

PATH PLANNING ALGORITHM FOR UAV BY GEOTAGS

O. S. Ostapovich, M. R. Vishnevskiy

Innopolis University
Innopolis, Tatarstan, Russian Federation

Corresponding author E-mail: o.ostapovich@innopolis.university

Received 17.10.2023

Submitted 22.11.2023

Summary

The article presents the results of creating a system for processing a set of points located on the map. The created system of algorithms will speed up the creation of a flight mission and apply drones to different types of tasks: from monitoring the state of fields to photographing various objects. The results obtained were applied in a real task.

Abstract

Introduction. Modern trends in automation and digitalization involve the use of drones. Scanning objects or territories allows you to monitor their condition. In this study, attention is paid to the analysis of power transmission lines, which is an important task for maintaining the stable operation of agricultural enterprises. Various algorithms are used for high-quality performance of tasks by unmanned aerial vehicles. **Object.** The object of research is the automation of the construction of a flight mission for UAVs. **Materials and methods.** The data received from the customer on the location of power lines were clustered by the Density-based spatial clustering of applications with noise (DBScan) algorithm. For each cluster, a graph with a minimum length of faces was created using the minimum spanning tree (MST) algorithm. The route was built using the depth-first search algorithm (DFS). **Results and conclusions.** The developed system of algorithms allows to automate the process of creating a flight mission and has sufficient versatility for use in various tasks of scanning objects and territories. The described results were presented to UAV testers and pilots, who appreciated the user-friendliness of the work and gave positive feedback.

Key words: UAVs, drones, geotags, DBScan, MST, DFS.

Citation. Ostapovich O. S., Vishnevskiy M. R. Path planning algorithm for UAV by geotags. *Proc. of the Lower Volga Agro-University Comp.* 2023. 4(72). 606-614 (in Russian). DOI: 10.32786/2071-9485-2023-04-61.

Author's contribution. All authors of this research paper have directly participated in the planning, execution, or analysis of this study. All authors of this paper have read and approved the final version submitted.

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

УДК 528.44+62-503.5:631.9

АЛГОРИТМ ПЛАНИРОВАНИЯ ПУТИ ДЛЯ БПЛА ПО ГЕОМЕТКАМ

О. С. Остапович, инженер

М. Р. Вишневский, инженер

АНО ВО «Университет Иннополис»
г. Иннополис, Татарстан, Российская Федерация

Актуальность. Благодаря современному развитию автоматизации и цифровизации беспилотные летательные аппараты (БПЛА, беспилотники) начинают применяться все более широко. Одной из важных областей использования БПЛА является сканирование объектов или территорий, что позволяет следить за их состоянием. Особенно актуальны такие задачи в сельской местности, где регулярный мониторинг объектов инфраструктуры вручную или наземными средствами затруднителен из-за значительных расстояний между ними. В исследовании уделяется внимание анализу линий электропередач, что является важной задачей для поддержания стабильной работы сельскохозяйственных предприятий. **Объект.** Объектом исследова-

ния является алгоритм управления БПЛА для автоматизации построения полётной миссии. **Материалы и методы.** Исследование проведено на базе информации о расположении линий электропередач, полученных от заказчика. Данные о координатах линий электропередач были кластеризованы алгоритмом Density-based spatial clustering of applications with noise (DBScan). По каждому кластеру был создан граф с минимальной длиной граней при помощи алгоритма минимального связующего дерева (MST). Маршрут был построен при помощи алгоритма поиска в глубину (DFS). **Результаты и выводы.** Разработанная система алгоритмов позволяет автоматизировать процесс создания полётной миссии и обладает достаточной универсальностью для использования в различных задачах сканирования объектов и территорий. Описанные результаты были представлены испытателям и пилотам БПЛА, которые оценили удобство работы и дали положительный отзыв.

Ключевые слова: БПЛА, дроны, геометки, DBScan, MST, DFS.

Цитирование. Остапович О. С., Вишневский М. Р. Алгоритм планирования пути для БПЛА по геометкам. *Известия НВ АУК*. 2023. 4(72). 606-614. DOI: 10.32786/2071-9485-2023-04-61.

