ЛН. Точность этой системы находится в пределах от 2 до 5 см. Наконец, виден потенциал системы ЛН, которая

станет заменой дорогостоящей системы отслеживания движения. Благодаря доступной цене и возможности автономной работы это интересная технология для будущих исследований.

Система захвата движения. С развитием технологий на основе технического зрения системы захвата движения становятся одной из наиболее передовых технологий в области воспроизведения движения объектов. Можно назвать такие системы, как Vicon, Qualisys, OptiTrack, причем OptiTrack является самой современной системой на сегодняшний день. Как и другие системы захвата движения, OptiTrack (рис. 4) использует высокоскоростные камеры с градуировкой по яркости для отслеживания пассивных меток, освещенных инфракрасным светом с длиной волны около 860 нм [37]. Метками здесь служат шарики

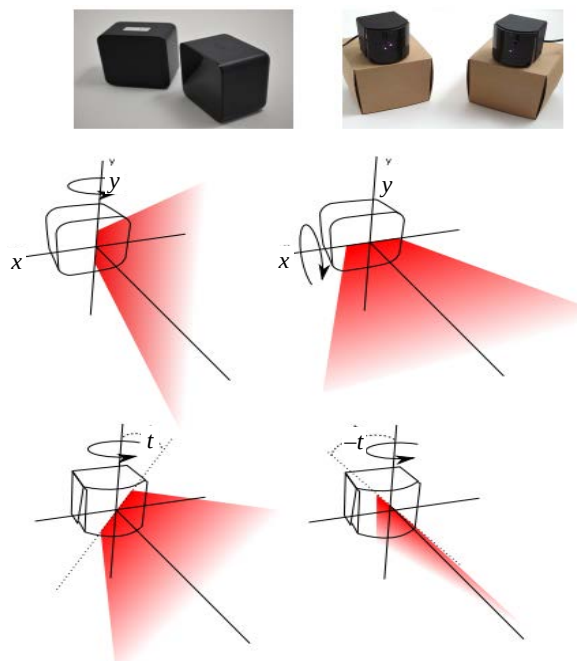


Рис. 2. Две версии станции Lighthouses и принцип их работы [36]

Fig. 2. Two versions of the Lighthouses station and their operating principle [36]

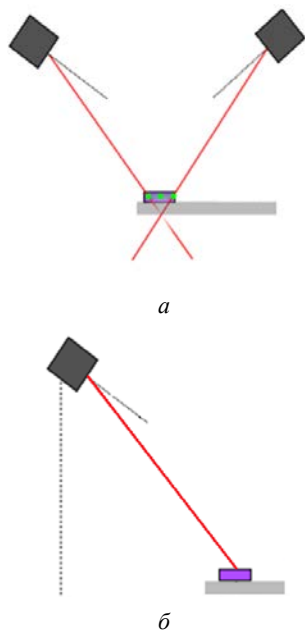


Рис. 3. Два метода позиционирования: а – пересекающихся лучей; б – модель измерения расширенного фильтра Калмана [36]

Fig. 3. Two positioning methods: а – crossing beam method; б – extended Kalman filter measurement model [36]

размером около 6.7 мм, отражающие инфракрасный свет от камеры. Система OptiTrack отличается от других систем захвата движения возможностью высокоточного отслеживания 6



Рис. 4. OptiTrack-камера [38]

Fig. 4. OptiTrack camera [38]

степеней свободы, низкой задержкой, а также возможностью работы в условиях внешней освещенности (солнечный свет, искусственное освещение) благодаря мощным стробоскопам и специально разработанным полосовым фильтрам [38]. Точность позиционирования БПЛА (рис. 5) составляет менее 0.3 мм для положения и менее 0.5° для ориентации. Наименьшая погрешность наблюдается в центральной области системы, где метки могут быть обнаружены всеми камерами. Область обзора также является преимуществом системы, поскольку расстояние обзора может достигать 30 м.



Рис. 5. Системы OptiTrack для БПЛА в помещении [38]

Fig. 5. OptiTrack systems for UAV in indoor environment [38]

Единственным недостатком системы OptiTrack, как и других систем захвата движения, является стоимость развертывания (30 тыс. евро), что подходит только для профессиональных лабораторий. Снижение стоимости, а также упрощение структуры системы станет направлением развития в будущем, поскольку эта технология является одной из лидирующих в области локализации и картирования.

