

DOI: 10.36910/6775-2524-0560-2020-38-10

УДК 004.942:519.876.5

Романюк Леонід Антонович, доцент, кандидат технічних наук

<https://orcid.org/0000-0002-2538-4026>

Чихіра Ігор Вікторович, доцент, кандидат технічних наук

<https://orcid.org/0000-0002-8615-3635>

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя.

АЕРОДИНАМІЧНА МОДЕЛЬ ГРУПИ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ У ПРОСТОРІ З ПЕРЕШКОДАМИ

Романюк Л. А., Чихіра І. В. Аеродинамічна модель групи безпілотних літальних апаратів у просторі з перешкодами. У статті досліджується аеродинамічна модель групи безпілотних літальних апаратів у просторі з перешкодами, побудову моделі здійснено на основі методів формування траєкторії Dubins та просторової теореми Піфагора, щодо годографа. У статті визначено, що одна з класичних траєкторій, яка використовується для маневру безпілотного літального апарату від однієї висоти до іншої це перетин круглої спіралі, яка проєктується на площину X-Y у вигляді кола. У порівнянні з теоремою Піфагора, щодо годографа, довжина траєкторії спіралі буде більше, ніж будь-яка інша та більш точна за формою траєкторії. Визначено проблему обходу перешкод та наведено схему Dubins шляхів двох безпілотних літальних апаратів у навколишньому середовищі з перешкодами. На основі зазначеної схеми описано алгоритм перепланування шляху БПЛА з регулюванням кривизни за допомогою проміжної точки, що винесено на другій схемі. Зазначається, що для застосування БПЛА, важливо, щоб безперервність кривизни була пропорційна бічному прискоренню БПЛА, як наслідок, необхідно мати контрольовану кривизну на кордонах кривих інтерполяції, а також накладати обмеження максимальної кривизни.

Ключові слова: безпілотний літальний апарат, перешкоди, простір, аеродинамічна модель, політ.

Романюк Л. А., Чихіра І. В. Аэродинамическая модель группы беспилотных летательных аппаратов в пространстве с препятствиями. В статье исследуется аэродинамическая модель группы беспилотных летательных аппаратов в пространстве с препятствиями, построение модели осуществлено на основе методов формирования траектории Dubins и пространственной теоремы Пифагора, по годографа. В статье определено, что одна из классических траекторий, которая используется для маневра беспилотного летательного аппарата от одной высоты к другой это пересечение круглой спирали, которая проецируется на плоскость X-Y в виде круга. По сравнению с теоремой Пифагора, по годографа, длина траектории спирали будет больше, чем любая другая и более точная по форме траектории. Определены проблему обхода препятствий и приведена схема Dubins путей двух беспилотных летательных аппаратов в окружающей среде с препятствиями. На основе указанной схемы описан алгоритм перепланировки пути БПЛА с регулировкой кривизны с помощью промежуточной точки, вынесен на второй схеме. Отмечается, что для применения БПЛА, важно, чтобы непрерывность кривизны была пропорциональна боковому ускорению БПЛА, как следствие, необходимо иметь контролируемую кривизну на границах кривых интерполяций, а также наложить ограничения максимальной кривизны.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, препятствия, пространство, аэродинамическая модель, полет.

Romaniuk L. A., Chykhira I. V. Aerodynamic model of a group of uavs in aircraft space. The article examines the aerodynamic model of a group of unmanned aerial vehicles in a space with obstacles, the model is built on the basis of the methods for forming the Dubins trajectory and the Pythagorean spatial theorem, according to the hodograph. The article determines that one of the classical trajectories that is used to maneuver an unmanned aerial vehicle from one height to another is the intersection of a circular spiral, which is projected onto the X-Y plane in the form of a circle. Compared with the Pythagorean theorem, according to the hodograph, the length of the spiral path will be longer than any other and more accurate in the shape of the path. The problem of avoiding obstacles is identified and the Dubins diagram of the paths of two unmanned aerial vehicles in an environment with obstacles is given. Based on this scheme, an algorithm for redevelopment of the UAV2 path with curvature adjustment using an intermediate point is described in the second scheme. It is noted that for the use of UAVs, it is important that the continuity of curvature is proportional to the lateral acceleration of the UAV, as a result, it is necessary to have controlled curvature at the boundaries of the interpolation curves, as well as impose restrictions on the maximum curvature.

Key words: unmanned aerial vehicle, obstacles, space, aerodynamic model, flight.