Авторский вклад. Все авторы настоящего исследования принимали непосредственное участие в планировании, выполнении или анализе данного исследования. Все авторы настоящей статьи ознакомились с представленным окончательным вариантом и одобрили его.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение. В последнее время беспилотные летательные аппараты все чаще используются для мониторинга и сканирования местности [1]. Беспилотные летательные аппараты способны передвигаться автономно и помогать в выполнении тех задач, которые ранее осуществлялись людьми [2].

Дроны обычно используются для картографирования или сканирования. Очень часто дроны сканируют поля, например, в сельском хозяйстве, где используются различные типы дронов [3], различные датчики [4] или алгоритмы [5]. Чтобы сфотографировать местность с квадрокоптера или самолета вертикального взлета и посадки (VTOL), нужны координаты местности, по которой будет пролетать самолет. В рамках проведенного исследования наборы координат таких точек были предоставлены заказчиком. В среднем один набор координат содержит около 1000 значений долготы и широты. Эти точки могут быть отображены на карте, как показано на рисунке 1.

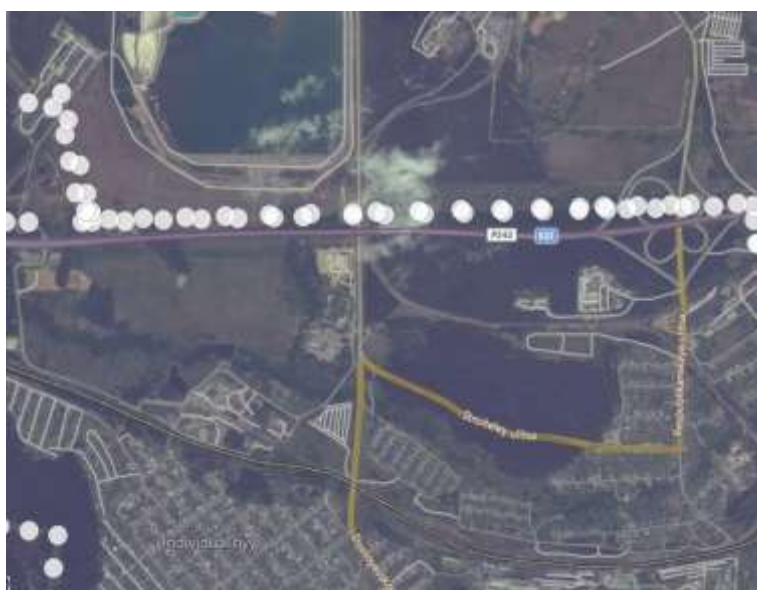


Рисунок 1 – Точки, расположенные на фрагменте карты
Figure 1 – Points located on a map fragment

Точки, представленные на этом рисунке, являются местами, где расположены столбы, удерживающие линии электропередачи. Технологическая задача заключается в отслеживании состояния этих столбов. БПЛА требуется пролететь над каждым столбом и сфотографировать его. В результате из большого количества изображений собирается единый ортофотоплан – единое изображение. Для решения задачи необходимо создать полётное задание – сгенерировать траекторию полёта БПЛА. В контексте задачи траектория – это последовательность координат точек в формате, подходящем для запуска в программе управления полётом. Предполагается, что БПЛА перемещается от точки к точке по кратчайшему пути с поправкой на динамические возможности аппарата.

Стандартные программные средства управления квадрокоптером предполагают установку точек траектории вручную. Но, с учетом большого объема данных, ручное размещение этих точек в последовательности требует слишком больших усилий и времени. Поэтому актуальна разработка алгоритма, позволяющего построить оптимальную траекторию, адаптированную для рассматриваемого типа БПЛА. В этой статье обсуждается создание и реализация этого алгоритма.

