

Мокронос Кирилл Константинович, аспирант,

Амурский государственный университет

e-mail: kirilof110@gmail.com

Еремина Виктория Владимировна, кандидат физико-математических наук,

доцент кафедры информационных и управляющих систем,

Амурский государственный университет

СОВРЕМЕННЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ И ПРИМЕНЕНИЕ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ: ОБЗОР И СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АЛГОРИТМОВ УКЛОНЕНИЯ ОТ ПРЕПЯТСТВИЙ

Аннотация: В первой части статьи рассматриваются возможности и применение беспилотников в наше время. Обозреваются различные варианты модификаций алгоритма VFH и некоторых других алгоритмов уклонения от препятствий для БПЛА. Приводится оценка эффективности алгоритмов и способы модернизации алгоритма VFH.

Ключевые слова: квадрокоптеры, автономный полет, дроны, алгоритм, гистограмма, облако точек.

Annotation: The article discusses the possibilities and use of drones in our time. Various modifications of the VFH algorithm and some other obstacle avoidance algorithms for UAVs are reviewed. An estimation of the effectiveness of the algorithms and ways to upgrade the VFH algorithm are given.

Keywords: quadcopters, autonomous flight, drones, algorithm, histogram, point cloud.

Введение

Беспилотные летательные аппараты используются для решения самых

разных практических задач. Например, они могут следить за состоянием сельскохозяйственных полей, осуществляя регулярную аэрофотосъемку или распыляя удобрения на заданных участках местности.

В свою очередь, для автономного управления дрону необходимо как минимум знать с высокой точностью свои координаты в пространстве. На открытом пространстве можно использовать *GPS* – точность достигается в несколько метров. Обычного *GPS* хватает для создания маршрута полета на открытой местности. Но для детального исследования, например, строящихся объектов или полетов в дикой природе, применяются узкоспециализированные алгоритмы.

Обзор существующих алгоритмов уклонения от препятствий

Наиболее распространенной стратегией для уклонения от препятствий в автономном режиме является *VFH* (гистограмма векторного поля), введенная Боренштейном и Кореном [1]. В данной стратегии используется сонар для создания двумерной сетки окружающей среды, которая затем отображается на одномерной полярной гистограмме. Из этой гистограммы можно извлечь свободные направления движения. Последующее усовершенствование Ульриха и Боренштейна под названием *VFH+* учитывает максимальный радиус поворота робота и пределы безопасности (рис. 1).

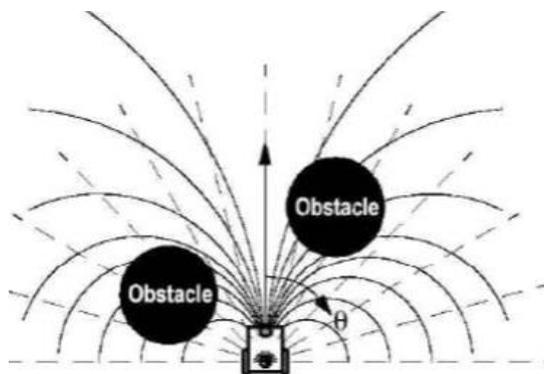


Рис. 1. – Гистограмма векторного поля +(VFH+) [2].

На основе алгоритма *VFH+* (гистограмма векторного поля +) было много доработок и вариантов. К примеру, ученые Сонг и Хуанг [3] используют

алгоритм оптического потока для создания полярной гистограммы и адаптируют запас безопасного пространства вокруг препятствий к его расстоянию (рис. 2).

