

УДК 681

DOI: <https://doi.org/10.37890/jwt.vi65.125>

ПОДХОД К УПРАВЛЕНИЮ СУДНОМ ПО ТРАЕКТОРИИ НА ОСНОВЕ ГРАДИЕНТА ВСПОМОГАТЕЛЬНОЙ ФУНКЦИИ

А.А. Дыда

Морской Государственный университет имени адм. Г. И. Невельского,
г. Владивосток, Россия

К.Н. Чумакова

Морской Государственный университет имени адм. Г. И. Невельского,
г. Владивосток, Россия

И.И. Пушкарев

Морской Государственный университет имени адм. Г. И. Невельского,
г. Владивосток, Россия

Аннотация. В настоящей работе развивается подход к решению задачи управления движением судна морского судна по маршруту. Предполагается, что маршрут задаётся с помощью путевых точек, соединённых отрезками прямых. Основная идея развиваемого подхода заключается в построении совокупности вспомогательных гладких функций, имеющих экстремум (максимум) на соответствующих участках маршрута. Векторы градиента выбранных вспомогательных функций направлены к соответствующему участку маршрута судна. Сумма векторов градиента вспомогательных функций и вектора, задающего направление, на выбранном участке маршрута, определяет желаемый курс движения судна. Показано, что выбранный алгоритм построения желаемого курса судна обеспечивает его выход на заданную траекторию. Предложена обобщённая схема систем управления движением судна по маршруту. Её основные блоки обеспечивают ввод путевых точек маршрута, определение параметров уравнений отдельных участков маршрута, задание вспомогательных функций, вычисление векторов градиентов вспомогательных функций для каждого участка маршрута в точке, соответствующей текущим координатам судна, построение нормированных векторов, задающих направление на каждом участке траектории морского судна, задание необходимых параметров алгоритма управления. Предлагаемый подход обладает достаточно высокой степенью общности и может быть использован для управления судном по криволинейным участкам траектории. Исследуемые алгоритмы были реализованы в среде моделирования Matlab/Simulink. Приводятся результаты численных экспериментов для различных сочетаний параметров алгоритма и начальных условий. Математическое моделирование, разработанной системы управления движением судна по траектории подтвердило эффективность предложенного подхода. Планируется дальнейшее развитие подхода на основе принципов адаптивного управления.

Ключевые слова: морское судно, управление движением, программный курс, алгоритм управления, траектория, маршрут, путевые точки, вектор градиент, вспомогательная функция, направляющий вектор, математическое моделирование

Введение

Основной задачей управления движением судна вдоль траектории является его движение вдоль заданного маршрута [3,9,12,17,18]. Построение желаемой траектории движения судна традиционно выполняется судоводителем. С развитием современных технологий эта задача может быть решена средствами интеллектуальных информационных систем, о чём свидетельствует многочисленное количество публикаций и ис-

следований [1,2,4,6-8,11,13-16]. В настоящей работе предлагается алгоритм управления судном, обеспечивающий его движение вдоль заданной траектории.

Траектория описывает движение объекта в пространстве как функцию от времени. Объектами могут быть летательные аппараты, морские суда, спутники, снаряды и т.д. Траекторию движения объекта можно задать математически через геометрию пути или положение объекта во времени. Пусть следования – это задача двигаться по заранее определённой траектории движения без временных ограничений. Траектория движения судна обычно указывается в виде путевых точек. Каждая путевая точка определяется с использованием декартовых координат (x_k, y_k, z_k) , $k = 1, \dots, n$. Для надводного корабля используют только две координаты (x_k, y_k) [9].

Предположим, что заданный маршрут траектории движения судна представляет собой набор путевых точек с координатами (x_i, y_i) , $i = 0, 1, \dots, n$ [9], соединённых отрезками прямых. На практике заданный маршрут судна часто представляется в виде кусочно-линейной траектории. В данном случае уравнение i -го фрагмента планируемого маршрута, соединяющего путевые точки (x_i, y_i) с (x_{i+1}, y_{i+1}) , имеет вид:

$$k_i = \frac{y_{i+1} - y_i}{x_{i+1} - x_i}, \quad b_i = y_i - k_i x_i; \quad (1)$$

$$y = k_i x + b_i, \quad (2)$$

где k_i, b_i - соответствующие константы, которые определяются через координаты путевых точек.