Материалы и методы. С точки зрения математики задача сводится к поиску оптимального маршрута. Критерием оптимизации при преобразовании набор точек в последовательность является минимизация суммарной длины маршрута. Поставленная задача является NP-полной, то есть оптимальное решение может быть достигнуто только полным перебором, что невозможно для исходного количества точек, особенно с учётом того, что каждая точка независима от других. Таким образом, на практике приходится решать задачу приближённо. Известно несколько алгоритмов для нахождения приближительного оптимального пути. Первоначально данные группируются с помощью DBScan, поскольку полётов может быть несколько. Затем для каждого кластера будет найдено MST, чтобы определить минимальный граф, который затем передаётся DFS на заключительном этапе.

А. DBscan. После нанесения всех точек на график стало заметно, что они расположены на таком расстоянии друг от друга, которое используемые беспилотники не смогли бы покрыть за один полет, поэтому в любом случае набор точек должен быть разделен на несколько полетных заданий. Для этого используется алгоритм кластеризации. В рассматриваемом случае это DBScan, который хорошо зарекомендовал себя в задачах такого типа. Этот алгоритм способен объединять множество близко расположенных точек в единый кластер. Этот алгоритм уже использовался различными авторами для решения задач кластеризации путей [6, 7]. Все кластеры, идентифицированные с помощью DBScan в заданном наборе данных, можно увидеть на рисунке 2. Оси указывают координаты широты и долготы. Вынесенный фрагмент рисунка показывает, что кластер представляет собой набор близко расположенных точек. Каждый кластер представляет собой сегмент общей сети линий электропередачи, который необходимо сфотографировать. После кластеризации данных получается набор точек для каждого полетного задания.

Количество кластеров изначально не известно, но приблизительно известно среднее расстояние между двумя соседними точками. В среднем это расстояние составляет 25 метров для столбов в пределах одного кластера, в то время как расстояние между кластерами составляет от 6 до 100 км. Летать на такие расстояния трудно и опасно. Чтобы избежать этого, используемый алгоритм разделит все данные на кластеры. Далее каждый кластер должен рассматриваться как отдельное полетное задание обработки данных.