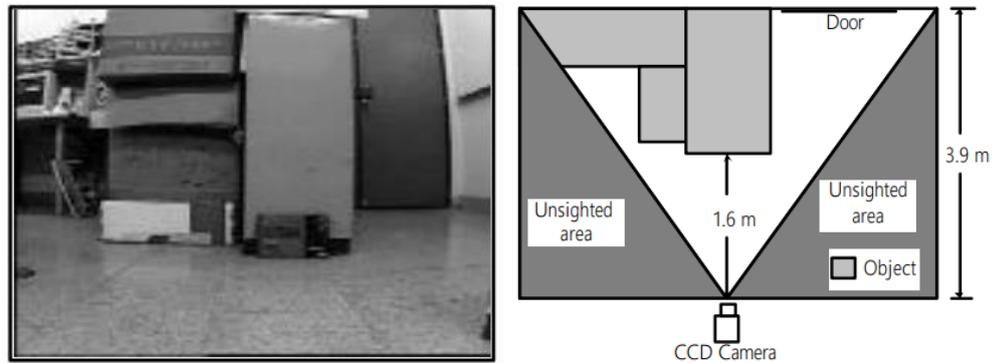


Рис. 2. – Применение алгоритма оптического потока [4].

Метод подвижного и статического векторного поля (*MSV*) [5], рассмотренный позже, представляет собой адаптацию к *VFH +*, которая способна справляться с движущимися препятствиями, оценивая их скорость по последовательным гистограммам. Другой вариант – это *VFH **, введенный Ульрихом и Боренштейном. Этот алгоритм сочетает в себе преимущество алгоритма планирования *A** с локальными свойствами алгоритма *VFH +*. В данном подходе строится упреждающее дерево, на каждом узле которого выполняется алгоритм *VFH +* для поиска возможных направлений. Затем в дереве выполняется поиск наилучшего пути с использованием алгоритма *A** (рис. 3).

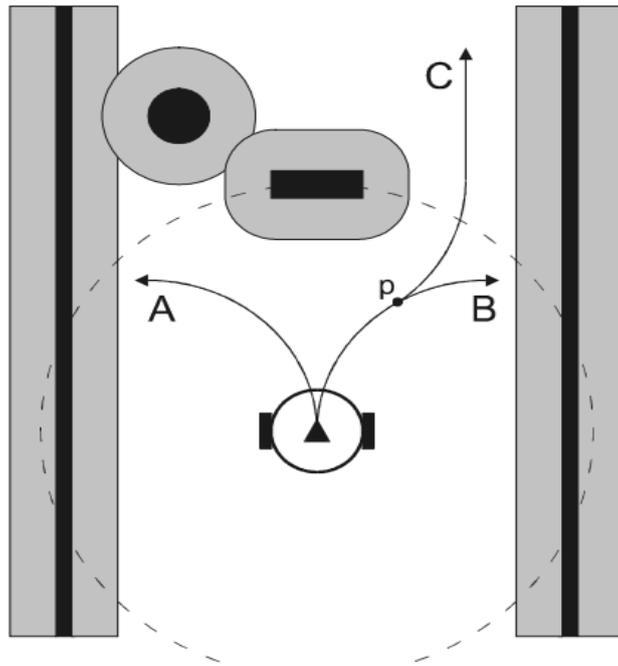


Рис. 3. – Смоделированная ситуация для локальных препятствий с использованием алгоритма VFH* [6].

Были попытки улучшить алгоритм VFH* для учета движущихся препятствий. Джи Д. и др. [7]. разработали алгоритм IVFH*, который использует пружинные силы на узлах дерева поиска, чтобы адаптировать их к движущимся препятствиям. Бабинек и его команда определяют скорость препятствий из нескольких последующих состояний и используют эти знания при построении дерева поиска. Вырез активного окна на рис. 4 иллюстрирует положение робота (синий), препятствие (черный) и различные сектора (желтый, оранжевый).

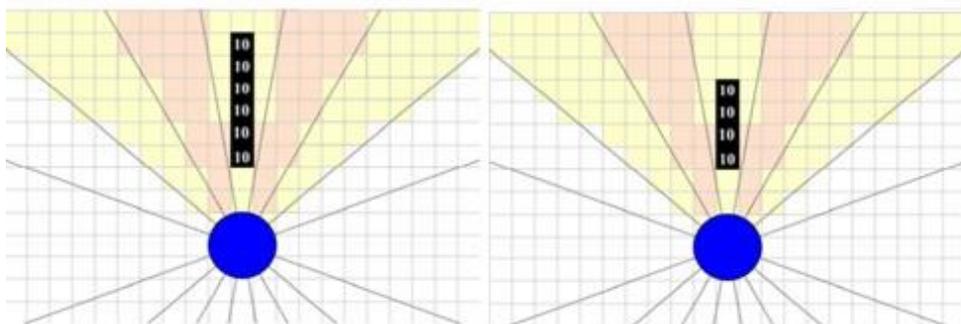


Рис. 4. – Принцип алгоритма IVFH* [8, 9].