Выберем функцию двух переменных $F_i(x, y)$ таким образом, чтобы она достигала экстремума (максимума) на i -ом участке маршрута судна. Для прямолинейных участков траектории судна такая функция может быть выбрана в квадратичной форме, например, следующего вида:

$$F_i(x, y) = -\frac{1}{2}(y - k_i x - b_i)^2 \quad (3)$$

Как следует из построения функции, она имеет максимум на i -ом фрагменте пути. Следовательно, для выбранного вида функции компоненты ее вектора градиента вычисляются согласно выражениям:

$$\text{grad}F_i = \left(\frac{dF}{dx}, \frac{dF}{dy} \right) \quad (4)$$

или

$$\text{grad}F_i = (k_i(y - k_i x - b_i), -y + k_i x + b_i) \quad (5)$$

В силу известных свойств векторы градиенты будут направлены к участкам заданной траектории движения и ортогональны им. С целью построения алгоритма управления движением судна по траектории введем вспомогательный вектор $w_i = (w_{xi}, w_{yi})$ единичной длины, который направлен вдоль i -го участка траектории движения судна. Компоненты введенного вспомогательного вектора могут быть вычис-

лены через координаты путевых точек (x_i, y_i) и (x_{i+1}, y_{i+1}) , которые определяют i -ый участок запланированной траектории движения судна:

$$w_{xi} = \frac{x_{i+1} - x_i}{\sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2}};$$

$$w_{yi} = \frac{y_{i+1} - y_i}{\sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2}};$$
(6)

Далее определим вектор F_{w_i} :

$$F_{w_i} = grad F_i(x, y) + w_i = \left(\frac{dF_i}{dx_i} + aw_{xi}, \frac{dF_i}{dy_i} + aw_{yi} \right),$$
(7)

где a - весовой коэффициент, $a > 0$

Пример построения поля векторов градиента для функции F_{w_i} показан на рис. 1.

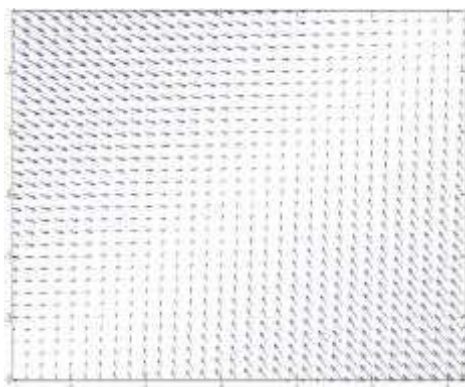


Рис.1. Пример построения поля векторов градиента для функции F_{w_i}

Векторы градиента выбранных вспомогательных функций направлены к соответствующему участку маршрута траектории движения судна. Сумма векторов градиента вспомогательных функций и вектора, задающего направление на выбранном участке маршрута, определяет программный (желаемый) курс движения судна. Вектора F_{w_i} стягиваются к заданной траектории движения судна, и направление вектора может быть принято в качестве программного значения курса судна для достижения им заданной траектории движения вдоль нее.

Отмеченные свойства введенных вспомогательных функций и векторов позволяют предложить алгоритм управления движением судна вдоль запланированного маршрута.

Как следует из приведенных соотношений для выхода судна на i -ый участок его запланированной траектории, программное значение его курса φ_{di} следует вычислять последующей формуле:

$$\varphi_d(t) = \arctg \frac{\frac{dF_i(x_s, y_s)}{dy_s} + ac_{yi}}{\frac{dF_i(x_s, y_s)}{dx_s} + ac_{xi}}, \quad (8)$$

где (x_s, y_s) - координаты судна.

Полученное выражение для вычисления программного значения курса судна является основой подхода и построенной на его основе системы управления движением судна по заданной траектории движения.

Для проверки работоспособности и эффективности предлагаемого подхода было проведено численное моделирование системы управления движением судна по траектории. Модели динамики судна, рулевой машины и регулятора были представлены типовыми линейными звеньями. Модель кинематики судна была представлена следующими дифференциальными уравнениями:

$$\begin{aligned} \dot{x}_c &= V \cos \varphi + V_{cx}, \\ \dot{y}_c &= V \sin \varphi + V_{cy}, \end{aligned} \quad (9)$$

где φ и V - соответственно курс и линейная скорость судна, V_{cx} , V_{cy} - компоненты вектора скорости морского течения.