Заключение. В данной статье был предложен обзор систем навигации БПЛА во внут-

ренной среде. Каждая технология имеет свои преимущества и недостатки. Технология на основе технического зрения представляет собой перспективное направление для систем навигации, особенно в помещениях, и включает в себя две основные системы: ЛН и захвата движения. Система захвата движения выделяется высокой точностью, но высокие затраты делают ее неподходящей для популярных при-

менений. Система ЛН широко развивается, так как обладает высокой точностью и возможностью устранения влияния окружающего освещения. Недостатком этой системы является ограниченный радиус действия и высокие требования к линии зрения. Поэтому сочетание системы ЛН с другими системами (ИНС, оптический поток и т. д.) будет предметом исследований в будущем.

Список литературы

1. Kanellakis C., Nikolakopoulos G. Survey on Computer Vision for UAVs: Current Developments and Trends // J. of Intell Robot Syst. 2017. Vol. 87. P. 141–168. doi: 10.1007/s10846-017-0483-z
2. Chao H., Gu Y., Napolitano M. A survey of optical flow techniques for UAV navigation applications // Intern. Conf. on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), Atlanta, USA, 28–31 May 2013. IEEE, 2013. P. 710–716. doi: 10.1109/ICUAS.2013.6564752
3. A novel distributed architecture for UAV indoor navigation / L. Yuntian, M. Scanavino, E. Capello, F. Dabbene, G. Guglieri, A. Vilaridi // Transportation Research Procedia. 2018. Vol. 35. P. 13–22. doi: 10.1016/j.trpro.2018.12.003
4. Review of UAV positioning in indoor environments and new proposal based on US measurements / M. C. Pérez, D. Gualda, J. Vicente-Ranera, J. M. Villadangos, J. Ureña // Intern. Conf. on Indoor Positioning and Indoor Navigation, Italy, 10 March 2019. CEUR: Ljubljana, Slovenia, 2019. P. 1–8.
5. Muhammad A. Comparative Study of Indoor Navigation Systems for Autonomous Flight // Telecommunication Computing Electronics and Control. 2018. Vol. 16, № 1. P. 118–128. doi: 10.12928/telkomnika.v16i1.6814
6. Roth S., Black M. J. On the spatial statistics of optical flow // Intern. J. of Computer Vision. 2007. Vol. 74, № 1. P. 33–50. doi: 10.1109/ICCV.2005.180
7. Black M. J., Anandan P. The robust estimation of multiple motions: Parametric and piecewise-smooth flow fields // Computer Vision and Image Understanding. 1996. Vol. 63, № 1. P. 75–104. doi: 10.1006/cviu.1996.0006
8. Lucas B. D., Kanade T. An iterative image registration technique with an application to stereo vision // Proc. of Imaging Understanding Workshop. 1981. P. 121–130.
9. Horn B., Schunck B. Determining optical flow // Artificial Intelligence. 1981. Vol. 17. P. 185–203. doi: 10.1016/0004-3702(81)90024-2
10. Srinivasan M. V. An image interpolation technique for the computation of optical flow and ego-motion // Biological Cybernetics. 1994. Vol. 71. P. 401–415. doi: 10.1007/BF00198917
11. Kendoul F., Fantoni I., Nonami K. Optic flow-based vision system for autonomous 3d localization and control of small aerial vehicles // Robotics and Autonomous Systems. 2009. Vol. 57, № 6. P. 591–602. doi: 10.1016/j.robot.2009.02.001
12. Lowe D. G. Distinctive image features from scale-invariant key-points // Intern. J. of Computer Vision. 2004. Vol. 2, № 60. P. 91–110. doi: 10.1023/B%3AAVISI.0000029664.99615.94
13. The Use of Optical Flow for UAV Motion Estimation in Indoor Environment / Z. Yu, W. Tingting, C. Zhihao, W. Yingxun, Y. Zhenxing // IEEE Chinese Guidance, Navigation and Control Conference, Nanjing, 12–14 Aug. 2016. IEEE, 2016. P. 785–790. doi: 10.1109/CGNCC.2016.7828885
14. Fausto F., Ju-Hyeon H. Visual Inertial Navigation for a Small UAV Using Sparse and Dense Optical Flow // Workshop on Research, Education and Development of Unmanned Aerial Systems (RED UAS), Cranfield, UK, 25–27 Nov. 2019. IEEE, 2019. P. 206–212. doi: 10.1109/REDUAS47371.2019.8999672
15. Micro unmanned aerial vehicle visual servoing for cooperative indoor exploration / P. Rudol, M. Wzorek, G. Conte, P. Doherty // Aerospace Conf., Sky, USA, 01–08 March 2008. IEEE, 2008. P. 1–10. doi: 10.1109/AERO.2008.4526558
16. 3D Indoor Positioning of UAVs with Spread Spectrum Ultrasound and Time-of-Flight Cameras / J. A. Paredes, F. J. Álvarez, T. Aguilera, J. M. Villadangos // Sensors. 2017. Vol. 18, № 1. P. 89. doi: 10.3390/s18010089
17. 3D Position Estimation of an UAV in Indoor Environments using an Ultrasonic Local Positioning System / D. Gualda, J. Ureña, M. C. Pérez, H. Posso, S. Bachiller, R. Nieto // 9th Intern. Conf. on Indoor Positioning and Indoor Navigation, Nantes, France, 24–27 Sept. 2018. IFSTTAR, 2018. P. 212808.
18. Daly D., Melia T., Baldwin G. Concrete Embedded RFID for Way-Point Positioning // Intern. Conf. on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), Zurich, Switzerland, 15–17 Sept. 2010. IEEE, 2010. P. 1–10.
19. Tiemann J., Wietfeld C. Scalable and precise multi-UAV indoor navigation using TDOA-based UWB localization // Intern. Conf. on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), Sapporo, Japan, 18–21 Sept. 2017. IEEE, 2017. P. 1–7. doi: 10.1109/IPIN.2017.8115937
20. Multi-modal mapping and localization of unmanned aerial robots based on ultra-wideband and RGB-D sensing / F. J. Perez-Grau, F. Caballero, L. Merino, A. Viguria // IEEE/RSJ Intern. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS), Vancouver, Canada, 24–28 Sept. 2017. IEEE, 2017. P. 3495–3502. doi: 10.1109/IROS.2017.8206191

