

УДК 519.677

Ага-Заде Сабина,
Бунямин Джийлан

МЕТОД ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ ТРАЕКТОРИИ БЛА В МЕГАПОЛИСЕ ПРИ НАЛИЧИИ ПРЕПЯТСТВИЙ

Университет Гази

sabina.aghazada@gazi.edu.tr

bciylan@gazi.edu.tr

Введение

В настоящее время все большее пространство получают беспилотные летательные аппараты (БЛА). Использование и распространенность БЛА объясняется наличием готовых платформ, таких как AscTec Hummingbird, Parrot, Ar.Drone, Mikrokopter, ARDUcopter, а также с достаточным активным использованием их как в практических (аэрофотосъемка, экологический и сельскохозяйственный мониторинг, мониторинг некоторой сухопутной области и морской акватории, разведка и патрулирование некоторого участка горной дороги или участка границы, грузовые поставки и др.), так и в научных целях [1].

Проблемы разработки алгоритмов управления движением БЛА рассматривались во многих работах, где исследовались различные их аспекты [2–8]. Так, в работе [2] для синтеза бортовых систем управления БЛА применялся известный метод *backstepping*; самоорганизующееся и адаптивное управления предложены в работах [3,4]. В работах [5-7] основное внимание уделяется групповому управлению БЛА. В этой области в настоящее время достигнут определенный прогресс. Так, отдельные задачи автоматизации управления мультикоптерами можно считать успешно решенными. К ним относятся, например, задачи автоматического выполнения некоторых основных режимов полета (зависание, полет с постоянной скоростью и пр.) и маневров (взлет, посадка, зависание и пр.) и другие.

Существующие в настоящее время подходы к решению задач планирования маршрута полета в первую очередь относятся к процессу поочередного облета и наблюдения неподвижных объектов [5]. Известно множество методов маршрутизации, начиная от метода ветвей и границ и заканчивая нейросетевыми алгоритмами планирования, когда в исходных данных указаны координаты местоположения наблюдаемых объектов, а результатом решения задачи является последовательность облета пунктов планируемого маршрута [3,4,9,10-14].

Традиционно задача планирования траектории рассматривается как задача поиска пути на графе. В качестве графовых моделей окружающей среды обычно используются графы регулярной декомпозиции (ГРД), в англоязычной терминологии – *grids* [6], схожие с ними модели: МТ-графы [10], графы видимости [7], вероятностные схемы местности [8] и др. Достаточно полный и информативный обзор графовых моделей, применяемых для решения задач планирования траектории на плоскости, приведен в [10].

Однако многие вопросы управления движением БЛА в автономном режиме все еще остаются нерешенными. В частности, некоторые из этих вопросов актуальны для мегаполиса, где имеются объекты (такие как детские сады, школы, больницы и т.д.), над которыми полет БЛА запрещен. Большая плотность застройки и сложная конфигурация рельефа мегаполиса требует особых научных и практических подходов для решения за-

дач автоматического выполнения различных маневров для предотвращения полета над такого рода объектами. Очевидно, что при решении этих задач БЛА должен выполнять движение по сложным траекториям, включающим в себя прямолинейные и криволинейные участки.

Постановка задач

Решение задачи управления движением БЛА при наличии запрещенных территорий выполняется в два этапа:

- на первом этапе решается задача уточнения в реальном масштабе времени карты местности, локализация препятствий или нежелательных участков, пролет над которыми запрещается;

- на втором этапе выполняется планирование траектории полета.

Вопросам, связанным с решением этой задачи, а именно – с задачей автоматизацией планирования траектории управления полетом беспилотного летательного аппарата (БЛА) с обходом препятствий на имеющейся карте (модели) местности – посвящена данная работа.

При этом предполагается, что на БЛА отсутствует система получения дальнометрической информации, которая позволяла бы обнаруживать специальные ориентиры на местности (типа ультразвуковые датчики, 2D и 3D лазерные сканеры или видеокамерами), так как это оборудование увеличивает неустойчивость полета и массу БЛА, что, естественно, уменьшает полезную нагрузку.

Для выполнения задачи первого этапа на карте Google намечаются регионы, где предполагается осуществлять полет БЛА, на карте фиксируются объекты-препятствия и выписывается вокруг них прямоугольники (или окружности). Координаты начальной и конечных точек полета БЛА, а также вершин прямоугольников (либо координаты центра окружности и длины радиусов) добавляются в базу данных, которая генерируются автомати-

чески при движение и нажатие кнопки мыши.