На рисунке 2 представлена обобщенная схема систем управления движением судна по траектории, разработанная на основе предложенного метода. Блоки схемы обеспечивают ввод путевых точек маршрута, определение вспомогательных функций и параметров уравнений отдельных участков маршрута нахождение векторов градиентов вспомогательных функций для каждого участка маршрута в точке соответствующей текущим координатам судна, задание нормированных векторов, определяющих направление на каждом участке траектории морского судна, определение необходимых параметров алгоритма управления.

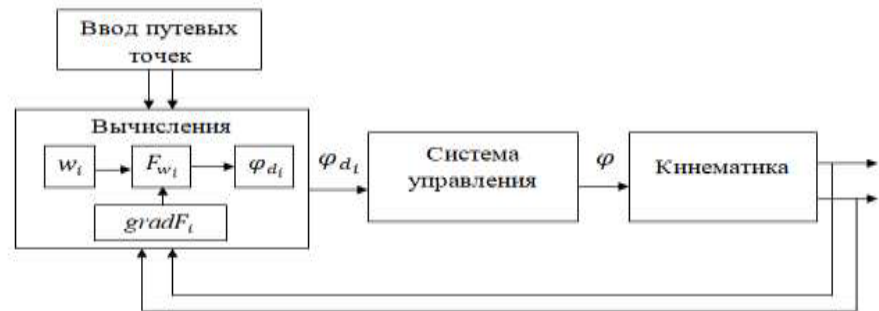


Рис.2. Обобщенная схема систем управления движением судна по траектории, разработанная на основе предложенного алгоритма

В среде Matlab/Simulink [5, 10] была построена соответствующая модель для исследования разработанной системы. MATLAB — высокоуровневый язык и интерактивная среда для программирования, численных расчетов и визуализации результатов, содержащая инструменты для решения широкого спектра научных и прикладных задач. MATLAB включает в себя современные инструменты для анализа данных, разработки алгоритмов и создания различных моделей и приложений.

На рисунке 3 представлена обобщенная схема систем управления движением судна по маршруту, разработанная на основе предложенного алгоритма, реализованная в среде Matlab/Simulink.

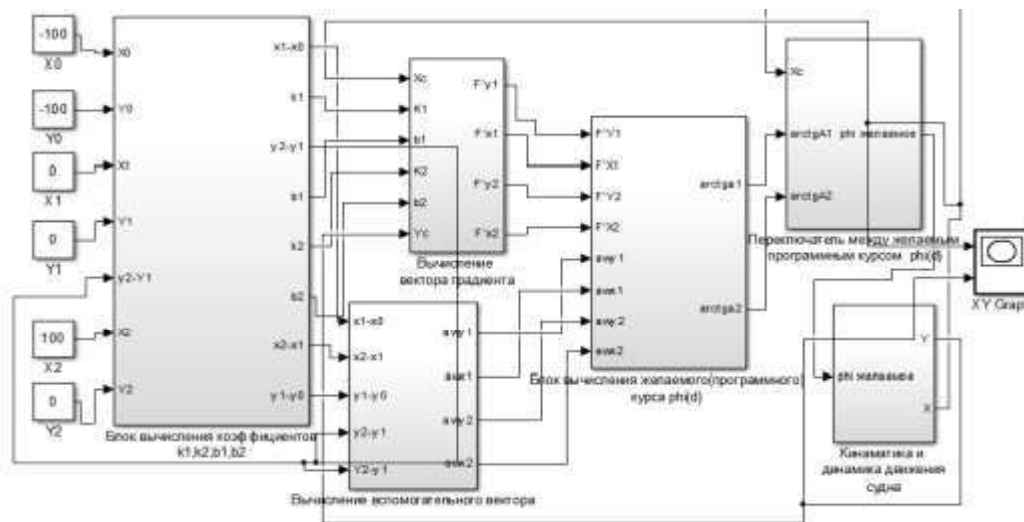


Рис.3. Обобщенная схема системы управления движением судна по маршруту, реализованная в среде Matlab/Simulink

На рисунке 3 приведена обобщенная схема для моделирования системы управления движением судна по траектории. Схема включает в себя следующие блоки: блок вычисления коэффициентов k_i , b_i , блок вычисления вектора градиента, блок вычисления вспомогательного вектора, блок вычисления желаемого (программного) курса $\phi(d)$, блок кинематики и динамики движения судна, переключатель. Переключатель обеспечивает переход с одного участка прямолинейной траектории на другой. В численном эксперименте желаемая траектория задавалась двумя отрезками прямых линий.

