

УДК 004.942:519.876.5

Л. Романюк, канд. техн. наук, доц., І. Чихіра, канд. техн. наук, доц.  
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

## МЕТОД DUBINS ДЛЯ АЕРОДИНАМІЧНОЇ МОДЕЛІ ГРУПИ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

L. Romaniuk, Ph.D., Assoc. Prof., I. Chykhira, Ph.D., Assoc. Prof.  
DUBINS METHOD FOR AERODYNAMIC MODELS OF UAVES GROUP

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.

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  $(x, y, z)$  та три кутові орієнтації, (крену, тангажу, нишпорення).

Дослідження проведене на прикладі двох методів:

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

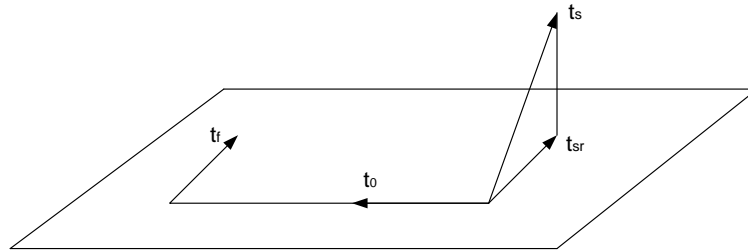


Рисунок 1 – Тривимірні умови маневру Dubins [9]

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 розв'язку наступного рівняння:

$$P_s(x_s, y_s, z_s, \theta_s, \psi_s) \frac{r(q)}{P_f(x_f, y_f, z_f, \theta_f, \psi_f)} \quad (1)$$

$$|k(t)| < k_{\max}, \quad |\tau(t)| < \tau_{\max} \quad (2)$$

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.

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  $t_f$  та  $t_0$ .

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  $t_f$  та  $t_0$ . 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  $t_f$  та  $t_0$ . Бінормаль вектора  $b_{sr}$  складає праву трійку.

Початкова траєкторія буде складатися з комбінованої кривизни траєкторії щодо вектору бінормалі, з подальшим креном, щоб вибудувати нормальні та бінормалі 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  $i$ , нарешті, закінчення траєкторії кола з визначенням кривизни  $k_f$ .

### Література

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. Романюк Л., Чихіра І. Аеродинамічна модель групи безпілотних літальних апаратів у просторі з перешкодами // Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво. – Луцьк, 2020. – Вип. 38. – С. 59–66. <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2020-38-10>.
4. 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.
5. 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.
6. Yu J. Machine learning and signal processing for big multimedia analysis / J. Yu, J. Sang, X. Gao // Neurocomputing. – 2017. – Vol. 257. – P. 1–4.
7. 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.
8. 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>
9. Вибір оптимальної траєкторії польоту повітряного судна [Електронний ресурс] / В. С. Паламарчук, О. В. Полюхович, О. Є. Луппо // Вимірювальна та Обчислювальна Техніка в Технологічних Процесах, 2015. – № 4'(53). – С. 180–185.