Для решения задачи синтеза оптимальной траектории, проходящей через заданные точки A_0B_0 , которые соединены прямыми линиями (как минимальное расстояние между двумя точками), следует определить координаты пересечения этих линий с границей препятствием (рис.1).

Предлагаемая математическая модель. Математическая постановка задачи в случае прямоугольных препятствий имеет следующий вид:

На плоскости дано n -ое количество отрезков, заданных целочисленными координатами. Определить координаты точек пересечения отрезков с заданными фиксированными целочисленными координатами границ препятствий. В случае окружности задача сводится к определению координат пересечений с окружностями.

Предлагаемый метод решения задачи в случае прямоугольных препятствий основан на свойствах выпуклого четырехугольника, образованного на основе соединения концевых точек двух отрезков.

Утверждение. Если отрезки (A_0B_0) и (A_iB_i) пересекаются, то они являются диагоналями выпуклого четырехугольника $(A_0B_iB_0A_i)$. В противном случае четырехугольник $(A_0B_iB_0A_i)$ не будет выпуклым и отрезки не являются диагоналями четырехугольника.

В случае выпуклого четырехугольника площадь $S_{A_0B_iB_0A_i}$ равно сумме площадей треугольников $\Delta A_0A_iB_0$ и $\Delta A_0B_iB_0$:

$$S_{A_0B_iB_0A_i} = \frac{1}{2} |A_iB_i| * |A_0B_0| * \sin(A_iB_i \wedge A_0B_0) \quad (1)$$

$$S_{A_0B_iB_0A_i} = S_{\Delta A_0A_iB_0} + S_{\Delta A_0B_iB_0} \quad (2)$$

в противном случае равенство (2) не выполняется.

Запишем формулы (1)-(2) более подробно. Для этого обозначим координаты

наты отрезка (A_0B_0) через $A_0(x_0^0, y_0^0)B_0(x_1^0, y_1^0)$, а (A_iA_{i+1}) через $A_i(x_0^i, y_0^i) A_{i+1}(x_0^{i+1}, y_0^{i+1})$.

Тогда

$$|A_0B_0| = \sqrt{(x_1^0 - x_0^0)^2 + (y_1^0 - y_0^0)^2} \quad (3)$$

$$|A_iA_{i+1}| = \sqrt{(x_0^{i+1} - x_0^i)^2 + (y_0^{i+1} - y_0^i)^2} \quad (4)$$

$$S_{\Delta A_0A_iB_0} = \frac{1}{2} |A_iA_0| \cdot |A_iB_0| \cdot \sin(A_iA_0 \wedge A_iB_0) \quad (5)$$

$$\cos(A_iB_i \wedge A_0B_0) = \frac{(A_iB_i)(A_0B_0)}{|A_iB_i||A_0B_0|} = \frac{(x_1^i - x_0^i)(x_1^0 - x_0^0) + (y_1^i - y_0^i)(y_1^0 - y_0^0)}{|A_iB_i||A_0B_0|} \quad (6)$$

$$\sin(AB \wedge A_0B_0) = \sqrt{1 - \cos^2(A_iB_i \wedge A_0B_0)} \quad (7)$$

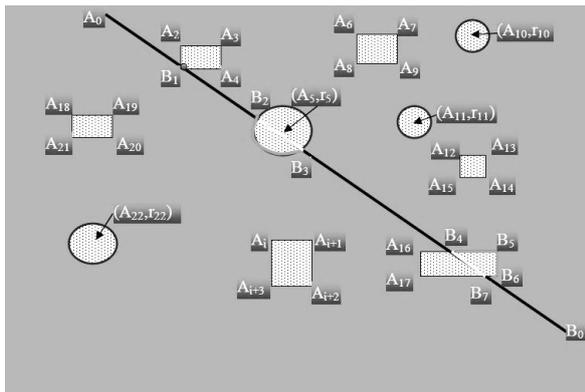


Рис. 1. Схема траектории полета БЛА при наличии препятствий.

Описание предлагаемого алгоритма. На основе вышеуказанных утверждений и формул (1-7) предлагается следующий алгоритм:

Алгоритм синтеза траектории БЛА с препятствиями:

Обозначения:

- $A_0(x_0^0, y_0^0); B_0(x_1^0, y_1^0)$: «координаты прямолинейных траекторий БЛА»
- $A_i(x_0^i, y_0^i), i = \overline{1, n}$: «координаты прямоугольных препятствий центров окружности»
- $R(0, 0, \dots, r_i, 0, 0, \dots, r_j, 0, 0 \dots)$: «*n* размерный вектор радиусов окружностей»

тей, в случае прямоугольника – соответствующие координаты вектора принимаются 0».