На рисунках 4 -7 приведены результаты численных экспериментов. Моделирование системы управления движением судна по траектории (рисунки 4а, б) при различных значениях $\varphi(t_0)$ и параметра a показало, что отклонение реальной траектории движения (синяя линия) от заданной траектории (красная линия) незначительно.

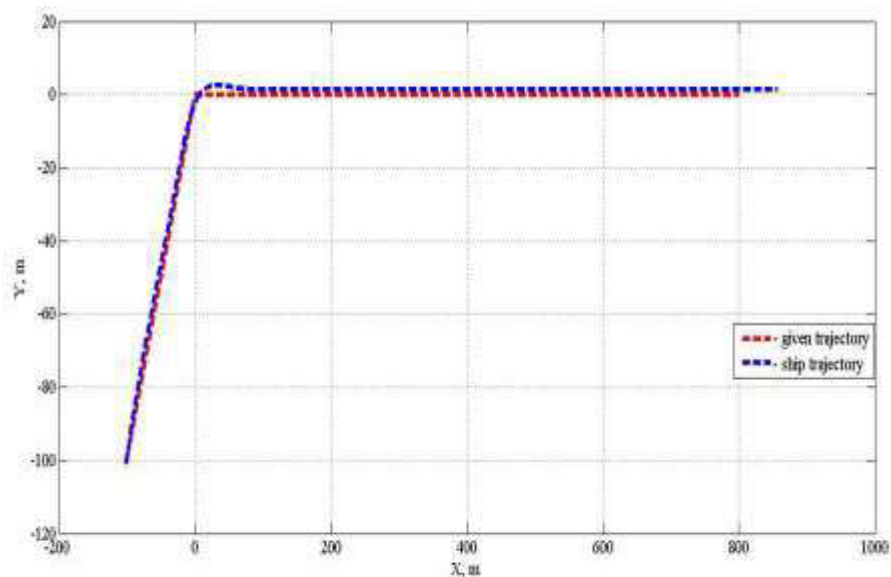


Рис.4а. Движение судна вдоль заданной траектории (при $a=500, \varphi(t_0) = 0,9$ рад)

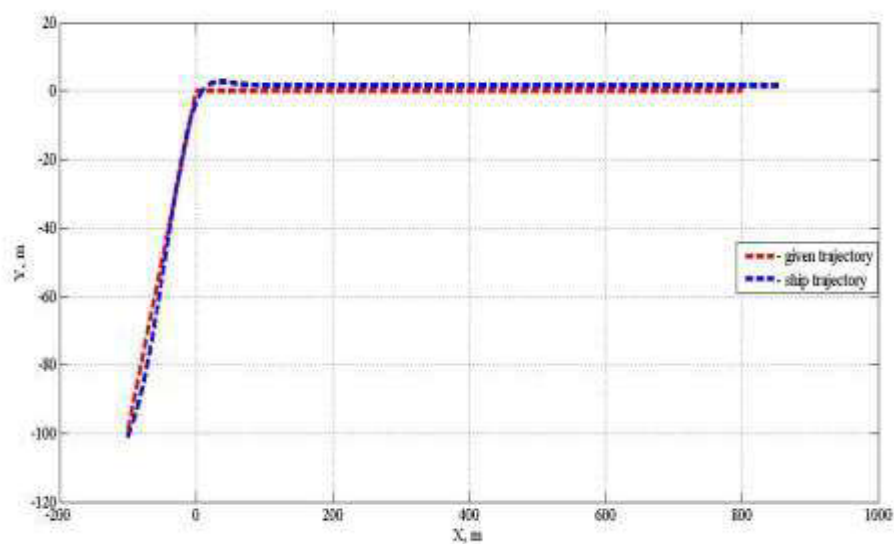


Рис.4б. Движение судна вдоль заданной траектории ($a = 100, \varphi(t_0) = 0,5$ рад)