21. The interrogation footprint of RFID-UAV: electromagnetic modelling and experimentations / G. Casati, M. Longhi, D. Latini, F. Carbone, S. Amendola, F. Frate, G. Schiavon, G. Marrocco // IEEE J. of Radio Frequency Identification. 2017. Vol. 1, iss. 2. P. 155–162. doi: 10.1109/JRFID.2017.2765619
22. Alajami A., Moreno G., Pous R. Design of a UAV for Autonomous RFID-Based Dynamic Inventories Using Stigmergy for Mapless Indoor Environments // Drones. 2022. Vol. 6, iss. 8. P. 208. doi: 10.3390/drones6080208
23. Wi-Fi Positioning: System Considerations and Device Calibration / T. Vaupel, J. Seitz, F. Kiefer, S. Haimmerl, J. Thielecke // Intern. Conf. on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), Zurich, Switzerland, 15–17 Sept. 2010. IEEE, 2010. P. 1–7. doi: 10.1109/IPIN.2010.5646207
24. Indoor Localization of Unmanned Aerial Vehicles Based on RSSI / B. R. Stojkoska, J. Palikrushev, K. Trivodaliev, S. Kalajdziski // 17th Intern. Conf. on Smart Technologies. IEEE EUROCON, Ohrid, Macedonia, 06–08 July 2017. IEEE, 2017. P. 120–125. doi: 10.1109/EUROCON.2017.8011089
25. A UAV Patrol System Based on Bluetooth Localization / M. Zhou, J. Lin, S. Liang, W. Du, L. Cheng // 2nd Asia-Pacific Conf. on Intelligent Robot Systems, Wuhan, China, 16–18 June 2017. IEEE, 2017. P. 205–209. doi: 10.1109/ACIRS.2017.7986094
26. Unmanned Quadcopter Control Using a Motion Capture System / L. L. Gomes, L. Leal, T. R. Oliveira, J. P. V. S. Cunha, T. C. Revoredo // IEEE Latin America Transactions. 2016. Vol. 14, iss. 8. P. 3606–3613. doi: 10.1109/TLA.2016.7786340
27. Vision-Controlled Micro Flying Robots / D. Scaramuzza, M. C. Achtelik, L. Doitsidis et al. // IEEE Robotics & Automation Magazine. 2014. Vol. 21, iss. 3. P. 26–40. doi: 10.1109/MRA.2014.2322295
28. Ghassemlooy Z., Popoola W., Rajbhandari S. Optical Wireless Communications: System and Channel Modelling with MATLAB®. 2nd Ed. Boca Raton, 2019. 540 p. doi: 10.1201/9781315151724
29. LIDAR-inertial integration for UAV localization and mapping in complex environments / R. Opromolla, G. Fasano, G. Rufino, M. Grassi, A. Savvaris // Intern. Conf. on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), Arlington, USA, 07–10 June 2016. IEEE, 2016. P. 649–656. doi: 10.1109/ICUAS.2016.7502580
30. Ole R., Lars G. LiDAR from drones employed for mapping archaeology – potential, benefits and challenges // Archaeological Prospection. 2018. Vol. 25, iss. 4. P. 329–338. doi: 10.1002/arp.1712
31. LIDAR/MEMS IMU integrated navigation (SLAM) method for a small UAV in indoor environments / R. Li, J. Liu, L. Zhang, Y. Hang // DGON Inertial Sensors and Systems (ISS), Karlsruhe, Germany, 16–17 Sept. 2014. IEEE, 2014. P. 1–15. doi: 10.1109/InertialSensors.2014.7049479
32. DronOS: Aflexible open-source prototyping framework for interactive drone routines / M. Hoppe, M. Burger, A. Schmidt, T. Kosch // Intern. Conf. on Mobile and Ubiquitous Multimedia (MUM), 26 Nov. 2019. P. 1–7. doi: 10.1145/3365610.3365642
33. Greiff M., Robertsson A., Berntorp K. Performance bounds in positioning with the vive lighthouse system // IEEE Intern. Conf. on Information Fusion (FUSION), Ottawa, Canada, 02–05 July 2019. IEEE, 2019. P. 1–8. doi: 10.23919/FUSION43075.2019.9011242
34. Niehorster D. C., Li L., Lappe M. The accuracy and precision of position and orientation tracking in the HTC vive virtual reality system for scientific research // i-Perception. 2017. Vol. 8, iss. 3. doi: 10.1177/2041669517708205
35. Ikbali M. S., Ramadoss V., Zoppi M. Dynamic pose tracking performance evaluation of HTC vive virtual reality system // IEEE Access. 2021. Vol. 9. P. 3798–3815. doi: 10.1109/ACCESS.2020.3047698
36. Lighthouse Positioning System: Dataset, Accuracy, and Precision for UAV Research / A. Taffanel, B. Rousselot, J. Danielsson, K. McGuire, K. Richardsson, M. Eliasson, T. Antonsson, W. Hönig. URL: <https://arxiv.org/pdf/2104.11523> (дата обращения: 12.08.2024)
37. OptiTrack Motion Capture System. URL: <https://www.sdu.dk/en/forskning/sduuascenter/aboutsduuascenter/sduuastestcenter/motioncapturelab> (дата обращения: 10.04.2022)
38. OptiTrack for Robotics. URL: <https://optitrack.com/applications/robotics/> (дата обращения: 20.01.2024).