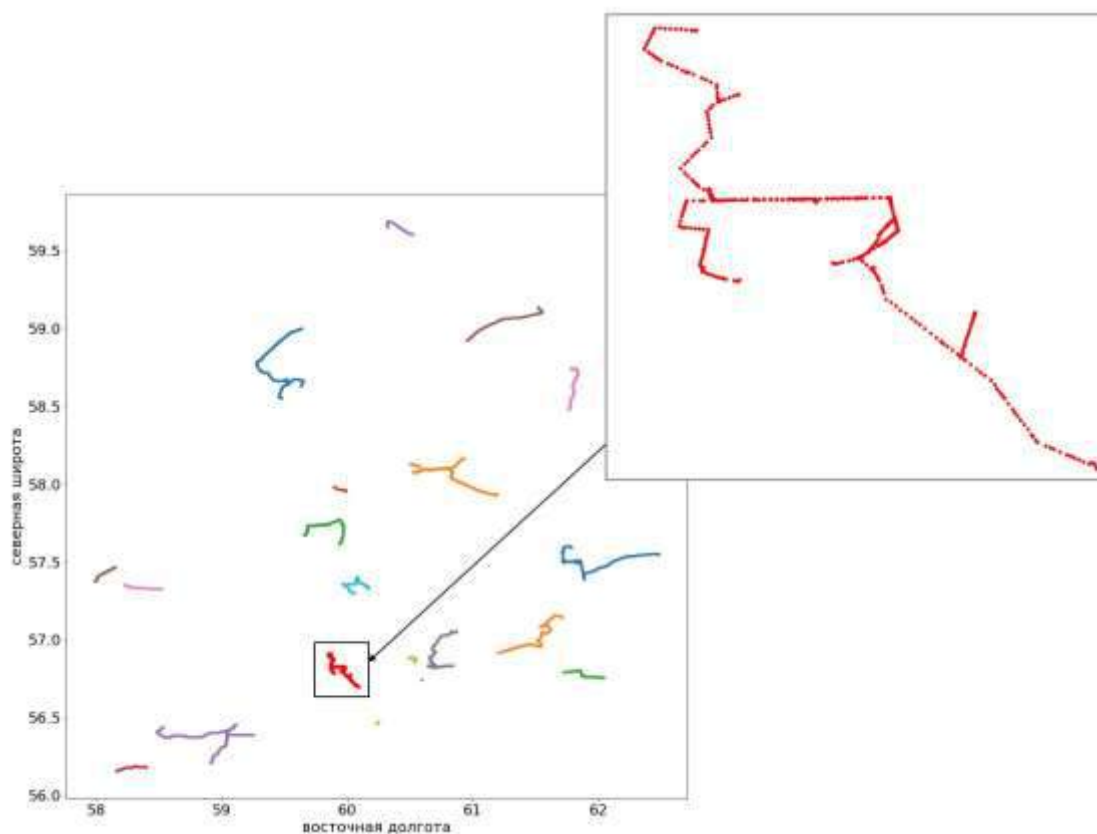


Рисунок 2 – Результат кластеризации с использованием алгоритма DBScan
Figure 2 – Clustering result using the DBScan algorithm

В. MST. Следующим допущением является тот факт, что анализируются столбы, соединенные проводами. То есть, как правило, сеть соединенных столбов будет представлять собой дерево, или, другими словами, граф без зацикливаний. Чтобы найти кратчайший маршрут, авторы, занимающиеся проблемами планирования маршрута, выбирают соответствующий алгоритм. В работах, описывающих обширные пространства, часто используется алгоритм Rapidly exploring random tree (RRT) [7, 8, 9]. Этот алгоритм подходит для поставленной задачи, однако, учитывая, что эти точки на карте расположены на прямой и ответвления появляются редко, что видно, например, на рисунке 1, было решено использовать менее популярный, но более подходящий алгоритм. MST – это алгоритм для соединения всех точек в единую цепочку и минимизации расстояния между ними. Известны применения алгоритма для соединения большого количества точек в единую линию при выполнении задач по тушению пожаров [10] и для других опасных природных явлений [11].

Чтобы построить траекторию, необходимо расположить все точки в последовательности, используя любой из методов построения MST, например алгоритм Прима или алгоритм Крускала [12]. Эти методы работают с матрицей смежности. Матрица представляет собой пустой набор данных, в которую добавляются данные о расстояниях между точками, которые представляют собой ребра графа в случае данной задачи. Таким образом, создаётся и заполняется матрица смежности для каждой точки, используя фактическое расстояние между точками в качестве весовой функции. Расстояния берутся из данных геобиблиотеки. На рисунке 3 можно увидеть результаты применения алгоритма MST.

