

ЭВОЛЮЦИОННЫЙ ПОДХОД К ПЛАНИРОВАНИЮ МАРШРУТА БПЛА

С.А.К. Диане

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65
E-mail: diane1990@yandex.ru

А.В. Кузнецов

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65
E-mail: avkuz@bk.ru

Т.А. Шувалов

МИРЭА – Российский технологический университет
Россия, 119454, Москва, Вернадского просп., 78
E-mail: tashuvalov@gmail.com

Ключевые слова: БПЛА, мобильный робот, планирование траектории, эволюционное программирование, обход местности.

Аннотация: В работе анализируются существующие подходы к планированию маршрутов автономных мобильных роботов различного типа. Формализуется задача планирования пути для случая облета участка местности БПЛА с ограниченным зарядом бортового аккумулятора и возможностью подзаряда от наземной станции. Предлагается алгоритм разбиения участка местности на подобласти для однократного облета. Предлагается эволюционный алгоритм поиска маршрута БПЛА в пределах каждой из подобластей. Описаны результаты проведенных в разработанном программном обеспечении экспериментов по проверке эффективности предложенного подхода. Обсуждаются перспективы применения предложенного способа планирования маршрута БПЛА в сфере сельского хозяйства.

1. Введение

Планирование движений является одной из ключевых задач в области мобильной робототехники. Начиная с середины прошлого века, ведется активная разработка и обсуждение алгоритмов маршрутизации и траекторного управления для роботизированных платформ с различным конструктивным исполнением и варьируемым набором кинематических параметров [1-3].

Успехи в развитии методов оптимизации позволили применить целый ряд биоинспирированных подходов для разработки алгоритмического обеспечения роботов наземного и воздушного типа. Так, в частности, принципы эволюции и генетического программирования на протяжении нескольких десятилетий применяются для создания оптимальных траекторий передвижения роботов в различных средах и условиях [4].

В сельском хозяйстве эти алгоритмы применимы для управления автономными сельскохозяйственными машинами в задачах обработки почвы и сбора урожая. В то же время интерес для агропромышленного сектора представляют задачи планирования маршрутов беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), осуществляющих мониторинг выбранного участка местности.

В случае с применением БПЛА одной из технических проблем является необходимость минимизации времени, затрачиваемого на облет участка местности при ограниченности заряда аккумуляторной батареи. По этой причине в докладе обсуждается одна из версий задачи планирования пути покрытия, известной также как задача коммивояжера [5].

2. Разбиение многоугольника на фрагменты и подобласти

Пусть $D = \{p_1, \dots, p_N\} \subset \mathbb{R}^2$ – ограниченная область с границей в виде многоугольника ∂D . Агент A должен покрыть D попарно непересекающимися квадратами размера $s \times s$ за минимально возможное время, выходя из точки расположения сопровождающей мобильной платформы $p_0 = (x_0, y_0)$, на которой располагается зарядная станция.

Агент A имеет запас энергии E для того, чтоб двигаться по своему пути за время T , т. е. путь агента, движущегося с постоянной скоростью v , может иметь длину не более $l = vT$. Агент должен всегда возвращаться в точку p_0 по истечении времени T . Если D не может быть покрыта таким образом, то вместо p_0 агент может выбрать последовательно другие стартовые точки p_1, p_2, \dots, p_m для каждого выхода.

Предпочтительно, чтобы стартовые точки располагались вблизи границ многоугольника. Это обусловлено тем, что мобильная платформа, как правило, может перемещаться вдоль границ поля, но не заезжать вовнутрь. Альтернативно стартовая точка может располагаться в геометрическом центре многоугольника в целях обеспечения наилучшей достижимости точек в рамках исследуемой области.

Область видимость БПЛА ограничена и не позволяет покрыть весь участок местности одновременно с достижением требований по детализации аэрофотосъемки. Поэтому требуется разбить область D на набор фрагментов, каждый из которых задается соответствующей опорной точкой и размером s .

