

МЕТОД ОБНАРУЖЕНИЯ И ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ СТОЛКНОВЕНИЯ С ПРЕПЯТСТВИЯМИ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ С МОНОКУЛЯРНОЙ КАМЕРЫ И АЛГОРИТМА УВЕЛИЧЕНИЯ РАЗМЕРА ДЛЯ БПЛА

Прокофьев М.А., магистр, старший оператор 4 научной роты ФГАУ «Военный инновационный технополис «ЭРА», г. Анапа, Российская Федерация, e-mail: maprokofev@mail.ru, тел.: 89663135366,

Горшков С.А., специалист, старший оператор 4 научной роты ФГАУ «Военный инновационный технополис «ЭРА», г. Анапа, Российская Федерация, e-mail: sngorshkov@mail.ru, тел.: 89097633050,

Волков В. А., магистр, оператор 5 научной роты ФГАУ «Военный инновационный технополис «ЭРА», г. Анапа, Российская Федерация, e-mail: vavolkov@yandex.ru, тел.: 89632285916,

Колузов А.В., младший научный сотрудник, командир 1 взвода 4 научной роты ФГАУ «Военный инновационный технополис «ЭРА», г. Анапа, Российская Федерация.

Аннотация

Одной из самых сложных проблем в области автономных летательных аппаратов является разработка надежной системы обнаружения и предотвращения столкновения с препятствиями в режиме реального времени. Для её решения в данной статье предлагается использование легких датчиков (цифровой монокулярной камеры) вместо широко используемых, таких как лазер или радар. Цель данной работы состоит в исследовании метода, имитирующего поведение человека при распознавании состояния приближающиеся препятствия с помощью монокулярной камеры. Суть данного метода состоит в том, чтобы проанализировать изменения размера обнаруженных характерных точек препятствия в сочетании с коэффициентами расширения выпуклого корпуса, построенного вокруг обнаруженных характерных точек из набора последовательных кадров. По результатам проведенных экспериментов была доказана его эффективность в различных условиях испытаний.

Ключевые слова: военный инновационный технополис «ЭРА», микро летательные аппараты; внутренняя навигация, монокулярная камера, препятствие.

В течение последнего десятилетия, с развитием микроэлектроники и повышением эффективности вычислений, использование беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) больше не ограничивается только военными целями. В последнее время с появлением малых и микроавиационных транспортных средств (*sUAV* и *MAV*) требования к операциям и применениям на малых высотах возросли.

Благодаря своей способности работать в труднодоступных, опасных и монотонных ситуациях, системы *sUAV* и *MAV*, в особенности вертолеты и системы несущих винтов с вертикальным взлетом и посадкой (*VTOL*), все чаще используются во многих областях, таких как геодезия и картографирование, спасательные операции во время стихийных бедствий, сбор пространственной информации, сбор данных из недоступных районов, во время геофизических исследований, помощи в координировании и транспортировке, инспекции зданий и навигационных целях.

В настоящее время, благодаря использованию современных технологий, разнообразия и сложности задач, разработка беспилотников позволяет достичь более высокого уровня автономности и стабилизации полета. Для автономных беспилотников проблема обнаружения и избегания препятствий с высоким уровнем точности до сих пор считается сложной задачей.

Сложности возникают из-за того, что размер БПЛА становится меньше, и, следовательно, вес тоже становится меньше. По этой причине, принимая во внимание эти свойства, *sUAV* и *MAV* не способны нести тяжелые датчики, такие как лазер [1-3] или радар [4]. Следовательно, наиболее подходящим решением является использование бортовых камер из-за их преимуществ в виде малого веса и низкого энергопотребления. В дополнение к этим преимуществам, камеры способны обеспечить нас большим объемом информации об окружающей среде. Поэтому они считаются важными датчиками, устанавливаемыми на малых и микро БПЛА.

В навигационных системах на основе технического зрения были предложены различные подходы для решения проблемы обнаружения и предотвращения препятствий. Одни из них строят трехмерную модель препятствия в окружающей среде [5][6]. Другие рассчитывают глубину (расстояние до) препятствий [7][8]. Также были предложена методика, основанная на стереокамерах, для оценки близости препятствий, в основе которой лежит следующий принцип: система определяет размер и положение препятствий на основе несоответствия изображений и угла обзора. Кроме того, эта методика вычисляет соотношение размера БПЛА и расстояния до обнаруженного препятствия. Все эти подходы имеют важный недостаток, заключающийся в необходимости использования большого объема вычислительных ресурсов.