- *m*: количество точек пересечения.

Шаг 1. Input $(x_0^0, y_0^0), (x_1^0, y_1^0)$ & *n*,

m=0

for *i*=1 to *n*.

Input (x_0^i, y_0^i)

end for

$K_0 = (y_1^0 - y_0^0)/(x_1^0 - x_0^0); b_0 = y_0^0 - K_0 x_0^0$

Шаг 2.

for *i*=1 to *n*;

if $R_i=0$ then $K_i = (y_0^i - y_0^{i+1})/(x_0^i - x_0^{i+1});$

if $K_0 = K_i$ then $(A_iA_{i+1}) \parallel (A_0B_0)$

«в дальнейшем отрезок (A_iA_{i+1}) не рассматривается»

else

Шаг 3. «Проверяется пересечение отрезков. Используя формулы (3)-(7) проверяется условия (2)»

End if

End for

For *i*=1 to *n-m*

If $R_i=0$ then

if $S_{A_0B_iB_0A_i} = S_{\Delta A_0A_iB_0} + S_{\Delta A_0B_iB_0}$ then «Добавляются новая опорная точка B_i »

$m = m + 1$

Else «отрезки не пересекаются»

End if

Else «в случае круга»

If $\frac{b_0}{r_i} \leq \sqrt{1 + k_0^2}$ then «в случае равенства, получается касательная. В случае неравенства, пересечение имеется в двух точках».

$$\left\{ \begin{array}{l} x_{1,2}^i = \frac{(K_0 b_0 \pm \sqrt{r_i^2(1 + K_0^2) - b_0^2})}{(1 + K_0^2)} \\ y_{1,2}^i = k_0 x_{1,2}^i + b_0 \end{array} \right.$$

«Добавляются новая опорная точка B_i »

Else «отрезок с кругом не пересекаются»

End if

End for

«определены все точки пересечения с прямолинейными траекториями БЛА»

Шаг 4. «Определяется кратчайший путь вдоль границы области точек пересечения с препятствием».

Шаг 5. «Траектория движения БЛА продолжается от точки A_0 до первой точки пересечения B_1 , затем вдоль линии B_1B_2 и в дальнейшем по линии B_1V_0 до точки второго пересечения».

Шаг 6. «Процесс продолжается, пока не будет достигнута точка B_0 ».

End «Конец алгоритма»

Вычислительный эксперимент. По предложенному алгоритму проведем эксперимент. Для этого используя приложения Google Map на карте города Анкары проводим полет БЛА от университета Гази к отделению Халгбанка при университете Гази (рис.2).

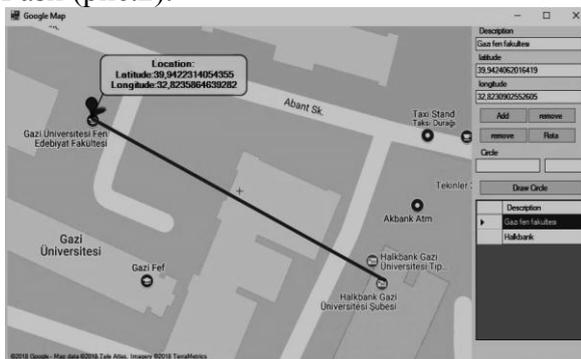


Рис.2. Предполагаемая линия полета БЛА на базе карты Google Map города Анкары, от университета Гази к отделению Халгбанка при университете Гази.

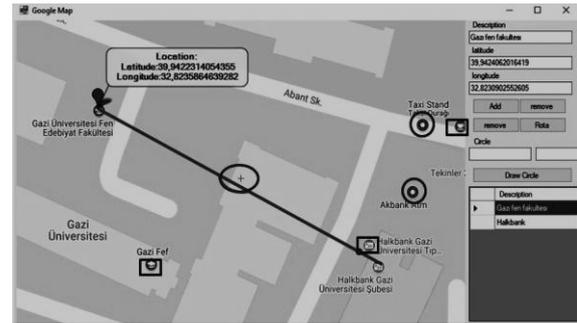


Рис.3. К расчету линии полета БЛА с учетом препятствия, от университета Гази к отделению Халгбанка при университете Гази

Проводим линию между этими точками и отметим координаты точек (рис.2, красная линия, справа на рисунке показаны координаты). Далее выделяем объекты-препятствия на карте и выписываем вокруг них прямоугольники (или окружности) и добавляем в базу данных их координаты (рис3.).