Алгоритм 1. Алгоритм разбиения многоугольника местности на фрагменты может быть представлен в следующей форме:

1. определение геометрического центра многоугольника по формуле:

$$p_c = \frac{\sum_{i=1}^N \|p_{(i+1) \bmod (N+1)} - p_i\| \cdot (p_{(i+1) \bmod (N+1)} + p_i)}{2 \sum_{i=1}^N \|p_{(i+1) \bmod (N+1)} - p_i\|},$$

2. определение характеристического радиуса участка местности как расстояния от центра многоугольника до наиболее удаленной его точки: $r = \max_{i=1}^N \|p_c - p_i\|$;
3. Выбор шага разбиения местности $s < r$;
4. построение ортогональной сетки разбиения как множества точек, расположенных в ограничивающей области $D_0 = [-r, r] \times [-r, r] \subset \mathbb{R}^2$ в позициях $q_{ij} = (i \cdot s, j \cdot s) \in D_0, i, j \in \mathbb{Z}$;
5. удаление точек q , не принадлежащих основной области D .

В ряде случаев ограниченность заряда аккумуляторной батареи БПЛА приводит к необходимости осуществления нескольких вылетов для покрытия заданной территории. При этом требуется разбивать исходный многоугольник местности на подобласти секторного типа, содержащие близкие по количеству наборы точек.

Алгоритм 2. Предлагаемый алгоритм для нахождения подмножеств опорных точек, относящихся к нескольким подобластям, имеет следующий вид:

1. задание начальной точки разбиения p_0 ;
2. выбор количества секторных подобластей $M \in \{2, \dots, 360\}$;
3. задание выходного множества секторных подобластей $S \leftarrow \emptyset$;

4. выбор шага приращения угла $\Delta\alpha \ll 360^\circ$;
5. расчет целевого количества точек в отдельном секторе $N_M \leftarrow \lfloor N/M \rfloor$;
6. инициализация переменной счетчика цикла $i \leftarrow 1$;
7. инициализация угла первого разделяющего луча $\alpha_1 \leftarrow \alpha_0$;
8. расчет угла второго разделяющего луча $\alpha_2 \leftarrow \alpha_1 + \Delta\alpha$;
9. если $\alpha_2 \geq 360^\circ$ и $|S| < M$, то вывод сообщения об ошибке и переход к шагу 16;
10. подсчет количества опорных точек N_s в секторе $s_i = \{p_0, \alpha_1, \alpha_2\}$;
11. если $N_s < N_M$, то $\alpha_2 \leftarrow \alpha_1 + \Delta\alpha$ и переход к шагу 10, иначе переход к шагу 12;
12. добавление сектора к выходному списку $S \leftarrow S, s_i$;
13. если $|S| < M$, то $i \leftarrow i + 1$, $\alpha_1 \leftarrow \alpha_2$, и переход к шагу 8, иначе переход к шагу 14;
14. выравнивание границ секторов: $\alpha_2 \in s_M \leftarrow \alpha_1 \in s_1$;
15. вывод точек $q \in s_j$ для $s_j \in S, j \in \{1, \dots, M\}$;
16. завершение алгоритма.

Принадлежность точек сектору на шагах 10 и 15 алгоритма 2 определяется по общеизвестным формулам тригонометрии.

Пример разбиения области на опорные точки и сектора приведен на рис. 1.

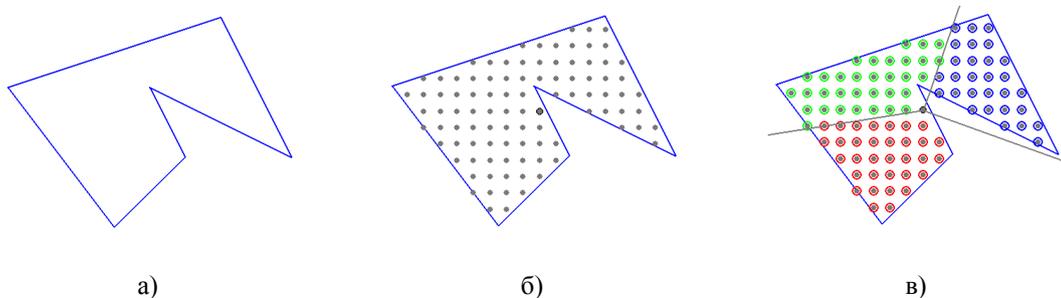


Рис. 1. Этапы разбиения области: а) исходный многоугольник; б) сформированные опорные точки вблизи центра многоугольника; в) найденные секторные подобласти.