Альтернативным решением является использование «биологических» (на основе поведения насекомых, животных или человека) подходов, позволяющих оценивать наличие препятствия эффективно, без вычисления 3D-моделей, например, с помощью оптического потока или перспективных сигналов. Однако, подходы с оптическим потоком не могут идентифицировать движение вперед из-за проблемы с апертурой, поэтому фронтальные препятствия будут обеспечивать только компонент движения, перпендикулярный к обнаруженным краям изображения, не способный предоставить информацию о движении вперед. Перспективные сигналы хорошо работают в только в структурированных средах.

Обнаружение и устранение фронтальных препятствий с помощью монокулярной камеры считается сложной проблемой из-за отсутствия оптического потока [9] или параллакса движения [10]. Тем не менее, методика «увеличение размера» предоставляет полезную информацию для обнаружения препятствий, которые движутся к БПЛА.

В этой статье проведено исследование биологического подхода с использованием монокулярной камеры, имитирующего поведение человека по обнаружению и предотвращению столкновения с препятствиями, применяемый на БПЛА. Работа системы, использующей данный подход, разделена на два основных этапа: навигация на основе технического зрения и управление. В данной системе алгоритм обнаружения препятствий выполняется на основе входных изображений, снятых с передней камеры. Затем полученные данные передаются в подсистему *Motion Control*, где принимается решение об уклонении и отправляется на БПЛА. На рис. 1 показана общая схема работы такой системы.

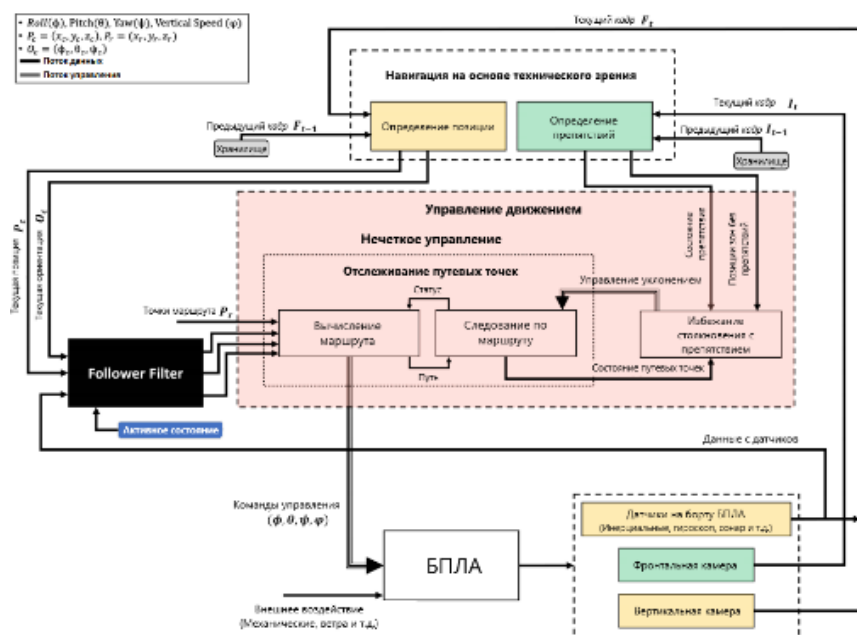


Рисунок 1 – Схема системы автономного управления БПЛА

Предлагаемый алгоритм имитирует поведение человека при обнаружении препятствий, находящихся перед БПЛА во время движения. В этот момент оценивается *collision state* приближающихся препятствий вместо построения трехмерных моделей или расчета глубины препятствия.

Суть работы данного алгоритма заключается в оценке соотношений размеров приближающихся препятствий на основе данных из последовательных кадров во время полета, как показано на рис. 2. Это достигается путем оценки изменения свойства размера обнаруженных характерных точек (диаметра) и размера выпуклой оболочки (площади), которая также построена из этих точек. Когда соотношения размеров превышают определенные эмпирические значения, это означает, что обнаружено препятствие, и оно может создать опасность для БПЛА, как показано на рис. 3.

$$mkp(n) = \begin{cases} (x, y, s) & \text{distratio} \leq 0.28 \\ 0, & \text{иначе} \end{cases} \quad \forall n \in K \quad (1)$$

где s – это размер ключевой точки (диаметр), $distratio$ – это минимальное отношение p совпадающих ключевых точек, а K – общее количество совпадающих ключевых точек.

После этого полученные ключевые точки по уравнению выше сравниваются от второго до первого кадра, а затем алгоритм возвращает совпадающие ключевые точки, если и только если их размер увеличивается.