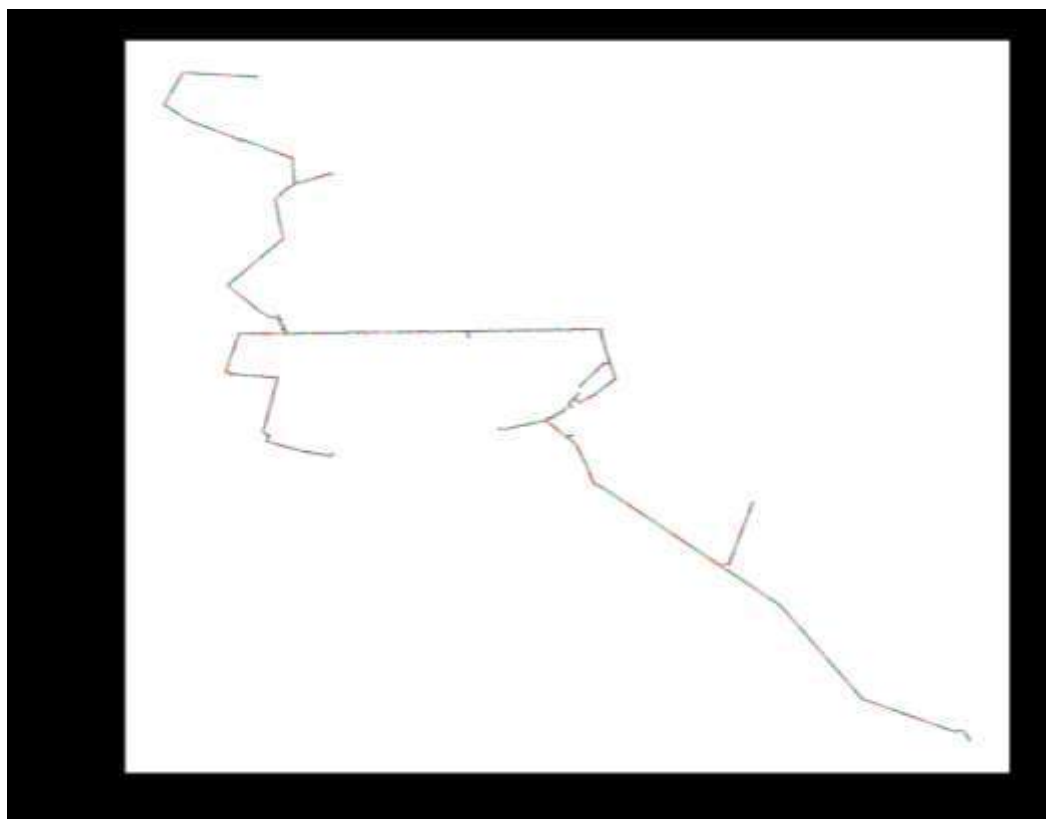


Рисунок 3 – Результат применения MST
Figure 3 – Result of MST application

В результате набор точек соединён в виде графа без петель. На рисунке 3 и далее работа алгоритма иллюстрируется только одним кластером из многих – кластером, выделенным красным цветом на рисунке 2.

Полученные данные наглядно демонстрируют, что исходные наборы точек действительно представляют дерево и в результате задача сводится к тому, чтобы обойти дерево по наиболее оптимальному пути. Важно учитывать, что на обратном пути движение по графу не требуется: имеется двумерное пространство с точками, что позволяет возвращаться из веток к их началу, не посещая те точки, в которых уже были, а наоборот, пролетая напрямую к необходимой точке.

С. DFS. Для построения итогового пути рассматривается дерево как диаметр и набор меньших деревьев, исходящих из этого диаметра. Это позволяет решать задачу рекурсивно, изначально выбирая начальную и конечную точки основного маршрута. После основного пути нужно обратить внимание на более мелкие участки. Чтобы завершить процесс создания полётного задания, используется алгоритм DFS. Этот алгоритм позволяет найти крайние точки и тем самым выбрать основной путь для кластера [13]. Этот алгоритм часто используется в задачах планирования траектории [13].

Сначала берется произвольная точка графика. Затем, проходя по краям графика, находим точки наиболее удалённые от исходной с разных сторон [14]. На рисунке 4.а показаны результаты выделения основного пути.

На том же рисунке видно, что после нахождения основного пути остались ответвления. Чтобы добавить их к полётному заданию, осуществляется проход по основному маршруту от одного конца до другого. Когда обнаруживается, что, согласно графику, путь разветвляется, каждая из ветвей проходится рекурсивно.