Информация об авторах

Боронахин Александр Михайлович – доктор технических наук (2013), профессор (2020), профессор кафедры лазерных измерительных и навигационных систем, декан факультета информационно-измерительных и биотехнических систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 120 научных публикаций. Сфера научных интересов: разработка интегрированных инерциальных технологий динамического мониторинга рельсового пути для обеспечения безопасности движения железнодорожного транспорта.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия
E-mail: AMBoronahin@etu.ru

Нгуен Куок Хань – магистр по направлению "Приборостроение" (2020), аспирант Государственного технического университета им. Ле Куй Дона (Ханой, Вьетнам). Автор трех научных публикаций. Сфера научных интересов: инерциальные системы навигации и ориентации.

Адрес: Государственный технический университет им. Ле Куй Дона, 236, Хоанг Куок Вьет, Ко Нхуэ, Бак Ты Лиэм, Ханой, Вьетнам
E-mail: nguyenuockhanh183@gmail.com

Нгуен Чонг Иен – кандидат технических наук по направлению "Электроника, фотоника, приборостроение и связь" (2023), сотрудник отдела "Система бортового управления" Академии наук и технологий (Ханой, Вьетнам). Автор 10 научных публикаций. Сфера научных интересов: инерциальные системы навигации и ориентации.