Следующим шагом алгоритма обнаружения является определение вероятности обнаружения фронтального препятствия. Следовательно, из выделенных и отфильтрованных ключевых точек по уравнению:

$$mkp(n) = \begin{cases} (x, y, s) & \text{Size}(mkp_2(i) > mkp_1(i)) \\ 0, & \text{иначе} \end{cases} \quad \forall i \in n \quad (2)$$

вокруг этих ключевых точек в обоих кадрах создается интересующий объект (ROI) путем создания выпуклой оболочки соответствующих точек:

$$C = \sum_{i=1}^N \lambda_i mpk_i \mid (\forall i : \lambda_i \geq 0) \quad (3)$$

где C определяет выпуклую оболочку, а $lamda$ – неотрицательный вес, назначенный точкам mpk .

Далее, чтобы оценить изменения размера области обнаруженных препятствий, считается, что каждая выпуклая оболочка представляет собой неправильный многоугольник. Для него рассчитывается площадь по формуле

$$C_{area} = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} x_1 & y_1 \\ x_2 & y_2 \\ x_3 & y_3 \\ \dots & \dots \\ x_n & y_n \\ x_1 & y_1 \end{vmatrix} = \frac{1}{2} [(x_1 y_2 + x_2 y_3 + x_3 y_4 + \dots + x_n y_1) - (y_1 x_2 + y_2 x_3 + y_3 x_4 + \dots + y_n x_1)] \quad (4)$$

где $x_{(1:n)}$ и $y_{(1:n)}$ являются вершинами, а n – количество сторон многоугольника.

Наконец, рассчитывается соотношение размеров совпадающих ключевых точек и площади выпуклой оболочки от второго до первого кадра

$$ratio(mkp) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{Size(mkp_2(i))}{Size(mkp_1(i))} \quad (4)$$

$$ratio(C) = \frac{Size(C_2)}{Size(C_1)} \quad (6)$$

и алгоритм оценивает состояние столкновения, представляет ли опасность прибли препятствие или нет:

$$State = \begin{cases} 1, & ratio(mkp) \geq 1.2 \cap ratio(C) \geq 1.7 \\ 0, & \text{иначе} \end{cases} \quad (7)$$

В ходе разработки алгоритмов было предложено эмпирическое исследование о соотношении размером ключевых точек, площадью препятствия и расстоянием до приближающегося препятствия. Это соотношение было оценено путем проведения различных экспериментов внутри помещения и снаружи. Предполагая, что БПЛА летит с постоянной скоростью, наилучшие соотношения находятся в диапазоне $[1.2-1.5]$ и $[1.7-2.0]$ для размера ключевых точек и площади размера препятствия соответственно, при которых препятствие может быть обнаружено на расстоянии из $[120-50]$ см.

Состояние столкновения обнаруженных препятствий с помощью монокулярной камеры, характеризуется значением **1**, если есть препятствие, или **0**, если препятствие не обнаружено.

После обнаружения препятствий со значением **1** состояния столкновения, алгоритм оценивает положение крайне внешних точек, которые создают препятствие на изображении (P_L, P_R, P_U, P_D), где P_L – точка

с минимальным значением на оси x , P_R – с максимальным значением на оси x , а P_U и P_D – аналогично на оси y .

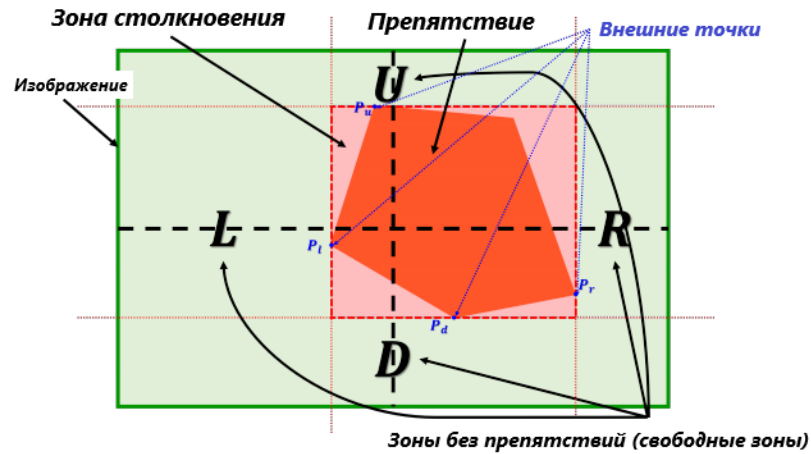


Рисунок 4 – Расчет внешних точек препятствия

Наконец, зоны без столкновений в четырех направлениях (**L** – влево, **R** – вправо, **U** – вверх, **D** – вниз) рассчитываются как четыре прямоугольника, окружающие препятствие по формуле:

$$\tau = (\tau_L, \tau_R, \tau_U, \tau_D) = (Zone_{Lwidth}, Zone_{Rwidth}, Zone_{Uheight}, Zone_{Dheight}) \quad (8)$$