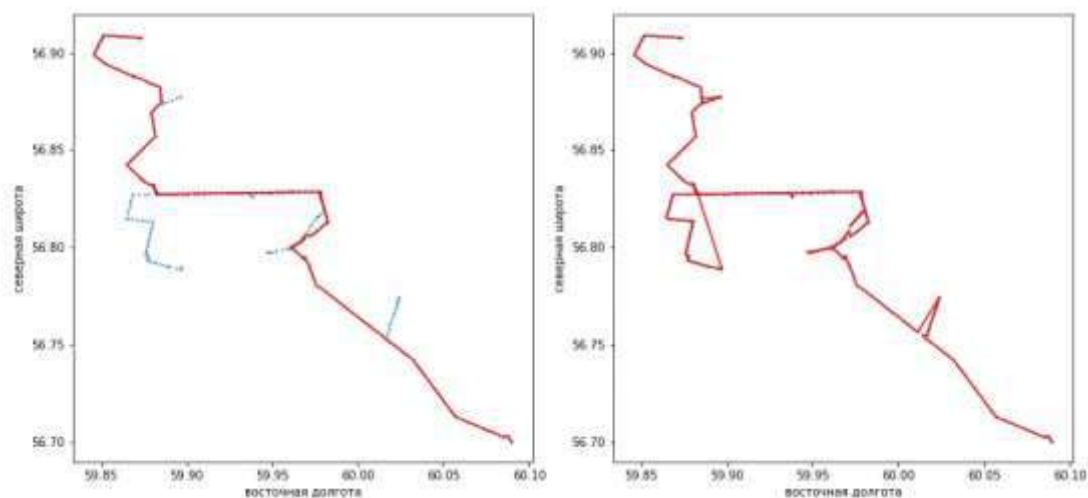


Рисунок 4 – Путь после обработки: а) основной путь, выделенный с использованием алгоритма DFS, б) конечный путь

Figure 4 – The path after processing: a) the main path selected using the DFS algorithm, b) the final path

Чтобы завершить создание итогового пути, осталось добавить разветвления. Для этого осуществляется проход по каждой ветви от её начала, с использованием алгоритма DFS и получая, таким образом, желаемый путь [15]. Когда проход по ветви закончен, происходит возврат к началу и продолжается движение по основному пути. На рисунке 4.6 показано, что после описанного процесса полетное задание дополняется ответвлениями.

Результаты и обсуждение. Исходные данные содержали около тысячи значений широты и долготы. Используя DBScan, эти точки собрали в кластеры. Алгоритм MST позволил создать график с наименьшими возможными краями. Окончательный путь был собран с использованием алгоритма DFS.



Рисунок 5 – Полетное задание, нанесенное на карту
Figure 5 – Flight task mapped

Результатом обработки представленных данных является файл с расширением .kml. Здесь содержится информация о точках, расположенных в последовательности для выполнения полетного задания. Этот файл позволяет импортировать данные в QGroundControl или любую другую программу для работы с полетными заданиями. На рисунке 5 показана последовательность точек, расположенных на карте.

На текущем этапе алгоритм генерирует траекторию для квадрокоптера, то есть не учитывает радиус поворота и другие особенности различных беспилотных летательных аппаратов. По этой причине использование беспилотников типа VTOL возможно только после корректировки полетного задания. В рамках проведенного исследования пилотам VTOL пришлось корректировать задание вручную, создавая петли, чтобы показать самолету путь для изменения траектории. В будущем планируются различные улучшения, включая возможность учитывать желаемую точку взлета и посадки, радиус разворота, запас хода и другие.

Заключение. Квадрокоптеры, VTOL и другие беспилотные летательные аппараты все чаще используются для наблюдения за местностью. Мониторинг полей, сельскохозяйственных угодий, лесов и инфраструктуры является типичной задачей для беспилотников. Способность беспилотных летательных аппаратов автономно выполнять задачи, а также добираться в труднодоступные места способствует замене человеческого труда. Однако для применения БПЛА в больших масштабах требуется разработка программных средств, автоматизирующих планирование работы аппаратов.

В представленном исследовании была выполнена обработка большого массива точек на карте, не связанных между собой. Были разработаны алгоритмы и реализовано программное обеспечение для автоматической генерации полетного задания с последовательным набором координат на базе методов DBScan для кластеризации, MST для поиска графа с минимальными ребрами и DFS для построения пути. Разработанное программное решение позволяет сохранять данные в файлы формата kml, предназначенного для загрузки в систему управления БПЛА.

Результаты работы были апробированы в центре беспилотных технологий ЦНТИ «Технологии компонентов робототехники и мехатроники» и получили высокую оценку пилотов БПЛА. Полученные выводы и рекомендации планируется использовать в дальнейшей работе для расширения функциональности описанного метода.

Conclusions. Quadcopters, VTOL, and other drones are increasingly being used to monitor the terrain. The ability of UAVs to perform tasks autonomously, as well as to get to hard-to-reach places contributes to automation and replacement of human labor. Our team got the task of processing a large, unrelated array of points on the map. These points represent data on the location of the transmission line support.

To perform the scan, you need to create a flight mission a sequential set of coordinates. Such a set will allow you to create the trajectory of the drone. We placed it in a kml file. The unorganized data set was processed by us using DBScan for clustering, MST for finding a graph with minimal edges, and DFS for building a path.