В некоторых недавних исследованиях также использовались подходы

машинного обучения для определения правильного маневра уклонения от препятствий на основе сенсорных данных. Была проведена работа по объединению метода *VFH* с машинным обучением и нечеткой логикой [12, 13]. Ранняя версия метода нечеткой логики под влиянием потенциальных полей была представлена Завлангасом и др. [14]. С другой стороны, Росс и др. [15] узнают правильный управляющий вход непосредственно из данных датчиков и демонстраций полетов.

На рис. 5, слева показано улучшение траектории с помощью нейросетей на итерациях. Крайняя правая зеленая траектория – это пилотная демонстрация. Короткие траектории, выделенные красным и оранжевым цветом, показывают, что БПЛА, обученный на 1-й и 2-й итерациях соответственно, дал сбой. В результате 3-й итерации дрон успешно обошел оба препятствия, и его траектория аналогична изначально продемонстрированному пути. Справа – процент сценариев, в которых пилоту приходилось вмешиваться, и потери от имитации после каждой итерации. После 3 итераций пилоту не нужно было вмешиваться, и БПЛА смог успешно уклониться от всех препятствий.

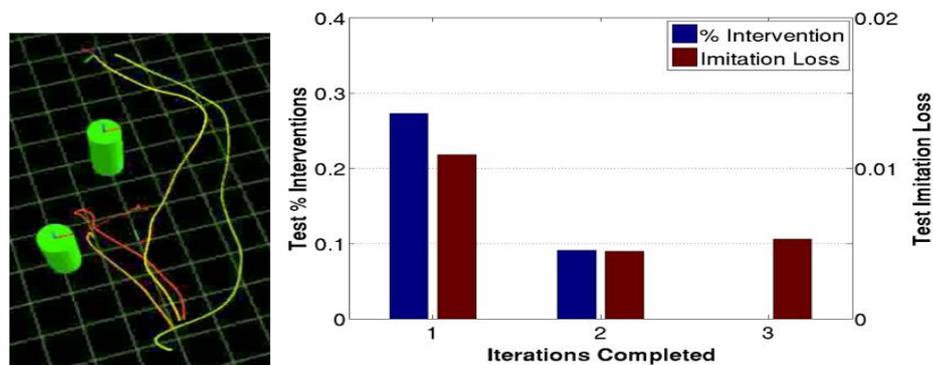


Рис. 5. – Метод *VFH* с машинным обучением и нечеткой логикой.

В 2015 году была представлена, стратегия Олейниковой и др., в которой положения препятствий определяются путем преобразования карты диспаратности в *U*-карту. На этой *U*-карте ограничительные рамки расположены вокруг отличительных областей. Летные испытания показали, что БПЛА может избегать редких препятствий при выборе путевых точек за пределами эллипсов.

На рис. 6 продемонстрирован сегмент U -карты, представляющий препятствие с ограничивающей рамкой его обнаружения (рис. 6, а), наложенной красным цветом. Наложение эллипса на препятствие (рис. 6, б), показывающее различные величины, используемые для расчета препятствия – u_1 , u_2 , крайние левый и правый края препятствий в u , d_1 – максимальное несоответствие и d_2 – среднее несоответствие объекта. Справа (рис. 6, в) изображен результирующий эллипс в мировой системе координат и пять значений, описывающих его центр GP_e и размер ES_e .