Адрес: Академия наук и технологий, 18, Хоанг Куок Вьет, Каузяй, Ханой, Вьетнам

E-mail: trongyen@lqdtu.edu.vn

<https://orcid.org/0000-0003-4330-8542>

References

1. Kanellakis C., Nikolakopoulos G. Survey on Computer Vision for UAVs: Current Developments and Trends. *J. of Intell Robot Syst.* 2017, vol. 87, pp. 141–168. doi: 10.1007/s10846-017-0483-z
2. Chao H., Gu Y., Napolitano M. A Survey of Optical Flow Techniques for UAV Navigation Applications. *Intern. Conf. on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, Atlanta, USA, 28–31 May 2013. IEEE, 2013, pp. 710–716. doi: 10.1109/ICUAS.2013.6564752
3. Yuntian L., Scanavino M., Capello E., Dabbene F., Guglieri G., Vilardi A. A Novel Distributed Architecture for UAV Indoor Navigation. *Transportation Research Procedia.* 2018, vol. 35, pp. 13–22. doi: 10.1016/j.trpro.2018.12.003
4. Pérez M. C., Gualda D., Vicente-Ranera J., Villadangos J. M., Ureña J. Review of UAV Positioning in Indoor Environments and New Proposal Based on US Measurements. *Intern. Conf. on Indoor Positioning and Indoor Navigation, Italy*, 10 March 2019. CEUR, Ljubljana, Slovenia, 2019, pp. 1–8.
5. Muhammad A. Comparative Study of Indoor Navigation Systems for Autonomous Flight. *Telecommunication Computing Electronics and Control.* 2018, vol. 16, no. 1, pp. 118–128. doi: 10.12928/telkomnika.v16i1.6814
6. Roth S., Black M. J. On the Spatial Statistics of Optical Flow. *Intern. J. of Computer Vision.* 2007, vol. 74, no. 1, pp. 33–50. doi: 10.1109/ICCV.2005.180
7. Black M. J., Anandan P. The Robust Estimation of Multiple Motions: Parametric and Piecewise-Smooth Flow Fields. *Computer Vision and Image Understanding.* 1996, vol. 63, no. 1, pp. 75–104. doi: 10.1006/cviu.1996.0006
8. Lucas B. D., Kanade T. An Iterative Image Registration Technique with an Application to Stereo Vision. *Proc. of Imaging Understanding Workshop.* 1981, pp. 121–130.
9. Horn B., Schunck B. Determining Optical Flow. *Artificial Intelligence.* 1981, vol. 17, pp. 185–203. doi: 10.1016/0004-3702(81)90024-2
10. Srinivasan M. V. An Image Interpolation Technique for the Computation of Optical Flow and Egomotion. *Biological Cybernetics.* 1994, vol. 71, pp. 401–415. doi: 10.1007/BF00198917
11. Kendoul F., Fantoni I., Nonami K. Optic Flow-Based Vision System for Autonomous 3d Localization and Control of Small Aerial Vehicles. *Robotics and Autonomous Systems.* 2009, vol. 57, no. 6, pp. 591–602. doi: 10.1016/j.robot.2009.02.001
12. Lowe D. G. Distinctive Image Features from Scale-Invariant Key-Points. *Intern. J. of Computer Vision.* 2004, vol. 2, no. 60, pp. 91–110. doi: 10.1023/B%3AVISI.0000029664.99615.94
13. Yu Z., Tingting W., Zhihao C., Yingxun W., Zhenxing Y. The Use of Optical Flow for UAV Motion Estimation in Indoor Environment. *IEEE Chinese Guidance, Navigation and Control Conf.*, Nanjing, 12–14 Aug. 2016. IEEE, 2016. P. 785–790. doi: 10.1109/CGNCC.2016.7828885
14. Fausto F., Ju-Hyeon H. Visual Inertial Navigation for a Small UAV Using Sparse and Dense Optical Flow. *Workshop on Research, Education and Development of Unmanned Aerial Systems (RED UAS)*, Cranfield, UK, 25–27 Nov. 2019. IEEE, 2019, pp. 206–212. doi: 10.1109/REDUAS47371.2019.8999672
15. Rudol P., Wzorek M., Conte G., Doherty P. Micro Unmanned Aerial Vehicle Visual Servoing for Cooperative Indoor Exploration. *Aerospace Conf., Sky, USA*, 01–08 March 2008. IEEE, 2008, pp. 1–10. doi: 10.1109/AERO.2008.4526558
16. Paredes J. A., Álvarez F. J., Aguilera T., Villadangos J. M. 3D Indoor Positioning of UAVs with Spread Spectrum Ultrasound and Time-of-Flight Cameras. *Sensors.* 2017, vol. 18, no. 1, p. 89. doi: 10.3390/s18010089
17. Gualda D., Ureña J., Pérez M. C., Posso H., Bachiller S., Nieto R. 3D Position Estimation of an UAV in Indoor Environments using an Ultrasonic Local Positioning System. *9th Intern. Conf. on Indoor Positioning and Indoor Navigation, Nantes, France*, 24–27 Sept. 2018. IFSTTAR, 2018, p. 212808.
18. Daly D., Melia T., Baldwin G. Concrete Embedded RFID for Way-Point Positioning. *Intern. Conf. on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, Zurich, Switzerland, 15–17 Sept. 2010. IEEE, 2010, pp. 1–10.
19. Tiemann J., Wietfeld C. Scalable and Precise Multi-UAV Indoor Navigation Using TDOA-Based UWB Localization. *Intern. Conf. on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, Sapporo, Japan, 18–21 Sept. 2017. IEEE, 2017, pp. 1–7. doi: 10.1109/IPIN.2017.8115937
20. Perez-Grau F. J., Caballero F., Merino L., Viguria A. Multi-Modal Mapping and Localization of Unmanned Aerial Robots Based on Ultra-Wideband and RGB-D Sensing. *IEEE/RSJ Intern. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Vancouver, Canada, 24–28 Sept. 2017. IEEE, 2017, pp. 3495–3502. doi: 10.1109/IROS.2017.8206191
21. Casati G., Longhi M., Latini D., Carbone F., Amendola S., Frate F., Schiavon G., Marrocco G. The Interrogation Footprint of RFID-UAV: Electromagnetic Modelling and Experimentations. *IEEE J. of Radio Frequency Identification.* 2017, vol. 1, iss. 2, pp. 155–