The results of the work were tested in the center of unmanned technologies CNTI "Technologies of robotics and mechatronics components" and were highly appreciated by UAV pilots. The obtained conclusions and recommendations are planned to be used in further work to expand the functionality of the described method.

Библиографический список

1. Куличкова Е. М. Беспилотные летательные аппараты (БПЛА): проблемы и направления использования в сельском хозяйстве. Материалы V Международной научно-практической конференции «Экономико-математические методы анализа деятельности предприятий АПК». 2021. С. 140.
2. Захарцев С. И., Литвинов Н. Д., Сальников В. П., Чернявский В. С. Искусственный интеллект в механизме развития человеческой цивилизации. Юридическая наука: история и современность. 2021. № 4. С. 47-73.

3. Velusamy P., Rajendran S., Mahendran R. K., Naseer S., Shafiq M., Choi J. G. Unmanned Aerial Vehicles (UAV) in precision agriculture: Applications and challenges. *Energies*. 2021. V. 15. P. 217.
4. Lin Yi-Chun, Habib A. Quality control and crop characterization framework for multi-temporal UAV LiDAR data over mechanized agricultural fields. *Remote Sensing of Environment*. 2021. V. 256. P. 112299.
5. Fareed N., Flores J. P., Das A. K. Analysis of UAS-LiDAR Ground Points Classification in Agricultural Fields Using Traditional Algorithms and PointCNN. *Remote Sensing*. 2023. V. 15.2. P. 483.
6. Ding Y., Cao R., Liang S., Qi F., Yang Q., Yan W. Density-based optimal UAV path planning for photovoltaic farm inspection in complex topography. 2020 Chinese Control and Decision Conference (CCDC). IEEE. 2020. Pp. 3931–3936.
7. Gao M. J., Yan T., Li Q. Ch., Fu W. X., Feng Z. F. Path Planning of Improved RRT* Based on DBSCAN Algorithm. *International Conference on Autonomous Unmanned Systems*. Springer. 2022. Pp. 1973–1984.
8. Guo Y., Liu X., Liu X., Yang Y., Zhang W. FC-RRT*: An improved path planning algorithm for UAV in 3D complex environment. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2022. V. 11.2. P. 112.
9. Dhulkefi E. J., Durdu A. et al. Path planning algorithms for unmanned aerial vehicles. *Int. J. Trend Sci. Res. Dev*. 2019. V. 3.4. Pp. 359–362.
10. Kong J. et al. Research on UAV scheduling problem in fire. *Geoscience*. 2021. V. 4. Pp. 21–24.
11. Feng L., and Katupitiya J. UAV-based persistent full area coverage with dynamic priorities. *Robotics and Autonomous Systems*. 2022. V. 157. P. 104244.
12. Jarvis J. P., Whited D. E. Computational experience with minimum spanning tree algorithms. *Operations Research Letters*. 1983. V. 2.1. Pp. 36–41.
13. Debnath S. K., Omar R., Nor Badariyah Abdu Latip, Shelyna Sh., Nadira E., Melor Ck., Chakraborty T. K., Natarajan E. A review on graph search algorithms for optimal energy efficient path planning for an unmanned air vehicle. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*. 2019. V. 15.2. Pp. 743–749.
14. Tang G., Tang C., Zhou H., Claramunt Ch., Men S. R-DFS: A coverage path planning approach based on region optimal decomposition. *Remote Sensing*. 2021. V. 13.8. P. 1525.
15. Baswana S., Goel A., Khan Sh. Incremental DFS algorithms: a theoretical and experimental study. *Proceedings of the Twenty-Ninth Annual ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms*. SIAM. 2018. Pp. 53–72.

