

І. М. Ганношина¹, Д. О. Пархоменко²

¹Київський інститут водного транспорту імені гетьмана Конашевича-Сагайдачного, Київ, Україна

²Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна

МЕТОД РОЗРАХУНКУ ТРАЄКТОРІЇ РУХУ СУДНА ПРИ АВТОМАТИЗОВАНОМУ ВИЗНАЧЕННІ МАРШРУТУ

Аналіз процесу визначення траєкторії руху судна показав необхідність забезпечення властивостей траєкторії: обмеження на максимальну кривизну траєкторії; безперервність траєкторії та її двох перших похідних, щоб планована траєкторія в просторі була гладкою; можливість локально корегувати траєкторію в реальному масштабі часу, тобто на певній ділянці, без перерахунку всієї траєкторії. **Мета статті** полягає в розробці методу розрахунку траєкторії руху судна при автоматизованому визначенні маршруту, в якому траєкторія руху судна знаходиться у вигляді кривої що проходить крізь елементи простору (або точки простору), які відібрані автоматизованим методом вибору маршруту судна при плануванні переходу та забезпечує можливість її корекції в реальному масштабі часу. **Результати.** Запропоновано метод розрахунку траєкторії руху судна при автоматизованому визначенні маршруту, в якому траєкторія руху судна знаходиться у вигляді кривої що проходить крізь елементи простору (або точки простору), які відібрані автоматизованим методом вибору маршруту судна при плануванні переходу. Пропонується будувати криву з послідовності поліномів. В якості сегментів обираються раціональні криві Безьє 7-го ступеня, на які накладаються додаткові умови кривини в початковій та кінцевій точках, для забезпечення безперервності кривини траєкторії.

Ключові слова: маршрут, автоматизація процесу визначення маршруту, траєкторія руху судна, раціональні криві Безьє, безперервність кривини траєкторії.

Вступ

Постановка проблеми. Умовою забезпечення безпеки морського судноплавства є обґрунтоване й своєчасне прийняття рішення про траєкторію руху судна при плануванні переходу і її корекція в реальному масштабі часу. Автоматизоване визначення маршруту судна, дозволяє розрахувати елементи простору (або точки простору), які складають маршрут, з врахуванням факторів навігаційно-гідрографічної обстановки та маневрених характеристик судна.

Дослідження [1-2] показують, що траєкторії, що застосовуються для завдання руху судна повинні відповідати таким вимогам:

- мати єдині принципи завдання і формування;
- координати точок траєкторії і їх зміна повинні лежати в межах геометричних і фізичних обмежень маневрування, що враховують можливість гальмування або розгону, або зміни напрямку руху, тобто траєкторія повинна бути фізично реалізованою;
- характерні точки траєкторії повинні знаходитися не рекурентним способом з відсутністю непотрібних рухів типу "блукання";
- допустима траєкторія повинна враховувати динаміку судна і виконавчих пристроїв (гвинт, кермо), тобто повинна двічі безперервно диференціюватися (неможливо миттєво переключити кермо на заданий кут або набрати задану частоту обертання гвинта, кутову швидкість обертання). Якщо на малих швидкостях інерційністю органів управління нехтують, то для високих швидкостей прийнятна точність неможлива без урахування даної фізичної особливості;

– необхідно враховувати обмеження на максимальну кривизну траєкторії (мінімальний радіус кривизни траєкторії), відповідно граничним переключкам керма; максимальної потужності рушії і пристрою, що підрулює; упору, створюваному буксирами. Динамічні властивості судовій керуючій системі задаються у вигляді обмежень на кутову швидкість повороту, що дозволяє визначити програмний режим руху судна на ділянках маршруту з постійною кривизною (з постійним прискоренням кутової швидкості);

– апроксимуюча траєкторія проходить через все вузлові точки;

– апроксимуюча крива не вносить в маршрут додаткових точок перегину;

– величина апроксимуючої функції повинна приймати нульові значення, коли точка управління рухомого об'єкта знаходиться на траєкторії, і зменшується або збільшується, при наближенні (віддаленні) від траєкторії. Оскільки при відстеженні траєкторії, потрібно обчислювати відстань від точки управління рухомого об'єкта до траєкторії, і похідні від цього відстані;

– в умовах безпеки і якості траєкторії повинні враховуватися знання, досвід, навички команди містка, накопичені в процесі роботи, місцеві правила, звичай порту;

– забезпечувати безпеку плавання, виходячи з поточних навігаційних умов.