Вступ та постановка проблеми. В умовах реалізації планування шляхів групи безпілотних літальних апаратів (БПЛА), які з'єднують вибрані точки, обов'язковими є обмеження, які необхідно прийняти до уваги. Основним чинником обмеження є кривизна або радіус розвороту. Це, разом з плануванням найкоротшого шляху, вимагає розробки підходів, які прийматимуть це обмеження в розрахунок загального шляху та безпечної траєкторії групи БПЛА.

Досить часто, вигідно мати короткі шляхи, для того, щоб звести до мінімуму час польоту, а також знизити витрату палива, і пов'язану з ним енергію та потужність. Методи планування можуть бути розширені для отримання короткого шляху з більш довгих маршрутів з метою обходу перешкод або для синхронізації часу прибуття БПЛА. Алгоритми для проєктування найкоротших маршрутів

застосовуються в різних наукових сферах, таких як обчислювальна геометрія, дослідження операцій та логістика. Однією з добре досліджуваних проблем в обчислювальній геометрії є алгоритм знаходження найкоротшого маршруту, який було відкрито, ще у 1987 році. Задача комівояжера і китайського листоніші, широко вивчаються в галузі дослідження операцій, але вони будуються у вигляді графа і рішень не мають.

На сьогодні, при плануванні траєкторії польоту актуальними є три види шляхів: Dubins – шлях з дугами постійної кривизни; клотоїда – шляхи, які схожі з Dubins шляхами, але з дугами змінної кривизни; Піфагора – годограф (PH) шляху. Кожен з них володіє низкою переваг та недоліків однак у моделюванні шляху БПЛА застосування їх є необхідною умовою.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В поточному десятилітті спостерігається стійке зростання досліджень і розробок щодо аеродинамічного моделювання за напрямком безпілотних літальних апаратів.

Низка авторів Р.О. Беляков, Г.Д. Радзівілов, О.Д. Фесенко, В.В. Васильченко, О.Г. Цатурян, А.В. Шишацький, В.П. Романенко [1] розробили методіку побудови інтелектуальної системи автоматичного управління безпілотним літальним апаратом для мінімізації похибки безплатформної інерціальної навігаційної системи за рахунок застосування нейронної мережі.

Д.І. Бондарев, Д.П. Кучеров, Т.Ф. Шмельова [2], дослідили головні аспекти оптимізації системи управління легкого безпілотного літального апарату за частотним критерієм, математично обґрунтував вибір напрямку руху та обхід перешкод.

Систему інформаційно-вимірювальну та управляючу малорозмірного безпілотного літального апарату підвищеної точності, обґрунтували схемами та розрахунком Д.І. Бондарев, Р.Т. Джафарзаде та А.М. Козуб [3].

Стосовно моделювання кінематики та динаміки польоту БПЛА, варто відмітити роботи Ю. Г. Даника, І. І. Балицького, [4] та І. С. Катеринчука, Ю. Г. Даника та І. І. Балицького [5]. Автори детально описують можливість застосування автоматичного управління системою навігації БПЛА в умовах перешкод та механізми формування траєкторії польоту.

Із зарубіжних вчених варто відмітити роботи С. Mu, D. Wang [6], Z. Lin, D. Ma, J. Meng, L. Chen [7], J. Yu, J. Sang, X. Gao [8], Y. Lv, J. Na, Q. Yang [9], Y. Sun, B. Xue, M. Zhang, G. G. Yen [10] та інші.

Незважаючи на масштабність наукових досліджень у сфері аеродинамічного моделювання за напрямком безпілотних літальних апаратів, згадана тема залишається вивченою не повною мірою та потребує подальших досліджень.

Постановка завдання. У статті необхідно розробити аеродинамічну модель групи безпілотних літальних апаратів у просторі з перешкодами.

Виклад основного матеріалу дослідження. Використання двовимірного планування маршруту часто зустрічається у літературі [3, 5]. Це може бути пов'язане з невеликою кількістю досліджень планування маршруту наземних роботів, тим не менш, при роботі з літальними апаратами, до площини руху необхідно додати висоту у розрахунках маневрів в космосі. З точки зору планування траєкторії, початок у плануванні шляху залишається аналогічним початковому, тобто, параметри однакові у початковій та кінцевій точках. Фактично є три просторові координати (x , y , z), і три кутові орієнтації, (крену, тангажу, нишпорення).

Дослідження проведене на прикладі двох методів:

- I) траєкторія Dubins;
- II) просторова теорема Піфагора щодо годографа (далі – PH).