Предположим, что некоторый БПЛА X летит с постоянной скоростью V вперед вдоль оси x

$$X = [x_d \ y_d \ z_d]^T$$

$$V = [u_d \ v_d \ w_d]^T \quad (9)$$

Тогда точка его маршрута может быть выражена как:

$$WP = [x_w \ y_w \ z_w]^T \quad (10)$$

Предполагается, что путевая точка отслеживается, если достигнуто значение x_d , в то время были также достигнуты: (11)

$$x_d = x_w \pm \mu_x \quad (11)$$

$$y_d = y_w \pm \mu_y \quad (12)$$

$$z_d = z_w \pm \mu_z \quad (13)$$

где μ – зона допуска вокруг точки маршрута с радиусом 10 см вокруг неё.

Пусть препятствие по ходу движения БПЛА *obs* обнаруживается алгоритмом и «безопасными» зонами (14)

$$\tau = (\tau_L, \tau_R, \tau_U, \tau_D).$$

Сначала алгоритм уклонения (избежания столкновения) проверит все свободные зоны и определит, какая зона лучше для пролета. Это достигается путем считывания положения следующей путевой точки и сравнения размера свободных зон, где последний маневр будет проходить в направлении движения **влево-вправо** или **вверх-вниз**, или сочетание обоих. После этого предполагается, что граница безопасности, окружающая препятствие, показана на рис. 5, основываясь на размерах БПЛА. Безопасная зона рассчитывается как

$$Safety_{LR} = \left(\frac{w_{UAV}}{2}\right) + 20 \text{ [см]}$$

$$Safety_{UD} = \left(\frac{h_{UAV}}{2}\right) + 20 \text{ [см]} \quad (12)$$

где w и h – ширина и высота БПЛА соответственно. (13)

(15)

(16)

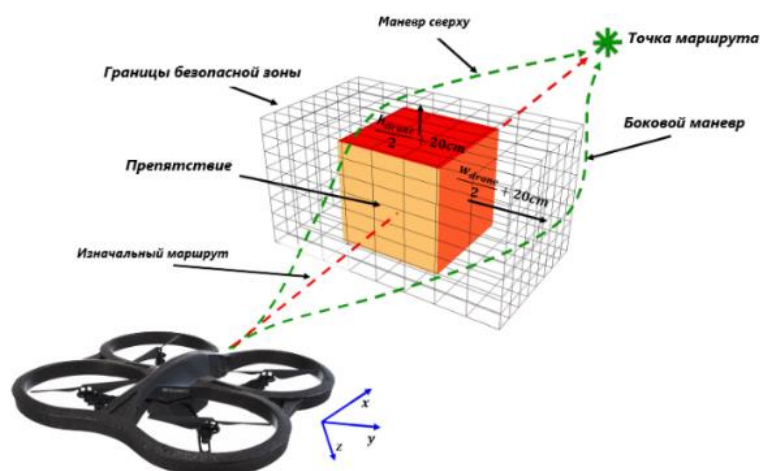


Рисунок 5 – Расчет маршрута обхода препятствия

Затем алгоритм считывает положение предварительно определенной следующей путевой точки и вычисляет новую путевую точку вне трассы (во избежание препятствия) и посылает управляющую команду (изменение скорости и направления) на БПЛА для маневрирования в соответствии с положением путевой точки:

Горизонтальный маневр:

$$V_{LR} = k(y_d \pm Safety_{LR}) \quad (14)$$

Вертикальный маневр:

$$V_{UD} = k(z_d \pm Safety_{UD}) \quad (15) \quad (17)$$

где y_d и z_d – позиция беспилотника в координатах (y, z) , k – коэффициент контроля. (18)

Наконец, оценивая новую позицию БПЛА после уклонения, алгоритм пересчитывает новые точки, чтобы БПЛА мог вернуться на свой заранее заданный путь и активировать процесс обнаружения препятствий.

В случае если параметр увеличения зоны препятствия *AreaScale* больше чем 2, а размер ключевых точек *SizeScale* изменился больше чем в 1.5 раза, то на БПЛА подается команда *Hover* (зависнуть). Такое поведение вызвано тем, что выход этих параметров за установленные рамки означает, что препятствие находится очень близко к БПЛА (менее чем на 50 см от него).