На основе предложенного алгоритма составлена программа на языке СИ++. В начале программы все координаты добавляются в базу данных. Для рассматриваемого случая полёт начинается в точке с координатами:

долгота 39.9420874552832;
широта 32.8229427337646.

Далее по изложенному выше алгоритму определяются новые опорные точки и траектории (рис.3).

Выводы и рекомендации

Предложенный алгоритм для определение координат пересечения прямолинейных траектории БЛА с препятствиями (для случая прямоугольных препятствий) основан на свойствах выпуклого четырехугольника, образованного на основе соединения конечных точек двух отрезков. Алгоритм в равной степени применим к любым геометрическим формам препятствий.

Алгоритм не ставит ограничений на количество препятствий. Для случая близко расположенных препятствий, последние могут быть объединены. Если число БЛА больше одного, то точки пересечения линий их полета принимается как препятствия с учетом их скоростей и высот полета.

Литература

1. *Лазутин А.В.* Применение беспилотных летательных аппаратов в целях повышения эффективности систем жизнеобеспечения населения / А.В. Лазутин, Д.В. Рыбаков, А.В. Флоров, М.В. Шинкевич // Материалы Десятой Всероссийской научно-практической конференции «Перспективные системы и задачи управления» и Шестой молодежной школы-семинара «Управление и обработка информации в технических системах»: в 2 т. – Ростов н/Д.: Изд-во ЮФУ, 2015. – Т. 1. С. 58–61.

2. *Ahmed B.* Flight control of a rotary wing UAV using backstepping / В. Ahmed, Н.Р. Pota., М. Garratt // International Journal of Robust and Nonlinear Control. – 2009. – Vol. 20. – P. 639–658.

3. *Canny J.* An opportunistic global path planner / Canny J., Lin M. // Proceedings of the IEEE International Conference on Robotic and Automation, Cincinnati, OH, 13–18 May 1990. – Cincinnati, 1990. – P. 1554–1559.

4. *Kuchar J.* Review of conflict detection and resolution modeling methods / Kuchar J., Yang L. // IEEE Transactions on

Intelligent Transportation Systems. – 2000. – Vol. 1, N 4. – P. 179–189.

5. *Абросимов В.К.* Мониторинг объектов территорий группой интеллектуальных беспилотных летательных аппаратов / В.К. Абросимов, В.И. Гончаренко // Материалы Десятой Всероссийской научно-практической конференции «Перспективные системы и задачи управления» и Шестой молодежной школы-семинара «Управление и обработка информации в технических системах»: в 2 т. – Ростов н/Д.: Изд-во ЮФУ, 2015. – Т. 1. – С. 14–23.

6. *Yap P.* Grid-based path-finding/ Yap P. // Advances in Artificial Intelligence. Berlin Heidelberg: Springer, 2002. P. 44-55.

7. *Gaiduk A.R.* Self-organization in groups of intelligent robots / Gaiduk A.R., Kapustyayn S.G., Shapovalov I. O. // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2015. – Vol. 345. – P. 171–181.

8. Probabilistic roadmaps for path planning in high-dimensional configuration spaces / Kavraki L. E. et al // Robotics and Automation, IEEE Transactions on. 1996. V. 12. № 4. P. 566-580.

9. *Zhang X.* Online path planning for UAV using an improved differential evolution algorithm / Zhang X., Chen J., Xin B., Fang H. // Preprints of the 18th IFAC World Congress, Milano, Italy, 2011. – [S. 1.]: IFAC, 2011. – P. 6349–6354.

10. *Яковлев К.С.* Графовые модели в задачах планирования траектории на плоскости / Яковлев К.С., Баскин Е.С. // Искусственный интеллект и принятие решений. 2013. №1. С. 5-12.

11. *Осипов Г.С.* Интеллектуальное управление транспортными средствами: стандарты, проекты, реализации/ Осипов Г.С., Тихомиров И.А., Хачумов В.М., Яковлев К.С. // Авиакосмическое приборостроение. 2009. № 6. с. 34–43.

12. *White B.A.* UAV obstacle avoidance using differential geometry concepts/ White B.A., Shin H.S., Tsourdos A. // Pre-

prints of the 18th IFAC World Congress, Milano, Italy, 2011. – [S. 1.]: IFAC, 2011. – P. 6325–6330.