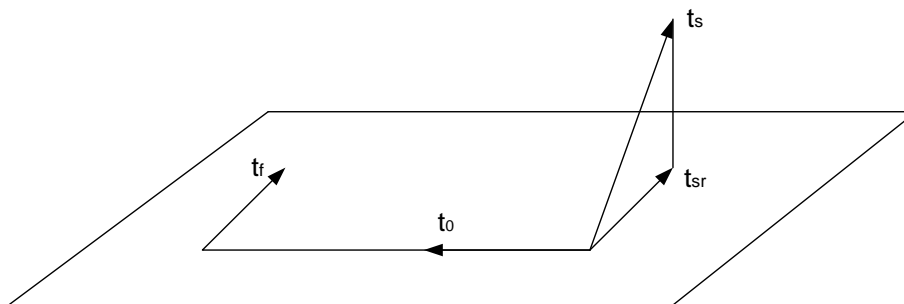


Рис. 1 Тривимірні умови маневру Dubins [11]

Один з варіантів методу «відрізок – дуга» – це метод Dubins. Цей метод згладжування полягає в заміні прилеглих до кута ламаної частин відрізків дуги кола. Відзначимо, що, хоча шлях по методу Dubins згладжується, кривизна цього шляху є розривною, розриви виникають в точках з'єднання відрізків і дуг кіл.

Тривимірний шлях польоту $r(q)$ можна отримати за допомогою рішення наступного рівняння:

$$\begin{aligned} P_s(x_s, y_s, z_s, \theta_s, \psi_s) &\xrightarrow{r(q)} P_f(x_f, y_f, z_f, \theta_f, \psi_f) \\ |k(t)| < k_{max}, |\tau(t)| < \tau_{max} \end{aligned} \quad (1)$$

де $\tau(t)$ – кривизна;

$k(t)$ – кручення траєкторії;

$r(q)$ – шлях польоту;

$x_s, y_s, z_s, x_f, y_f, z_f$ – координати початку та кінця шляху відповідно;

$\theta_s, \psi_s, \theta_f, \psi_f$ – кути повороту початку та кінця шляху відповідно;

Одна з класичних траєкторій, що використовується для маневру безпілотного літального апарату від однієї висоти до іншої є перетин круглої спіралі, яка проектується на площину X-Y у вигляді кола. Траєкторію можна представити як намотування на поверхню вертикального циліндра. Важливою властивістю цієї кривої є те, що і кривизна і кручення постійні, що у сукупності дає радіус циліндра і виток спіралі. У порівнянні з РН, довжина траєкторії спіралі буде більше, ніж будь-яка інша та більш точна за формою траєкторії.

Узагальненням двох методів є теорема.

Теорема 1. Якщо два дотичних вектора t_s і t_f з'єднані лінією вектора t_0 , як показано на рис. 1, то маневр може бути виконаний за умови, якщо всі вектори лежать в одній площині.

Рисунок 1 показує, що два дотичні вектори знаходяться в різних площинах, а початок дотичного вектора t_s не лежить в площині, яка визначається двома векторами t_f і t_0 .

Для отримання траєкторії польоту, необхідно визначити початковий маневр дуги, що торкається дотичного вектору t_s в площині, щоб отримати t_{sr} . Це буде гарантувати, що цей вектор знаходиться в одній площині з t_f і t_0 . Траєкторію Dubins можна обчислити за допомогою повернутого вектора t_{sr} в якості нового вектора початку дотичної. Нормальний вектор n_{sr} може бути визначений як норма до дотичного вектора, а також такий, що лежить в площині, яка визначається t_f і t_0 . Бінормаль вектору b_{sr} складає праву трійку.

Початкова траєкторія буде складатися з комбінованої кривизни траєкторії щодо вектору бінормалі, з подальшим креном, щоб вибудувати нормальні і бінормальні вектори, для формування остаточної траєкторії Dubins. Тому траєкторія Dubins складається з однієї площини кола траєкторії з визначенням кривизни k_s , з нормального запуску траєкторії кола з визначенням кривизни k_s та прямолінійної траєкторії і, нарешті, закінчення траєкторії кола з визначенням кривизни k_f .

Застосування методу Dubins полягає у диференційно-геометричних концепціях, метод просторової траєкторії Піфагора РН, отримують з використанням першого порядку ермітової інтерполяції. Отримана траєкторія додатково налаштована на збільшення траєкторії польоту БПЛА шляхом збільшення довжини граничних дотичних векторів.