На рисунках 5 -7 показаны графики, которые иллюстрируют пример изменения курса судна $\varphi(t)$ в процессе движения судна, расстояние $r(t)$ от судна до заданного, а также угла поворота пера руля $\delta(t)$. При моделировании было принято считать, что компоненты вектора скорости течения V_{cx}, V_{cy} равны нулю. В дальнейшем предполагается задать значения компонентам вектора скорости и проверить работу предложенного подхода

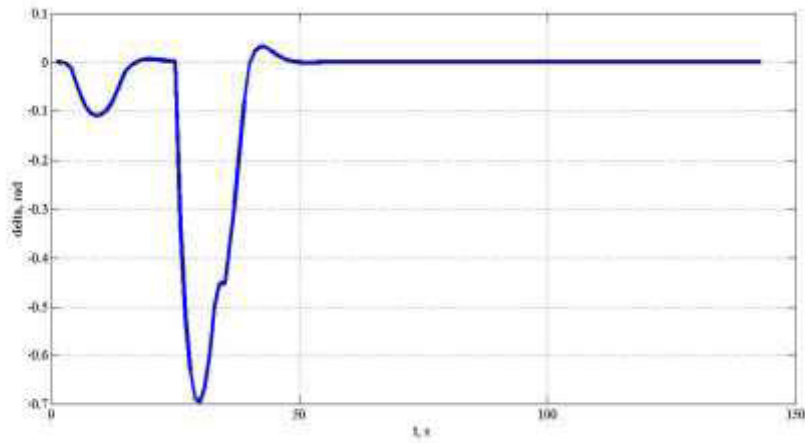


Рис.5. График изменения угла поворота пера руля $\delta(t)$

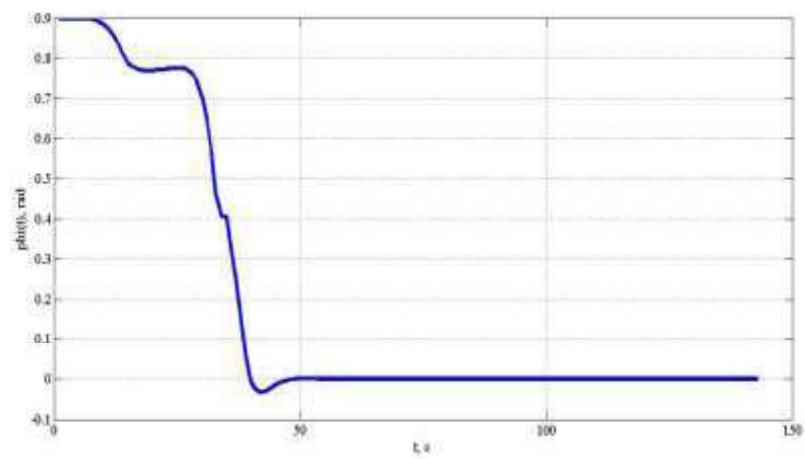


Рис.6. График изменения курса судна при выходе на заданную траекторию движения

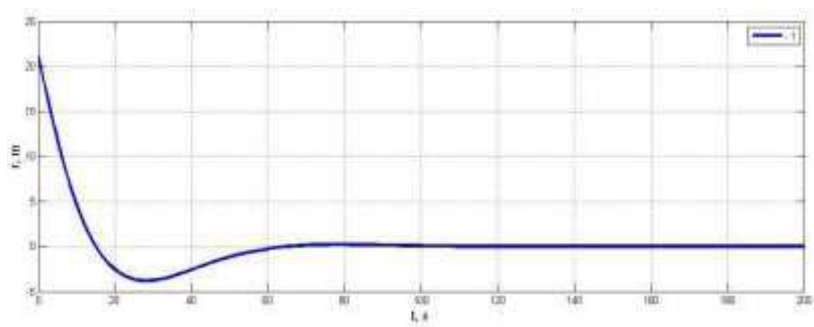


Рис.7. График изменения расстояния от судна до заданной траектории движения

Заключение

Предложенный алгоритм, основанный на использовании градиента вспомогательной функции, позволяет обеспечивать движение судна вдоль заданного маршрута. Математическое моделирование разработанной системы управления движением судна по траектории подтвердило эффективность предложенного подхода. Дальнейшее совершенствование разработанного алгоритма планируется вести с использованием более сложных моделей динамики и кинематики, с учетом влияния возмущающих воздействий внешней среды. Планируется проверка работы предложенного подхода путём проведения экспериментов на катере и дальнейшее развитие подхода на основе принципов адаптивного управления. Предлагаемый подход обладает достаточно высокой степенью общности и может быть использован для управления судном по криволинейным участкам траектории.