Отметим, что результат разбиения зависит от начального угла α_0 , задаваемого на шаге 7 алгоритма 2. Дополнительно может быть выполнена оптимизация по выбору данного параметра. При этом в качестве целевого критерия предлагается использовать ту или иную меру компактности расположения точек в пределах секторов.

3. Эволюционный поиск маршрута БПЛА

При эволюционном подходе задача формализуется таким образом, чтобы каждое ее потенциальное решение (фенотип) могло быть представлено в виде набора параметров (генов) [6]. Для задачи поиска маршрута такими параметрами могут выступать индексы опорных точек местности, расположенные в определенной очередности.

В момент инициализации алгоритма создаётся множество генотипов начальной популяции – например, некоторые из возможных перестановок индексов, относящихся к опорным точкам местности. Затем генотипы оцениваются с использованием функции приспособленности, которая определяет насколько хорошо фенотип, сопряженный с генотипом, решает поставленную задачу.

При этом формула функции пригодности имеет следующий вид:

$$F = -\|q_a - q_1\| - \sum_{i=1}^{K-1} \|q_{i+1} - q_i\| - \|q_b - q_K\|,$$

где q_a – точка вылета БПЛА, q_b – точка посадки БПЛА, q_i – промежуточные точки маршрута БПЛА, совпадающие с опорными точками местности, K – количество опорных точек в маршруте.

Из множества решений, полученных на каждой итерации эволюционного процесса, выбираются лучшие по значению приспособленности особи, к которым применяются генетические операторы (скрещивание и/или мутация), результатом чего является получение новых решений. Для них также вычисляется значение приспособленности, после чего производится отбор лучших особей.

Оператор скрещивания, использованный в данной работе, представляет собой следующую последовательность действий:

- выбор множества $\mu_{1,n}$ – случайного подмножества n индексов, последовательно расположенных в генотипе 1-й особи;
- выбор множества $\mu_{2,n}$ – случайного подмножества n индексов, последовательно расположенных в генотипе 2-й особи;
- синхронная замена индексов в 1-й особи ($\mu_{1,n} \leftarrow \mu_{2,n}$) и 2-й особи ($\mu_{2,n} \leftarrow \mu_{1,n}$).

Оператор мутации, использованный в данной работе, представляет собой равновероятный выбор одного из следующих действий:

- перестановка индексов опорных точек в двух случайных позициях генотипа особи;
- инверсия порядка индексов между двумя случайными позициями генотипа особи;
- перемешивание порядка индексов между двумя случайными позициями генотипа.

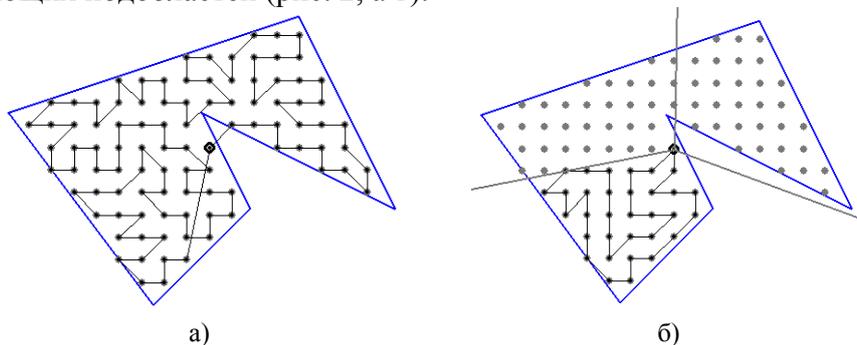
Примененный тип отбора особей – линейный ранговый (половина особей с наименьшими значениям пригодности удаляется).