Початок маневру може бути визначений з урахуванням осьової лінії між двома положеннями. З точки зору кожної позиції, позитивне чи негативне обертання від дотичного вектора до центрального вектора буде визначено знаком кривизни для кожного маневру. На початку маневру і на його фініші БПЛА здійснюється поворот відповідно до дотичного вектора t_s . Таким чином:

$$\begin{aligned} [t_{ms}, n_{ms}, b_{ms}] &= [t_s, n_s, b_s] R_s \\ [t_{mf}, n_{mf}, b_{mf}] &= [t_f, n_f, b_f] R_f \end{aligned} \quad (2)$$

де

$$R_s = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\phi_s) & -\sin(\phi_s) \\ 0 & \sin(\phi_s) & \cos(\phi_s) \end{pmatrix}$$

$$R_f = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\phi_f) & -\sin(\phi_f) \\ 0 & \sin(\phi_f) & \cos(\phi_f) \end{pmatrix} \quad (3)$$

ϕ_s і ϕ_f – кути повороту для початкових і фінішних маневрів літака.

Радіус-вектори може бути визначено, як

$$r_s = [t_{ms}, n_{ms}, b_{ms}] \begin{pmatrix} 0 \\ \pm 1/k_s \\ 0 \end{pmatrix} \quad (4)$$

і, аналогічно,

$$r_f = [t_{mf}, n_{mf}, b_{mf}] \begin{pmatrix} 0 \\ \pm 1/k_f \\ 0 \end{pmatrix} \quad (5)$$

Базисні вектори пов'язані

$$[t_f, n_f, b_f] = [t_s, n_s, b_s]R \quad (6)$$

де R є матрицею обертання на яку потрібно змінити вісь від початку до фінішу.

Таким чином, маємо

$$R = (t_f, n_f, b_f) \cdot (t_s, n_s, b_s) \quad (7)$$

звідси

$$R = \begin{pmatrix} t_f \cdot t_s & t_f \cdot n_s & t_f \cdot b_s \\ n_f \cdot t_s & n_f \cdot n_s & n_f \cdot b_s \\ b_f \cdot t_s & b_f \cdot n_s & b_f \cdot b_s \end{pmatrix} \quad (8)$$

З'єднувальні вектори утворюють ортогональний набір векторів. Кожен вектор лежить у відповідній площині маневру, які не збігаються. Внутрішній з'єднувальний вектор є загальним для обох маневрів БПЛА. Таким чином, можна записати у вигляді:

$$\alpha_s = a[t_{ms} \quad n_{ms} \quad b_{ms}]\alpha_s$$

$$\alpha_f = a[t_{mf} \quad n_{mf} \quad b_{mf}]\alpha_f \quad (9)$$

з

$$\alpha_s = \begin{pmatrix} \alpha_{ts} \\ \alpha_{ns} \\ \alpha_{bs} \end{pmatrix} \text{ та } \alpha_f = \begin{pmatrix} \alpha_{tf} \\ \alpha_{nf} \\ \alpha_{bf} \end{pmatrix} \quad (10)$$

Репер Френе для двох площин маневру пов'язано з

$$[t_f \quad n_f \quad b_f] = [t_s \quad n_s \quad b_s]R,$$

$$[t_{mf} \quad n_{mf} \quad b_{mf}] = [t_f \quad n_f \quad b_f]R_f,$$

$$[t_{ms} \quad n_{ms} \quad b_{ms}] = [t_s \quad n_s \quad b_s]R_s. \quad (11)$$

Через

$$[t_{ms} \quad n_{ms} \quad b_{ms}]R'_s = [t_s \quad n_s \quad b_s],$$

$$[t_{mf} \quad n_{mf} \quad b_{mf}]R'_f = [t_f \quad n_f \quad b_f] = [t_s \quad n_s \quad b_s]R = [t_{ms} \quad n_{ms} \quad b_{ms}]R'_s R \quad (12)$$

та

$$[t_{mf} \quad n_{mf} \quad b_{mf}] = [t_{ms} \quad n_{ms} \quad b_{ms}]R'_s R R_f \quad (13)$$

Це означає, що

$$\alpha_s = R'_s R R_f \alpha_f$$

$$\alpha_f = R'_f R R_s \alpha_s \quad (14)$$

Радіус-вектори R_s і R_f також можуть бути описані в осях початку маневру, як

$$\begin{aligned} r_s &= [t_{ms}, n_{ms}, b_{ms}] \begin{pmatrix} 0 \\ \pm 1/k_s \\ 0 \end{pmatrix} \\ r_f &= [t_{ms}, n_{ms}, b_{ms}] R'_s R R_f \begin{pmatrix} 0 \\ \pm 1/k_f \\ 0 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (15)$$