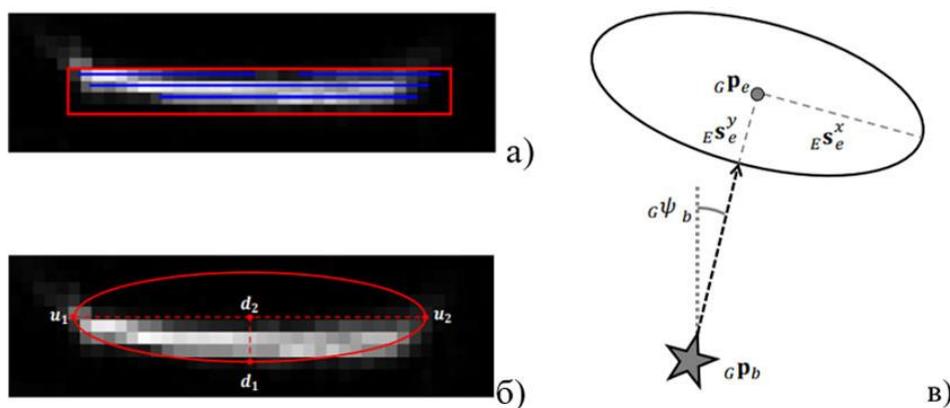


Рис. 6. – Стратегия Олейниковой по избеганию локальных препятствий [16].

Еще одно семейство вычислительно дешевых алгоритмов для локального обхода препятствий в $2D$ – это алгоритмы ошибок (*Bug*). Сравнение различных алгоритмов ошибок можно найти в исследованиях Томаса Браунла и др. [17]. Буньямин и др. разработали алгоритм *PointBug*, который смог превзойти другие алгоритмы *Bug*, особенно в средах с небольшими резкими краями и поворотами. Датчик дальности обнаруживает препятствие слева направо и справа налево как показано на рис. 7.

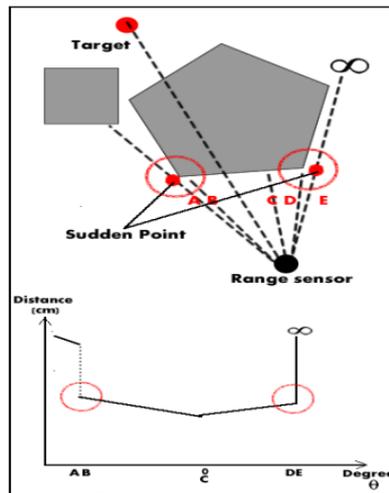


Рис. 7. - Алгоритм PointBug [18].

Заключение

В данной обзорной статье были рассмотрены разнообразные алгоритмы уклонения от препятствий, включая VFH, VFH+, алгоритм оптического потока, метод подвижного и статического векторного поля, VFH*, IVFH*, а также комбинированные подходы, в которых метод VFH интегрирован с машинным обучением и нечеткой логикой. Кроме того, были изучены алгоритмы ошибок, которые позволяют анализировать различные аспекты работы алгоритмов уклонения от препятствий.

При анализе и оценке эффективности каждого из рассмотренных алгоритмов были учтены такие аспекты, как точность, скорость, адаптивность, надежность и применимость в различных сценариях управления БПЛА. Таким образом, учитывая все вышеперечисленные характеристики, можно сделать вывод, что VFH и его разновидности, такие как VFH+ и VFH*, представляют собой наиболее оптимальный выбор для модернизации систем уклонения от препятствий для беспилотных летательных аппаратов.

VFH и его разновидности обеспечивают превосходную производительность благодаря непрерывному учету расстояний до препятствий, быстрому вычислению оптимального направления движения и возможности адаптироваться к изменяющимся условиям окружающей среды. В то же время, объединение VFH с машинным обучением и нечеткой логикой может еще

больше улучшить адаптивность и устойчивость алгоритма к различным ситуациям и условиям работы.

В следующей части статьи будет проведен подробный анализ алгоритма VFH, а также будет рассмотрена его трехмерная версия - алгоритм 3DVFH. Мы также обсудим возможные способы улучшения алгоритма 3DVFH для оптимизации его производительности и адаптивности при решении разнообразных задач управления БПЛА. Таким образом, детальное изучение принципов работы, стабильности и гибкости алгоритма VFH и его разновидностей позволит выработать рекомендации по его дальнейшему развитию и применению в различных областях, где необходима автономная навигация и уклонение от препятствий.