Таким чином, забезпечення виконання цих суперечливих вимог до траєкторії руху судна, в умовах автоматизованого визначення маршруту судна при плануванні переходу є актуальною науково-технічною задачею.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз досліджень [3-7] показує, що для апроксимації траєкторії використовуються різні поліноміальні функції: Лагранжа, Бернштейна, ряд Тейлора, спіраль Ферма. У дослідженнях [4, 5] розглядається підхід до апроксимації траєкторії судна кривими Безье (поліном Бернштейна). Однак, при виборі високого ступеня многочлена виникають труднощі, пов'язані з великою кількістю обчислень многочлена в кожній вузловій точці. Альтернативний підхід полягає в розбитті траєкторії на ділянки і інтерполювання поліномами низького ступеня, які склеюються в вузлових точках. Але виникає задача забезпечення необхідного рівня безперервності в точках склеювання.

За дослідженнями [8-10] для опису кривих циркуляції, інших маневрених елементів судна приймаються сплайн функції: кубічний сплайн, B-сплайн, Ермітів-сплайн. Однак сплайнові методи, використовувані для апроксимації траєкторії, не враховують важливих механічних параметрів руху, таких як повна векторна швидкість руху, максимальне поступальне прискорення. Для судна траєкторія задається без урахування роздільного режиму зміни кінематичних параметрів руху.

При формуванні нелінійних, важко описуваних математично моделей, для прогнозування їх поведінки в часі широко використовуються штучні нейронні мережі [11-12].

Проте, одне з ключових завдань навігації: побудова фізично реалізованої траєкторії руху судна і її корекція в реальному масштабі часу вимагають нових підходів до вирішення.

Мета статті полягає в розробці методу розрахунку траєкторії руху судна при автоматизованому визначенні маршруту, в якому траєкторія руху судна знаходиться у вигляді кривої що проходить крізь елементи простору (або точки простору), які відібрані автоматизованим методом вибору маршруту судна при плануванні переходу та забезпечує можливість її корекції в реальному масштабі часу.

Виклад основного матеріалу

Застосування для автоматизації процесу визначення маршруту судна при плануванні переходу наступної дискретної моделі ходу судна дозволяє врахувати маневрені характеристики судна. Представимо хід судна як послідовне відвідування певних областей простору. На рис. 1 запропоновано розбиття простору, що враховує маневрені можливості судна. Пропонується обрати вісім різних курсів судна. З кожного елемента простору можливо буде досягнути три сусідніх фронтальних за курсом елементи з можливим поворотом на 45 градусів. Таким чином, ширина (довжина) елемента, як видно з рішення трикутника ABC, дорівнює:

$$LW = \left(1 - \frac{1}{\sqrt{2}}\right) R_V, \quad (1)$$

де R_V – мінімальний радіус розвороту судна на швидкості V .

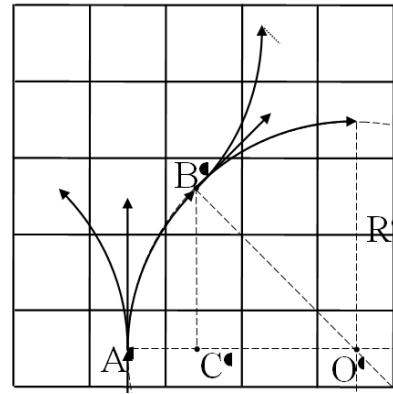


Рис. 1. Досягнення сусідніх фронтальних за курсом елементів і наступних за сусідніми елементів з можливою зміною курсу

Простір пошуку шляху охарактеризуємо одним масивом G , $G(i)$ – властивість простору (мультиплікативний штраф за прокладку маршруту судна через елемент простору). Опишемо хід судна зваженим орієнтованим графом $GR(V,E)$, де V – множина вершин графа, E – множина ребер графа. Кожному елементу простору буде відповідати кількість вершин графа, що дорівнює кількості дискретних напрямків ходу. З кожної вершини виходять орієнтовані ребра, що з'єднують її із суміжними вершинами, які відповідають трьом наступним фронтальним за курсом елементам (рис. 1).