References

1. Kulichkova E. M. Unmanned aerial vehicles (BpLA): problems and directions of use in agriculture. *Materials of the V International Scientific and Practical Conference "Economic and Mathematical Methods of Analyzing the Activities of Agro-Industrial Complex Enterprises."* 2021. P. 140.
2. Zakhartsev S. I., Litvinov N. D., Salnikov V. P., Chernyavsky V. S. Artificial intelligence in the mechanism of development of human civilization. *Legal Science: History and Modernity*. 2021. № 4. Pp. 47-73.
3. Velusamy P., Rajendran S., Mahendran R. K., Naseer S., Shafiq M., Choi J. G. Unmanned Aerial Vehicles (UAV) in precision agriculture: Applications and challenges. *Energies*. 2021. V. 15. P. 217.
4. Lin Yi-Chun, Habib A. Quality control and crop characterization framework for multi-temporal UAV LiDAR data over mechanized agricultural fields. *Remote Sensing of Environment*. 2021. V. 256. P. 112299.
5. Fareed N., Flores J. P., Das A. K. Analysis of UAS-LiDAR Ground Points Classification in Agricultural Fields Using Traditional Algorithms and PointCNN. *Remote Sensing*. 2023. V. 15.2. P. 483.
6. Ding Y., Cao R., Liang S., Qi F., Yang Q., Yan W. Density-based optimal UAV path planning for photovoltaic farm inspection in complex topography. 2020 Chinese Control And Decision Conference (CCDC). IEEE. 2020. Pp. 3931–3936.

7. Gao M. J., Yan T., Li Q. Ch., Fu W. X., Feng Z. F. Path Planning of Improved RRT* Based on DBSCAN Algorithm. International Conference on Autonomous Unmanned Systems. Springer. 2022. Pp. 1973–1984.
8. Guo Y., Liu X., Liu X., Yang Y., Zhang W. FC-RRT*: An improved path planning algorithm for UAV in 3D complex environment. ISPRS International Journal of Geo-Information. 2022. V. 11.2. P. 112.
9. Dhulkefl E. J., Durdu A. et al. Path planning algorithms for unmanned aerial vehicles. Int. J. Trend Sci. Res. Dev. 2019. V. 3.4. Pp. 359–362.
10. Kong J. et al. Research on UAV scheduling problem in fire. Geoscience. 2021. V. 4. Pp. 21–24.
11. Feng L., and Katupitiya J. UAV-based persistent full area coverage with dynamic priorities. Robotics and Autonomous Systems. 2022. V. 157. P. 104244.
12. Jarvis J. P., Whited D. E. Computational experience with minimum spanning tree algorithms. Operations Research Letters. 1983. V. 2.1. Pp. 36–41.
13. Debnath S. K., Omar R., Nor Badariyah Abdu Latip, Shelyna Sh., Nadira E., Melor Ck., Chakraborty T. K., Natarajan E. A review on graph search algorithms for optimal energy efficient path planning for an unmanned air vehicle. Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science. 2019. V. 15.2. Pp. 743–749.
14. Tang G., Tang C., Zhou H., Claramunt Ch., Men S. R-DFS: A coverage path planning approach based on region optimal decomposition. Remote Sensing. 2021. V. 13.8. P. 1525.
15. Baswana S., Goel A., Khan Sh. Incremental DFS algorithms: a theoretical and experimental study. Proceedings of the Twenty-Ninth Annual ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms. SIAM. 2018. Pp. 53–72.

Информация об авторах

Остапович Олег Сергеевич, инженер, Университет Иннополис (Российская Федерация, 420500, Татарстан, Верхнеуслонский район, г. Иннополис, ул. Университетская, д. 1), e-mail: o.ostapovich@innopolis.university.

Вишневский Марк Романович, инженер, Университет Иннополис (Российская Федерация, 420500, Татарстан, Верхнеуслонский район, г. Иннополис, ул. Университетская, д. 1), e-mail: m.vishnevskiy@innopolis.university

Author's Information

Ostapovich Oleg Sergeevich, engineer, Innopolis University (Russian Federation, 420500, Tatarstan, Verkhneuslonsky district, Innopolis, Universitetskaya St., 1), e-mail: o.ostapovich @ innopolis.university

Vishnevsky Mark Romanovich, engineer, Innopolis University (Russian Federation, 420500, Tatarstan, Verkhneuslonsky district, Innopolis, Universitetskaya St., 1), e-mail: m.vishnevsky @ innopolis.university