Библиографический список:

1. Borenstein J., Koren Y. The Vector Field Histogram - Fast Obstacle Avoidance for Mobile Robots // IEEE Transactions on Robotics and Automation – 1991 – Vol. 7, №. 3 – P. 278–288.

2. Ulrich I., Borenstein J. VFH+: Reliable Obstacle Avoidance for Fast Mobile Robots // IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA) – 1998 – Vol. 2 – P. 1572–1577.

3. Song K. Huang J. Fast optical flow estimation and its application to real-time obstacle avoidance // IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). – 2001. – Vol. 3. – P. 2891–2896.

4. Yamauchi B. The Wayfarer modular navigation payload for intelligent robot infrastructure // Unmanned Ground Vehicle Technology VII, Proceedings of International Society for Optics and Photonics. – 2005. – Vol. 5804, № 781. – P. 85–96.

5. You B., Qiu J., Li D. A novel obstacle avoidance method for low-cost household mobile robot // IEEE International Conference on Automation and Logistics, ICAL. – 2008 – P. 111–116.

6. Ulrich I. and Borenstein I. VFH*: Local obstacle avoidance with lookahead

verification // IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). – 2000. – Vol. 2. – P. 1572–1577.

7. Jie D., Xueming M., Kaixiang P. IVFH*: Real-time Dynamic Obstacle Avoidance for Mobile robots // International Conference on Control Automation Robotics & Vision (ICARCV). – 2010. – P. 7–10.

8. Modifications of VFH navigation methods for mobile robots / Babinec A., Dekan M., Duchoň F., Vitkoa A. // Procedia Engineering. – 2012. – Vol. 48. – P. 10–14.

9. VFH*TDT (VFH* with Time Dependent Tree): A new laser rangefinder-based obstacle avoidance method designed for environment with non-static obstacles / Babinec A., Duchoň F., Dekan M. and etc. // Robotics and Autonomous Systems. – 2014. – Vol. 62, №. 8. – P. 1098–1115.

10. Vanneste S., Bellekens B., Weyn M. 3DVFH+: Real-Time Three-Dimensional Obstacle Avoidance Using an Octomap // MORSE 1st International Workshop on Model-Driven Robot Software Engineering – 2014 - Vol. 1319

11. OctoMap: An efficient probabilistic 3D mapping framework based on octrees / Hornung A., Wurm K.M., Bennewitz M. and etc. // Autonomous Robots. – 2013. Vol. 34, №. 3. – P. 189–206.

12. Kazem B.I., Hamad A.H., Mozael M.M. Modified Vector Field Histogram with a Neural Network Learning Model for Mobile Robot Path Planning and Obstacle Avoidance // International Journal of Advancements in Computing Technology. – 2010. – Vol. 2, №. 5. – P. 99–110.

13. Hamad A.H., Ibrahim F. B. Path Planning of Mobile Robot Based on Modification of Vector Field Histogram using Neuro-Fuzzy Algorithm // International Journal of Advancements in Computing Technology. – 2010. – Vol. 2, № 3. – P. 1–10.

14. Zavlangas P.G., Tzafestas S.G., Althoefer K. Fuzzy Obstacle Avoidance and Navigation for Omnidirectional Mobile Robots // European Symposium on Intelligent Techniques. – 2000. – P. 14–15.

15. Learning monocular reactive UAV control in cluttered natural environments / Ross S., Melik-Barkhudarov N., Shankar K.S. and etc. // IEEE International

Conference on Robotics and Automation (ICRA). – 2013. – P. 1765–1772.

16. Oleynikova H., Honegger D., Pollefeys M. Reactive avoidance using embedded stereo vision for MAV flight // IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). – 2015. – P. 50–56.

17. Ng J., Bräunl T. Performance comparison of Bug navigation algorithms // Journal of Intelligent and Robotic Systems. – 2007. – Vol. 50, №. 1. – P. 73–84.

18. A simple local path planning algorithm for autonomous mobile robots / Buniyamin N., Wan Ngah W.A.J., Sariff N., Mohamad Z. // International journal of systems applications, Engineering & development. – 2011. – Vol. 5, №. 2. – P.151–159.