Вага ребра $A(j,k)$ дорівнює кількості палива m_n , необхідного для досягнення наступного елемента з обраним курсом, помноженому на штраф з масиву G , відповідний елементу простору, у який ребро входить:

$$A(j,k) = m_n G(i). \quad (2)$$

Вирішення завдання автоматизації процесу визначення маршруту судна при плануванні переходу досягається зведенням його до завдання пошуку самого короткого шляху між двома вершинами на графі, у якому мінімізується сума ваг ребер, що становлять шлях, що вирішується алгоритмами комбінаторної оптимізації на графах. Таким чином отримуємо набір елементів простору крізь які проходить шукана траєкторія руху судна. Оскільки дискретна модель ходу судна враховує маневрені характеристики судна траєкторія, що лежить в межах елементів простору, що відібрані, буде задовольняти більшості перелічених вимог до траєкторій, що застосовуються для завдання руху судна. Завдання пошуку траєкторії руху судна зводиться до завдання пошуку G^2 гладкої кривої яка проходить крізь елементи простору, що відібрані. Метод формування якої дозволяє локально корегувати її в реальному масштабі часу.

За таких умов для розрахунку траєкторії руху судна застосуємо послідовність поліномів. У якості сегментів кривої використаємо раціональні криві Безье. Висока ступінь кривої дає можливість отримати більш гладку траєкторію, але надмірне згладжування погіршує точність розрахунку маршруту та має високу арифметичну складність. Виходячи з цього скористаємось раціональними кривими Безье 7-го ступеня, що задаються формулою [13]:

$$r(t) = \sum_{i=0}^7 B_i^7 w_i t^i (1-t)^{(7-i)} P_i / \sum_{i=0}^7 B_i^7 w_i t^i (1-t)^{(7-i)}, \quad (3)$$

де $B_i^7 = 7! / (i!(7-i)!)$ – біноміальний коефіцієнт Ньютона; w_i – вага вузлової точки; t – параметр $0 < t < 1.0$; P_i – вузлові точки.

Як показано автором у [13] можливо отримати формули для побудови сегментів із заданою кривиною в початку та в кінці сегменту на основі застосування раціональної кривої Безьє 7-го степеня, що актуально збереження питомого ступеню гладкості траєкторії руху судна. Але, враховуючи особливості задачі, що вирішується, достатньо в околі початку та кінця кожного сегменту додати по дві додаткових точки. Додаткові точки визначають таким чином що вони лежать на одній прямій з кінцем (початком) сегменту. Крім того, в якості кінця (початку) сегменту замість центру відповідного елементу простору, оберемо середньоарифметичне між ним та двома сусідніми центрами елементів простору, що відібрані. Що забезпечить безпечні напрямки руху на початковій і кінцевій ділянках траєкторії сегменту і більш високу точність управління рухом.

На рис. 2 представлена схема методу розрахунку траєкторії руху судна при автоматизованому визначенні маршруту. На рис. 3 порівняно результати застосування методу розрахунку траєкторії руху судна при автоматизованому визначенні маршруту. Квадратні маркери вказують на центри елементів простору, що відібрані. Більш гладка крива – Безьє 9-го ступеня, більш точна – сегменти з кривих Безьє 7-го ступеня. Круглі маркери – додаткові точки в місці з'єднання.

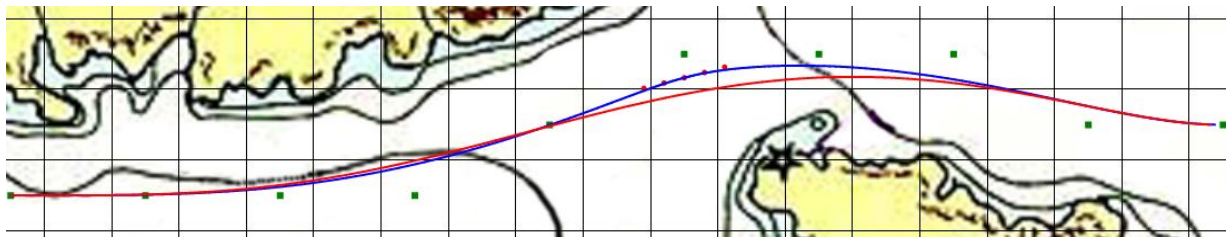


Рис. 3. Порівняння результатів застосування розрахунку траєкторії руху судна; більш гладка суцільна крива Безьє 9-го ступеня та достатньо гладка, більш точна з'єднана з двох сегментів крива Безьє 7-го ступеня

Висновки

Аналіз процесу визначення траєкторії руху судна показав необхідність забезпечення властивостей траєкторії: обмеження на максимальну кривизну траєкторії; безперервність траєкторії та її двох перших похідних, щоб планована траєкторія в просторі була гладкою; можливість локально корегувати траєкторію в реальному масштабі часу, тобто на певній ділянці, без перерахунку всієї траєкторії.