Вектори також можуть бути визначені в осях початку маневру, у вигляді

$$\begin{aligned} \alpha_s &= \pm 1/k_s [t_{ms}, n_{ms}, b_{ms}] \beta_s, \\ \alpha_f &= \pm 1/k_f [t_{mf}, n_{mf}, b_{mf}] \beta_f, \\ \alpha &= \pm 1/k_f [t_{ms}, n_{ms}, b_{ms}] R'_s R R_f \beta_s \end{aligned} \quad (16)$$

Довжина шляху Dubins це сума довжини цих сегментів яка задається як

$$h_{\text{Довжина шляху Dubins}} = h_i + h_s + \alpha_t + h_f = \alpha_i/k_s + \alpha_s/k_s + \alpha_f/k_f \quad (17)$$

де h – це довжина шляху;

s, t і f – початкова дуга шляху, загальна довжина шляху, кінцева дуга шляху;

i – сегмент дуги;

α – кут дуги;

k – кручення.

Шлях РН забезпечує зміщення кривої у замкнутій формі поліномів.

Рівняння (18) є багаточленом розробленим для інтерполяції вільних векторів на кордоні. Вільні вектори мають позиції (x, y, z) і напрям (θ, ψ) в просторі. Крива інтерполяції двох таких векторів називається інтерполяцією Ерміта. Отримана крива матиме дотичну спадкоємність, але не спадкоємність кривизни. Для застосування БПЛА, важливо, щоб безперервність кривизни була пропорційна бічному прискоренню БПЛА. Таким чином, необхідно мати контрольовану кривизну на кордонах кривих інтерполяції, а також накласти обмеження максимальної кривизни.

$$Q(q) = \sum_{i=0}^2 Q_i \binom{2}{i} q^i (1-q)^{2-i}, \quad q \in [0,1] \quad (18)$$

Це дозволить забезпечити рівний шлях БПЛА. Тепер, крива РН представлена в п'ятому порядку поліноміальної форми як

$$r(q) = \sum_{k=0}^5 b_k \binom{5}{k} q^k (1-q)^{5-k}, \quad q \in [0,1] \quad (19)$$

де $b_k = (x_k, y_k, z_k)$ – контрольні точки, вершини яких визначає управління багатокутника Безьє з $k = 0, \dots, 5$.

Початковими і кінцевими конфігураціями є $p_s(x_s, y_s, z_s, \theta_s, \psi_s)$ і $p_f(x_f, y_f, z_f, \theta_f, \psi_f)$, відповідно. Чотири контрольні точки полігонів Безьє розраховується шляхом ермітової інтерполяції першого порядку наступним чином:

$$\begin{aligned} b_0 &= (x_s, y_s, z_s), \\ b_5 &= (x_f, y_f, z_f), \\ d_0 &= m_0 [\cos(\theta_s) \cos(\psi_s), \cos(\theta_s) \sin(\psi_s), \sin(\theta_s)], \\ d_5 &= m_5 [\cos(\theta_f) \cos(\psi_f), \cos(\theta_f) \sin(\psi_f), \sin(\theta_f)], \\ b_1 &= b_0 + \frac{1}{5} d_0, \\ b_4 &= b_5 + \frac{1}{5} d_5, \end{aligned} \quad (20)$$

При орієнтації використано сферичні координати. Константи m_0 і m_5 відіграють вирішальну роль у складанні кривої інтерполяції.

Проблема обходу перешкод тісно пов'язана з плануванням шляху, тому що наявність перешкод, як правило, призводить до перепланування шляхів. Планування шляху з обходом перешкод в 3D є більш

складним, тому що при такому плануванні є нескінченно багато напрямків для маневрів як для БПЛА так і для перешкод.

Для того, щоб маневрувати в навколишньому середовищі, яке повно перешкод, БПЛА повинен бути здатний обчислити траєкторії, які будуть плавати навколо цих перешкод і повинен бути здатний приходити до кінцевої точки. Отже, є вимога, обчислити композитні траєкторії Dubins, які включають маневри ухилення. У разі виникнення єдиної перешкоди, що перетинає прямолінійний сегмент стандартної траєкторії Dubins, два варіанта уникнення траєкторії повинні бути розраховані для кожної перешкоди. Так як стандартна траєкторія Dubins складається з п'яти сегментів, з початкових, проміжних і кінцевих маневрів дуги, разом з двома прямими відрізками. У початковій і кінцевій дузі маневри модифіковано, щоб відрізки були дотичними до перешкоди кола.