13. *Gaiduk A.R.* Self-organization in groups of intelligent robots/ Gaiduk A.R., Kapustyan S.G., Shapovalov I.O. // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. – 2015. – Vol. 345. – P. 171–181.

14. *Пшихопов В.Х.* Синтез адаптивных систем управления летательными аппаратами / Пшихопов В.Х., Медведев М.Ю. // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2010. – № 3 (104). – С. 187–196.

**Ага-Заде Сабина,
Бунямин Джийлан**

МЕТОД ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ ТРАЕКТОРИИ БЛА В МЕГАПОЛИСЕ ПРИ НАЛИЧИИ ПРЕПЯТСТВИЙ

Беспилотные летательные аппараты (БЛА) в последнее время привлекают внимание исследователей из-за их многочисленных потенциальных гражданских применений, в том числе возможность применение их в мегаполисе, которая в настоящее время посвящено огромный работы исследователей. Однако многие вопросы управления движением БЛА все еще остаются нерешенными. В частности, некоторые из этих вопросов актуальны для мегаполиса, где имеются объекты (такие как детские сады, школы, больницы и т.д.), над которыми полет беспилотных летательных аппаратов запрещён. Большая плотность застройки и сложная конфигурация рельефа мегаполиса требует особых научных и практических подходов для решения задач автоматического выполнения различных маневров БЛА для предотвращения полета над такого рода объектами.

Данная работа посвящена вопросам, связанным с решением задач планирования траектории управления полетом беспилотного летательного аппарата с обходом препятствий на имеющейся карте местности. В данной работе представлен простой алгоритм перепланирования желаемой траектории полета при обходе препятствий. Предложенный алгоритм для определения координат пересечения прямолинейных траектории БЛА с препятствиями (для случая прямоугольных препятствий) основан на свойствах выпуклого четырехугольника, образованного на основе соединения концевых точек двух отрезков. По предложенному алгоритму проведено вычислительный эксперимент. Для этого предполагается, что полет БЛА осуществляется от Научный факультет университета Гази к отделению Халгбанка при университете Гази. Используя приложения Google Map на карте города Анкары определяется объекты-препятствия. На основе предложенного алгоритма составлена программа на языке С#. В начале программы все координаты препятствий добавляются в базу данных. Далее по данному алгоритму определяются новые опорные точки и траектории. Алгоритм в равной степени применим к любым геометрическим формам препятствий и не ставит ограничений на количество препятствий. Для случая близко расположенных препятствий, они могут быть объединены.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, система управления, препятствия, планирование траектории, построение оптимальные пути, мегалополис, алгоритм, координат пересечения траектории с препятствиями, карта мегалополиса.

**Aga-Zade Sabina,
Bunyamin Jiilan**

METHOD OF UAV ROUTE PARAMETERS WHEN THERE ARE OBSTACLES IN MEGALOPOLIS

In recent years Unmanned Aerial Vehicle (UAV) more attract attention by researcher. This is due to the fact that they have many practice facility in the civil area, especially in the megalopolis. Despite enough work in this field, there are still many unsolved issues. Among issues, in the megalopolis more attract attention of route planning construction of UAVs' when flight are prohibited (kindergartens, schools, hospitals e.t.c). Density of construction sites, relief complexity requires special scientific and practical approaches problems for ensuring automatically movement of UAVs' by not passing through these prohibited territories. In this article is proposed a simple algorithm for reschedule the required trajectory avoiding obstacles when there is relief map. Algorithm is based on intersection of UAVs' line segmented trajectory and boundary of no flight zone polygonal area. In this case, specifications of creating convex tetragon was used if a polygon's any side intersects with line segmented flight trajectory. Based on the proposed algorithm were conducted calculation operations. It was assumed that UAV flying from Gazi University Facullity of Science to Gazi University Halkbank branch. Using Google Maps, we have identified areas where flights are prohibited from Ankara. Based on the proposed algorithm a program was developed in C# programming language. At the start of the program was entered determined based on the map coordinates of the prohibited territories into database. Based on the proposed algorithm determined a new flight trajectory. I would also like to point out that the algorithm can be applicable if prohibited territories are any geometric shapes. On the other hand, there are no restriction on the number of obstacles. If the obstacles are very close to each other, then the algorithm can be applicable by combining them.

Keywords: Unmanned Aerial Vehicle, flight trajectory, optimal path, megalopolis, algorithm, megalopolis map, obstacles.