Існуючі підходи не дозволяють повною мірою врахувати вимоги до траєкторії руху судна та розраховувати її для всієї довжини маршруту елементи якого (опорні точки) визначені автоматизовано і коригувати її в реальному масштабі часу, що вима-

гає нових підходів до визначення траєкторії руху судна.

Для розрахунку траєкторії руху судна пропонується застосувати послідовність поліномів. У якості сегментів кривої використаємо раціональні криві Безьє 7-го ступеня.

Таким чином отримав подальший розвиток методу розрахунку траєкторії руху судна при автоматизованому визначенні маршруту, в якому траєкторія руху судна знаходиться у вигляді кривої що проходить крізь елементи простору (або точки простору), які відібрані автоматизованим методом вибору маршруту судна при плануванні переходу та забезпечує можливість її корекції в реальному масштабі часу.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Совершенствование теории судовождения на внутренних водных путях: автореф. дис. д-ра. техн. наук: 05.22.19. / Тихонов, В.И. – Н. Новгород, 2011. – 39 с.
2. Формализация знаний о маневрировании судна в портовых водах на основе нечетких функций / В.А. Васильков, А.А. Мироненко // Эксплуатация морского транспорта. – 2010. – № 2 (60). – С. 39-43.

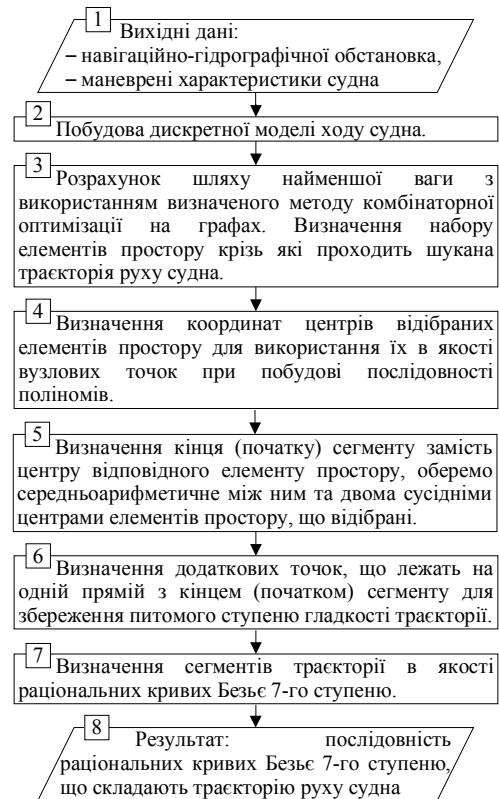


Рис. 2. Метод розрахунку траєкторії руху судна при автоматизованому визначенні маршруту

3. Подход к проблеме прогноза динамики маневра судна / В.В. Владимиров, П.А. Захарченко, Н.С. Звягинцев // Эксплуатация морского транспорта. – 2012. – Вып. 1(67). – С. 11-14.
4. Упрощенное построение закона управления, обеспечивающего движение объекта по заданной криволинейной траектории / Г.М. Довгоброд, Л.М. Клячко // Гироскопия и навигация. – 2011. – № 3. – С. 24-33.
5. Использование параметрической аппроксимации при планировании траекторий движения аппаратов / Г.М. Довгоброд, Л.М.Клячко, А.В.Рогожников // Изв. ВУЗов. Приборостроение. – 2009. – Т.52. – №9. – С. 11-17.
6. Синтез структурно-переключаемых систем для управления многомерными подвижными объектами [Текст]/ В.Л. Тимченко, Ю.П. Кондратенко// Радіоелектроніка, інформатика, управління.- 2011.- №1.-С.158-163.
7. Continuous Curvature Path Planning using Voronoi diagrams and Fermat's spirals / M. Candeloro, A.M. Lekkas, A.J. Sorensen, T.I. Fossen // Proc. of 9th IF AC Conf. on Control Applications in Marine Systems (CAMS 2013). – Osaka, Japan, 2013. – P. 132-137.
8. Аппроксимация траекторий движения судов обобщенным локальным сплайном / Д.Н. Фомин // Эксплуатация морского транспорта. – 2010. – №1(59). – С.31-35.
9. Smooth Path Generation for Wheeled Mobile Robots Using η 3-Splines / Federico Casolo (Ed.) // Motion Control, 2010 ISBN: 978-953-7619-55-8, InTech.
10. Формирование гладкой исполнительной траектории в реальном масштабе времени / Г.М. Довгоброд // Гироскопия и навигация. 2015. Т.88, №1. – С. 109-120.
11. Implementation of Automatic Ship Berthing using Artificial Neural Network for Free Running Experiment / Y.A. Ahmed, K. Hasegawa // Proceedings of the 9th IFAC International Conference CAMS 2013. – Osaka, Japan. P.25-30.
12. Terrain Mapping and Classification in Outdoor Environments Using Neural Networks / A. Hata, D. Wolf, G. Pessin, F. Osorio // Int. J. of u- and e-Service, Sc. and Tech. – 2014. – V.2. – No.4. – P.51-61.
13. Рациональна крива Безье 7-го степеня за заданими двома точками і кривинами та скрутом в них / Ю.І. Бадаєв, І.М. Ганношина // Сучасні проблеми моделювання. – 2018. – Вип. 12. – С. 9-15. – Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/cpm_2018_12_4