Якщо БПЛА виявляє перешкоду за допомогою датчика, розташованого на борту, літак повинен повторно спланувати шлях або шляхом зміни кривизни між двома точками розглянутого випадку або перепланувати шлях з використанням проміжної точки. Перешкоди проходять перевірку визначення, якщо радіус перешкоди перетинає траєкторію або «безпеку» БПЛА. Якщо радіус перешкоди не перетинає траєкторію БПЛА, то перепланування не потрібно. Це може бути зроблено або шляхом збільшення кривизни траєкторії, або шляхом створення проміжної точки і з модельовано новий шлях, який включає в себе нову колійну точку.

Якщо припустити, що $O_{\text{перешкода}}$ є перешкодою у радіусі безпеки БПЛА $O_{\text{безпека}}$, то умовою для уникнення зіткнення буде

$$O_{\text{перешкода}} \cap O_{\text{безпека}} = \emptyset \quad (21)$$

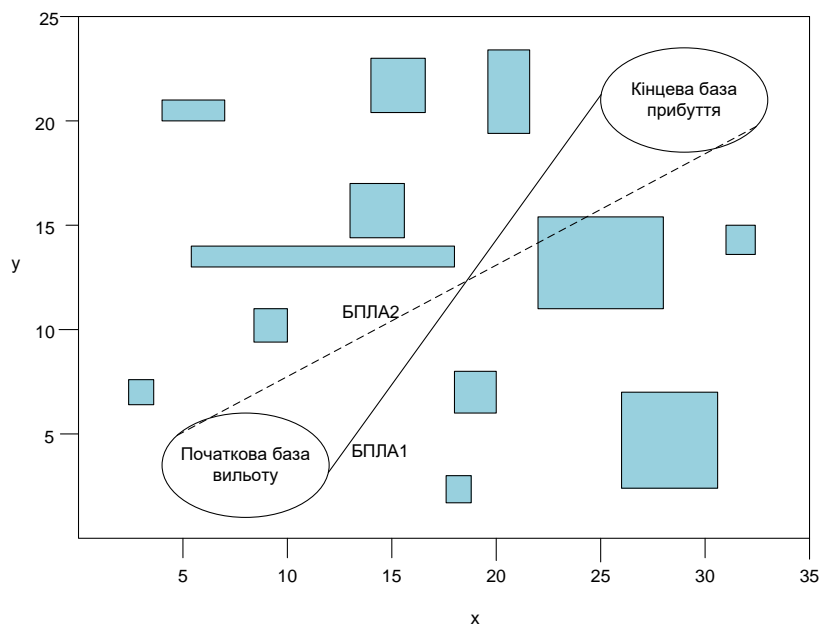
Схема для середовища повного перешкод показана на рис. 2.

Перешкоди моделюються у вигляді багатокутників, області та координати яких відомі. Планування шляху групи безпілотних літальних апаратів можна записати у вигляді:

$$P_{s,i,j-1}(x_{s,i,j-1}, y_{s,i,j-1}, \theta_{s,i,j-1}) \xrightarrow{r_{i,j-1}(q)} P_{f,i,j}(x_{f,i,j}, y_{f,i,j}, \theta_{f,i,j}) \quad (22)$$

$$i = 1, \dots, n_{\text{БПЛА}}, \quad j = 2, \dots, n_p, \quad |k_i(q)| < k_{\text{max}}, \quad \Pi_{\text{безпека}}, \quad \Pi_{\text{довжина}} \quad (23)$$