Использованный способ репопуляции – элитарный в сочетании с линейным ранговым (одна родительская особь выбирается случайно из лучшей по пригодности трети популяции, а вторая – случайно из оставшихся особей).

4. Программная реализация планировщика

Для реализации предложенных алгоритмов был использован язык Python с подключением открытых библиотек Numpy, Pygame. На рис. 2 показаны результаты эволюционного поиска маршрута БПЛА в пределах заданного участка местности.

Траектория, найденная эволюционным алгоритмом и предназначенная для однопроходного сканирования местности (рис. 2, а), является чрезмерно протяженной и невыполнимой с учетом доступного энергоресурса БПЛА. По этой причине решение задачи потребовало формирования 3 более простых полетных заданий в пределах соответствующих подобластей (рис. 2, а-г).



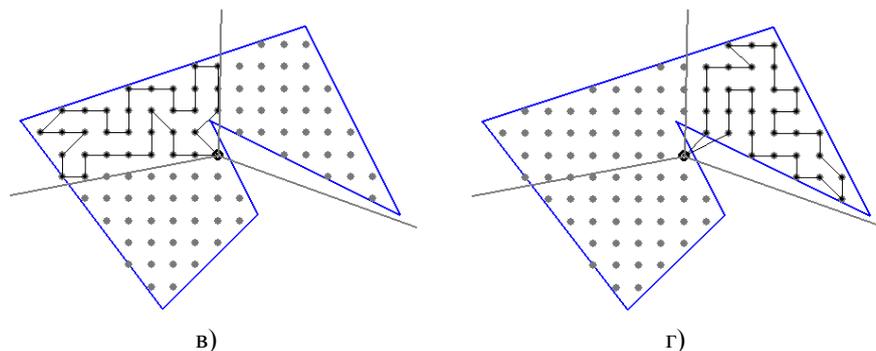


Рис. 2. Результаты решения общей и частных задач коммивояжера: а) решение для общей области ($L=2536$); б) решение для подобласти 1 ($L=856$); в) решение для подобласти 2 ($L=818$); г) решение для подобласти 3 ($L=814$).

5. Заключение

В работе были рассмотрены способы разбиения области с полигональной границей, так, чтоб в каждой части области существовало решение задачи коммивояжера с ограничениями на длину пути. Предложена и реализована схема эволюционного поиска маршрута БПЛА в пределах областей местности. Возможным развитием идей данной работы будет исследование варианта задачи с трехмерными областями или несколькими агентами, одновременно строящими пути покрытия и избегающими столкновений. Помимо этого, практическое значение имеет моделирование системы зарядки, погрузки и разгрузки агента и явный учет энергетических расходов на планирование траектории в постановке задачи.

Список литературы

1. Kuipers B., Feigenbaum E.A., Hart P.E., Nilsson N.J. Shakey: From Conception to History // AI Magazine. 2017. Vol. 38, No. 1. P. 88-103.
2. Santos L.C., Santos F.N., Solteiro Pires E.J., Valente A., Costa P., Magalhães S. Path Planning for ground robots in agriculture: a short review // Proc. of 2020 IEEE International Conference on Autonomous Robot Systems and Competitions (ICARSC). 2020. P. 61-66.
3. Gagan Gopi, Anwar Haque. 2023. Path Planning for Autonomous Drones: Challenges and Future Directions // Drones 7. 2023. No. 3, Is. 169.
4. Contreras-Cruz M.A., Ayala-Ramirez V., Hernandez-Belmonte U.H. Mobile robot path planning using artificial bee colony and evolutionary programming // Applied Soft Computing. 2015. Vol. 30. P. 319-328.
5. Кузнецов А.В. Задача планирования пути покрытия с ограничениями на длину пути и время // Труды 11-й Всероссийской научно-практической конференции «Имитационное моделирование. Теория и практика» (ИММОД-2023, Казань). Казань: АН РТ, 2023. С. 264-273.
6. Диане С.А.К., Исаков А.Ю., Исакова А.О. Алгоритм сетцентрического управления движением группы мобильных роботов // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2022. Т. 10, № 1. С. 1-11.