Рецензент: д-р техн. наук, проф. С. В. Козелков,
Державний університет телекомунікацій, Київ

Received (Надійшла) 11.01.2018

Accepted for publication (Прийнята до друку) 13.03.2018

Метод расчета траектории движения судна при автоматизированном определении маршрута

И. Н. Ганношина, Д. А. Пархоменко

Анализ процесса определения траектории движения судна показал необходимость обеспечения свойств траектории: ограничение на максимальную кривизну траектории; непрерывность траектории и ее двух первых производных, чтобы планируемая траектория в пространстве была гладкой; возможность локально корректировать траекторию в реальном масштабе времени, то есть на определенном участке, без пересчета всей траектории. **Цель статьи** заключается в разработке метода расчета траектории движения судна при автоматизированном определении маршрута, в котором траектория движения судна находится в виде кривой проходящей через элементы пространства (или точки пространства), отобранных автоматизированным методом выбора маршрута судна при планировании перехода и обеспечивает возможность ее коррекции в реальном масштабе времени. **Результаты.** Предложен метод расчета траектории движения судна при автоматизированном определении маршрута, в котором траектория движения судна находится в виде кривой проходящей через элементы пространства (или точки пространства), отобранные автоматизированным методом выбора маршрута судна при планировании перехода. Предлагается строить кривую из последовательности полиномов. В качестве сегментов выбираются рациональные кривые Безье 7-й степени, на которые накладываются дополнительные условия кривизны в начальной и конечной точках, для обеспечения непрерывности кривизны траектории.

Ключевые слова: маршрут, автоматизация процесса определения маршрута, траектория движения судна, рациональные кривые Безье, непрерывность кривизны траектории.

Method for calculating the trajectory of the vessel with automated route determination

I. Gannoshina, D. Parkhomenko

A method is proposed for calculating the trajectory of a vessel with an automated determination of the route, in which the trajectory of the vessel is in the form of a curve passing through space elements (or points of space) selected by an automated method for choosing a vessel route when planning a transition. Analysis of the process of determining the trajectory of the vessel showed the need to ensure the properties of the trajectory: the limit on the maximum curvature of the trajectory; the continuity of the trajectory and its two first derivatives, so that the planned trajectory in space is smooth; the ability to locally adjust the trajectory in real time, that is, in a certain area, without recalculating the entire trajectory. Existing approaches do not allow to fully take into account the requirements for the trajectory of the vessel and to calculate it for the entire length of the route whose elements (reference points) are defined automatically and correct it in real time, requires new approaches to determining the trajectory of the vessel. Application to automate the process of determining the route of the vessel when planning the transition of a discrete model of the vessel allows you to take into account the maneuverability characteristics of the vessel. Thus, the trajectory lying within the selected elements of space will satisfy most of the requirements for the trajectories used to specify the movement of the vessel. It is proposed to construct a curve from a sequence of polynomials. The segments are selected rational Bezier curves of the 7th degree, on which additional conditions of curvature at the initial and final points are imposed, to ensure continuity of the curvature of the trajectory. To this end, two additional points are added in the vicinity of the beginning and end of each segment. Additional points are determined in such a way that they lie on one straight line with the end (beginning) of a segment. That will provide safe directions of movement on the initial and final segments of the trajectory of the segment and higher accuracy of traffic control.

Keywords: route, automate the process of determining the route, the trajectory of the vessel, rational Bezier curves, the continuity of the curvature of the trajectory.