$n_{\text{БПЛА}}$ – це число безпілотних літальних апаратів,



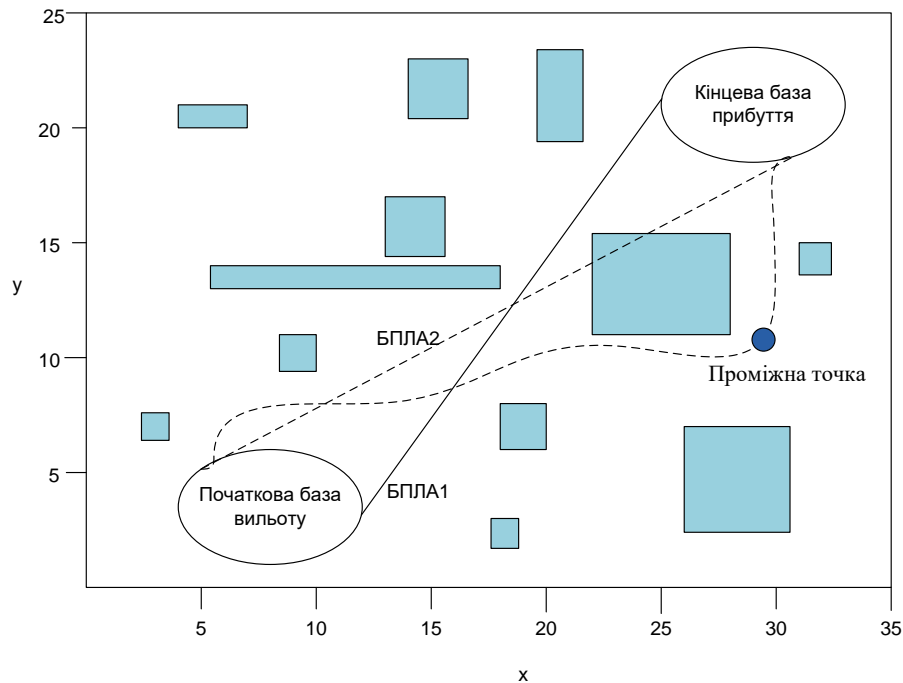
*розробка автора на основі [4,8]

Рис. 2 Dubins шляхи двох безпілотних літальних апаратів у навколишньому середовищі з перешкодами

Для реалізації алгоритму приймемо два БПЛА. Обидва БПЛА є однорідними за своїми фізичними можливостями, і, отже, вони обидва рухаються з однією швидкістю і мають обмеження кривизни.

Рисунок 2 показує траєкторії двох безпілотних літальних апаратів у навколишньому середовищі з перешкодами. Шлях польоту другого безпілотного літального апарату БПЛА2 перетинає перешкоду і шлях польоту першого безпілотного літального апарату БПЛА1. Кривизна дуги шляху Dubins різноманітна щоб уникнути радіус загрози. Рисунок 3 показує, новий безпечний шлях після збільшення кривизни траєкторії БПЛА2, для рішення тієї ж задачі за допомогою проміжної точки.

Після того, як перешкоду перетину було виявлено, проміжні точки генерується.



*розробка автора на основі [4,8]

Рис. 3 Перепланування шляху БПЛА2 з регулюванням кривизни за допомогою проміжної точки

Перетин шляхів визначається інтерактивно для клотоїди дугових сегментів, а перетини ліній з еліпсів можуть бути виявлені за допомогою простої геометрії.

Проміжний шлях проводиться для кожного перехрестя в межах зони радіусу перешкоди. Після цього, шляхи переплановуються, щоб пройти через нові точки моделювання шляху БПЛА.

Висновки. У статті розкрито методику побудови аеродинамічної моделі групи безпілотних літальних апаратів у просторі з перешкодами. Наведена модель є вдосконаленою методикою побудови траєкторії польоту БПЛА в умовах перешкод. Аеродинамічної моделі, що описана, може бути використана, у якості стійкої моделі групи БПЛА в умовах формування траєкторії польоту.

Алгоритм побудови аеродинамічної моделі групи безпілотних літальних апаратів у просторі з перешкодами є стійким до зовнішніх та внутрішніх впливів. Запропонована методика значно скорочує час проектування, та витрати на проектування. А результат моделювання є дієвим та безпомилковим.

Список бібліографічного опису

1. Методика побудови інтелектуальної системи автоматичного керування безпілотним літальним апаратом / Р.О. Беляков, Г.Д. Радзівілов, О.Д. Фесенко, В.В. Васильченко, О.Г. Цатурян, А.В. Шишацький, В.П. Романенко. [Текст]: Радіоелектроніка, інформатика, управління. 2019. – № 1. – С. 218-229.
2. Бондарев Д.І. Моделі групових польотів безпілотних літальних апаратів з використанням теорії графів / Д.І. Бондарев, Д.П. Кучеров, Т.Ф. Шмельова. [Текст]: Наука і техніка Повітряних сил Збройних сил України. – 2015. – Вип. 3(20). – С. 68–75.
3. Бондарев Д.І. Ефективність групових польотів безпілотних літальних апаратів / Д.І. Бондарев, Р.Т. Джафарзаде, А.М. Козуб. [Текст]: Системи обробки інформації. – Х.: ХУПС, 2014. – Вип. 6 (122). – С. 9-14.
4. Даник Ю. Г., Балицький І. І. Методика визначення околу безпеки безпілотних літальних апаратів / Ю. Г. Даник, І. І. Балицький. Наукоємні технології – 2018. – № 4(40). – С. 526–534.