Для тестирования эффективности предложенного метода были разработаны несколько сценариев его применения, отличающихся друг от друга типами препятствий, таких как человек (**Ч**), предмет (**П**), колонна (**К**), стена (**С**), как внутри помещений, так и на открытом пространстве. Результаты проведенных испытаний представлены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты тестирования алгоритма

	В помещении				На открытом пространстве			
Число объектов	100	10	10	10	100	20	40	10
Обнаружено	96	7	9	6	96	16	35	9
Точность (%)	8,0	7,3	8,8	5,0	8,0	6,7	6,4	8,6

На основе анализа полученных результатов был сделан вывод об эффективности работы алгоритма. Его средняя точность распознавания составила 97.4%.

Обнаружение и избежание столкновений с препятствиями в реальном времени с использованием систем технического зрения считается сложной и важной задачей для интеллектуальных летательных аппаратов. Описанные в данной статье алгоритмы используют возможности бортовых камер для решения этих задач.

Описанные методы и алгоритмы обеспечили возможность обнаружения границ объекта (препятствия) при размере фактического дрона, расположенного в центре изображения на расстояниях выше 15 см, что позволяет успешно избегать препятствий с точностью до 97.4%. Однако, стоит отметить, что эффективное применение данного алгоритма предполагает использование высококачественной камеры, способной обнаруживать препятствия на больших расстояниях.

В случае, если потребуется работа на более высоких скоростях, необходимо будет скорректировать расчет частоты кадров и угол обзора камеры, чтобы позволить дрону скорректировать процесс проведения расчета для правильного обнаружения препятствий.

При этом смена поля зрения камеры, была бы целесообразна только для того, чтобы обеспечить дальнейшую маневренность в чрезвычайно плотном трафике, с требованиями к обнаружению на коротком расстоянии, которые не распространены в воздушных сценариях, где БПЛА обычно используются.

Несмотря на высокую эффективность исследованного метода, у него есть несколько недостатков, которые должны быть приняты во внимание: они связаны с природой используемых устройств: монокулярная камера имеет высокую чувствительность к условиям освещения.

Литература

1. Shim, D.; Chung, H.; Sastry, S. Conflict-free navigation in unknown urban environments. *IEEE Robot. Autom. Mag.* 2006, 13, 27–33.
2. Luo, D.; Wang, F.; Wang, B.; Chen, B. Implementation of obstacle avoidance technique for indoor coaxial rotorcraft with Scanning Laser Range Finder. In *Proceedings of the 2012 31st Chinese Control Conference (CCC)*, Hefei, China, 25–27 July 2012; pp. 5135–5140.
3. Shang, E.; An, X.; Li, J.; He, H. A novel setup method of 3D LIDAR for negative obstacle detection in field environment. In *Proceedings of the 2014 IEEE 17th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, Qingdao, China, 8–11 October 2014; pp. 1436–1441.
4. Ariyur, K.; Lommel, P.; Enns, D. Reactive inflight obstacle avoidance via radar feedback. In *Proceedings of the American Control Conference*, Portland, OR, USA, 8–10 June 2005; Volume 4, pp. 2978–2982.
5. Gao, Y.; Ai, X.; Rarity, J.; Dahnoun, N. Obstacle detection with 3D camera using U-V-Disparity. In *Proceedings of the 2011 7th International Workshop on Systems, Signal Processing and their Applications (WOSSPA)*, Tipaza, Algeria, 9–11 May 2011; pp. 239–242.
6. Li, J.; Li, X.-M. Vision-based navigation and obstacle detection for UAV. In *Proceedings of the 2011 International Conference on Electronics, Communications and Control (ICECC)*, Ningbo, China, 9–11 September 2011; pp. 1771–1774.
7. Merrell, P.C.; Lee, D.J.; Beard, R.W. Obstacle avoidance for unmanned air vehicles using optical flow probability distributions. *Mob. Robots XVII* 2004, 5609, 13–22.
8. Chavez, A.; Gustafson, D. Vision-based obstacle avoidance using SIFT features. In *Proceedings of the 5th International Symposium on Advances in Visual Computing: Part II, ISVC'09*, Las Vegas, NV, USA, 30 November–2 December 2009; Springer: Berlin, Heidelberg, 2009; pp. 550–557.
9. Mori, T.; Scherer, S. First results in detecting and avoiding frontal obstacles from a monocular camera for micro unmanned aerial vehicles. In *Proceedings of the 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Karlsruhe, Germany, 6–10 May 2013; pp. 1750–1757.
10. Shirai, N.; Yamaguchi, M.K. Asymmetry in the perception of motion-in-depth. *Vis. Res.* 2004, 44, 1003–1011.