162. doi: 10.1109/JRFID.2017.2765619

22. Alajami A., Moreno G., Pous R. Design of a UAV for Autonomous RFID-Based Dynamic Inventories Using Stigmergy for Mapless Indoor Environments. *Drones*. 2022, vol. 6, iss. 8, p. 208. doi: 10.3390/drones6080208

23. Vaupel T., Seitz J., Kiefer F., Haimerl S., Thielecke J. Wi-Fi Positioning: System Considerations and Device Calibration. *Intern. Conf. on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, Zurich, Switzerland, 15–17 Sept. 2010. IEEE, 2010, pp. 1–7. doi: 10.1109/IPIN.2010.5646207

24. Stojkoska B. R., Palikrushev J., Trivodaliev K., Kalajdziski S. Indoor Localization of Unmanned Aerial Vehicles Based on RSSI. 17th Intern. Conf. on Smart Technologies. IEEE EUROCON, Ohrid, Macedonia, 06–08 July 2017. IEEE, 2017, pp. 120–125. doi: 10.1109/EUROCON.2017.8011089

25. Zhou M., Lin J., Liang S., Du W., Cheng L. A UAV Patrol System Based on Bluetooth Localization. 2nd Asia-Pacific Conf. on Intelligent Robot Systems, Wuhan, China, 16–18 June 2017. IEEE, 2017, pp. 205–209. doi: 10.1109/ACIRS.2017.7986094

26. Gomes L. L., Leal L., Oliveira T. R., Cunha J. P. V. S., Revoredo T. C. Unmanned Quadcopter Control Using a Motion Capture System. *IEEE Latin America Transactions*. 2016, vol. 14, iss. 8, pp. 3606–3613. doi: 10.1109/TLA.2016.7786340

27. Scaramuzza D., Achtelek M. C., Doitsidis L. et al. Vision-Controlled Micro Flying Robots. *IEEE Robotics & Automation Magazine*. 2014, vol. 21, iss. 3, pp. 26–40. doi: 10.1109/MRA.2014.2322295

28. Ghassemlooy Z., Popoola W., Rajbhandari S. Optical Wireless Communications: System and Channel Modelling with MATLAB®. 2nd Ed. Boca Raton, 2019, 540 p. doi: 10.1201/9781315151724