5. Даник Ю. Г., Катеринчук І. С., Балицький І. І. Методика забезпечення безпеки застосування БПЛА при виконанні спеціальних задач в складних умовах. Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони. 2017. – №3(30). – С. 80–89.
6. Mu C. Neural-network-based adaptive guaranteed cost control of nonlinear dynamical systems with matched uncertainties / C. Mu, D. Wang. *Neurocomputing*. – 2017. – Vol. 245. – P. 46–54.
7. Lin Z. Relative ordering learning in spiking neural network for pattern recognition / Z. Lin, D. Ma, J. Meng, L. Chen. *Neurocomputing*. – 2018. – vol. 275. – P. 94–106.
8. Yu J. Machine learning and signal processing for big multimedia analysis / J. Yu, J. Sang, X. Gao. *Neurocomputing*. – 2017. – Vol. 257. – P. 1–4.
9. Online adaptive optimal control for continuous-time nonlinear systems with completely unknown dynamics / [Y. Lv, J. Na, Q. Yang et al.]. *International Journal of Control*. – 2016. – Vol. 89. – P. 99–112.
10. Automatically Designing CNN Architectures Using Genetic Algorithm for Image Classification / [Y. Sun, B. Xue, M. Zhang, G. G. Yen]. *Cornell University Libreri*. – Electronic data. – 2018. – Mode of access: <https://arxiv.org/abs/1808.03818>
11. Вибір оптимальної траєкторії польоту повітряного судна [Електронний ресурс] / В. С. Паламарчук, О. В. Полохович, О. Є. Луппо. *Вимірювальна та Обчислювальна Техніка в Технологічних Процесах*, 2015. – № 4'(53). – С. 180-185.

References

1. The Technique of Building an Intelligent System for Automatic Control of an Unmanned Aerial Vehicle / RO Bieliakov, HD Radzivilov, OD Fesenko, VV Vasylenko, OH Tsaturian, AV Shyshatskyi, VP Romanenko. [Text]: *Radio Electronics, Computer Science, Control*. – 2019. – No. 1– P. 218-229.
2. Bondarev DI, Kuchero, DP, Shmelova TF. Group Flight Models of Unmanned Aerial Vehicles Using Graph Theory. [Text]: *Science and Technology of the Air Force of Ukraine*. – 2015. – Is. 3 (20). – P. 68–75.
3. Bondariev DI, Dzhafarzade RT, Kozub, AM. Efficiency of Group Flights of Unmanned Aerial Vehicles. [Text]: *Information Processing Systems, KNAFU*. – 2014. – Is. 6 (122). – Pp. 9-14.
4. Danik YuH, Balytskyi II. Methods of Determining the Safety Environment of Unmanned Aerial Vehicles // *Science-based Technologies*. – 2018. – No. 4 (40). – P. 526–534.
5. Danyk YuH, Katerynychuk IS, Balytskyi II. Methods of Ensuring the Safety of the Use of UAVs when Performing Special Tasks in Difficult Conditions / YuH Danyk, IS Katerynychuk, II Balytskyi. *Modern Information Technologies in the Sphere of Security and Defence*. – 2017. – No. 3 (30). – P. 80–89.
6. Mu C. Neural-network-based adaptive guaranteed cost control of nonlinear dynamical systems with matched uncertainties / C. Mu, D. Wang. *Neurocomputing*. – 2017. – Vol. 245. – P. 46–54.
7. Lin Z. Relative ordering learning in spiking neural network for pattern recognition / Z. Lin, D. Ma, J. Meng, L. Chen. *Neurocomputing*. – 2018. – Vol. 275. – P. 94–106.
8. Yu J. Machine learning and signal processing for big multimedia analysis / J. Yu, J. Sang, X. Gao. *Neurocomputing*. – 2017. – Vol. 257. – P. 1–4.
9. Online adaptive optimal control for continuous-time nonlinear systems with completely unknown dynamics / Y. Lv, J. Na, Q. Yang et al. *International Journal of Control*. – 2016. – Vol. 89. – P. 99–112.
10. Automatically Designing CNN Architectures Using Genetic Algorithm for Image Classification / Y. Sun, B. Xue, M. Zhang, G. G. Yen]. *Cornell University Libreri*. – Electronic data. – 2018. – Mode of access: <https://arxiv.org/abs/1808.03818>
11. Choice of the Optimal Flight Path of an Aircraft [Electronic resource] / VS Palamarchuk, OV Poliukhovych, OYe Luppo. *Measurement and Computing Hardware in Technological Processes*, 2015. – No. 4'(53). – P. 180-185.

Стаття надійшла 05.02.2020р.