29. Opromolla R., Fasano G., Rufino G., Grassi M., Savvaris A. LIDAR-Inertial Integration for UAV Localization and Mapping in Complex Environments. *Intern. Conf. on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, Arlington, USA, 07–10 June 2016. IEEE, 2016, pp. 649–656. doi: 10.1109/ICUAS.2016.7502580

30. Ole R., Lars G. LiDAR from Drones Employed for Mapping Archaeology – Potential, Benefits and Challenges. *Archaeological Prospection*. 2018, vol. 25, iss. 4, pp. 329–338. doi: 10.1002/arp.1712

31. Li R., Liu J., Zhang L., Hang Y. LI-DAR/MEMS IMU Integrated Navigation (SLAM) Method for a Small UAV in Indoor Environments. *DGON Inertial Sensors and Systems (ISS)*, Karlsruhe, Germany, 16–17 Sept. 2014. IEEE, 2014, pp. 1–15. doi: 10.1109/InertialSensors.2014.7049479

32. Hoppe M., Burger M., Schmidt A., Kosch T. DronOS: Aflexible Open-Source Prototyping Framework for Interactive Drone Routines. *Intern. Conf. on Mobile and Ubiquitous Multimedia (MUM)*, 26 Nov. 2019, pp. 1–7. doi: 10.1145/3365610.3365642

33. Greiff M., Robertsson A., Berntorp K. Performance Bounds in Positioning with the Vive Lighthouse System. *IEEE Intern. Conf. on Information Fusion (FUSION)*, Ottawa, Canada, 02–05 July 2019. IEEE, 2019, pp. 1–8. doi: 10.23919/FUSION43075.2019.9011242

34. Niehorster D. C., Li L., Lappe M. The Accuracy and Precision of Position and Orientation Tracking in the HTC Vive Virtual Reality System for Scientific Research. *I-Perception*. 2017, vol. 8, iss. 3. doi: 10.1177/2041669517708205

35. Ikbāl M. S., Ramadoss V., Zoppi M. Dynamic Pose Tracking Performance Evaluation of HTC Vive Virtual Reality System. *IEEE Access*. 2021, vol. 9, pp. 3798–3815. doi: 10.1109/ACCESS.2020.3047698

36. Taffanel A., Rousselot B., Danielsson J., McGuire K., Richardsson K., Eliasson M., Antonsson T., Hönig W. Lighthouse Positioning System: Dataset, Accuracy, and Precision for UAV Research. Available at: <https://arxiv.org/pdf/2104.11523> (accessed: 12.08.2024)

37. OptiTrack Motion Capture System. Available at: <https://www.sdu.dk/en/forskning/sduuascenter/aboutsduuascenter/sduuastestcenter/motioncapturelab> (accessed: 10.04.2022)

38. OptiTrack for Robotics. Available at: <https://optitrack.com/applications/robotics/> (accessed: 20.01.2024).

Information about the authors

Alexander M. Boronakhin – Dr Sci. (Eng.) (2013), Professor (2020), Professor of the Department of Laser Measuring and Navigation Systems, Dean of the Faculty of Information Measuring and Biotechnical Systems of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 120 scientific publications. Area of expertise: development of integrated inertial technologies for dynamic monitoring of the rail track to ensure the safety of railway traffic. Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia
E-mail: AMBoronahin@etu.ru

Nguyen Quoc Khanh – Master of Science in Instrumentation Engineering (2020), PhD student at Le Quy Don Technical University (Hanoi, Vietnam). The author of three scientific publications. Area of expertise: inertial navigation and orientation systems. Address: Le Quy Don Technical University, 236, Hoang Quoc Viet, Co Nhue, Bac Tu Liem, Hanoi, Vietnam
E-mail: nguyenvuocquoc183@gmail.com

Nguyen Trong Yen – PhD in Electronics, Photonics, Instrumentation and Communications (2023), member of the On-Board Control System Department, Academy of Science and Technology (Hanoi, Vietnam). The author of 10 scientific publications. Area of expertise: inertial navigation and orientation systems. Address: Vietnam Academy of Science and Technology, 18, Hoang Quoc Viet, Cau Giay, Hanoi, Vietnam
E-mail: trongyen@lqdtu.edu.vn