Список литературы:

1. Васьков, А.А. Управление движением судна по траектории методами обратных задач динамики [Текст]/ Изв. Вузов. Сев.-Кавк. регион. Техн. науки.— 2003.— Спецвыпуск.— С. 30-34.
2. Васьков, А.С., Мироненко А.А. Управление программным движением судна [Текст]/ А.С. Васьков, А.А. Мироненко// Эксплуатация морского транспорта.— 2015.— С. 40-49.
3. Дёмин С.И., Жуков Е.И., Кубачев Н.А. Управление судном: Учеб. Для вузов. — М.: Транспорт, 1991. — 359 с.
4. Дорри М.Х. «Автоматизация управления морскими подвижными объектами», Проблемы управления, 2009, № 3.1, 94–102.
5. Дьяконов В. MATLAB. Анализ, идентификация и моделирование систем. Специальный справочник [Текст]/ В.Дьяконов, В.Круглов. — СПб.: Питер, 2002. — 448 с.
6. Мироненко А.А. Идентификация траектории движения судна. XII ВСЕРОССИЙСКОЕ СОВЕЩАНИЕ ПО ПРОБЛЕМАМ УПРАВЛЕНИЯ ВСПУ-2014.
7. Пат. 2465169 Российская Федерация Способ управления траекторией движения судна. [Текст] / Дорри М.Х., Острецов Г.Э., Рощин А.А.; заявитель и патентообладатель Учреждение Российской академии наук Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН; заявл. 21.04.2011; опубл. 27.10.2012, Бюл. №30.
8. Пат. 2501064 Российская Федерация Способ управления траекторией движения судна. [Текст] / Юдин Ю.И., Пашенцев С.В.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Мурманский государственный технический университет" (ФГБОУВПО "МГТУ"); заявл. 11.13.2012; опубл. 10.12.2013, Бюл. №34.
9. Пшихопов В.Х. Методы автоматического управления морскими подвижными объектами: монография / Пшихопов В.Х., Медведев М.Ю., Гуренко Б.В.; Южный Федеральный университет. — Ростов — на — Дону — Таганрог: Издательство Южного Федерального университета, 2016. — 268с.
10. Сирота А.А. Методы и алгоритмы анализа данных и их моделирование в Matlab: учеб. пособие. — СПб.: БХВ - Петербург, 2016. — 384 с.: ил. — (Учебное пособие).
11. Смоленцев С. В. Автоматический синтез решений по расхождению судов в море / Сергей Викторович Смоленцев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. - 2016. - №2(36). - С. 7-16. DOI: 12.21821/2309-5180-2016-8-2-7-16.
12. Шарлай Г.Н. Управление морским судном: учебное пособие/ Г.Н.Шарлай. — Владивосток: Мор. гос. ун-т, 2011. — 543с.
13. Юдин Ю.И., Сотников И. И. Математические модели плоскопараллельного движения судна. Классификация и критический анализ // Вестник МГТУ. 2006. Т. 9, № 2. С. 200-208.
14. Blaich, M., Rosenfelder M., Schuster M., Bittel, O. & Reuter J. 2012a. Extended Grid Based Collision Avoidance Considering COLREGs for Vessels. In Proc. of the 9th IFAC Conference on Manoeuvring and Control of Marine Craft (MCMC).
15. Davis, P. V., Dove, M. J. & Stockel, C. T. 1982. A computer simulation of multi-ship encounters. Journal of Navigation 35(2):347-352.
16. Gasparetto A., Boscariol P., Lanzutti A., Vidoni R. Path Planning and Trajectory Planning Algorithms: A General Overview. Motion and Operation Planning of Robotic Systems 29: 3-27, 2015.

17. Kamil F, Tang SH, Khaksar W, Zulkifli N, Ahmad SA (2015) A Review on Motion Planning and Obstacle Avoidance Approaches in Dynamic Environments. *Adv Robot Autom* 4: 134. doi: 10.4172/2168-9695.1000134.2.
18. Tang SH, Khaksar W, Ismail NB, Ariffin MKA (2012) A Review on Robot Motion Planning Approaches. *Pertanika Journal of Science and Technology* 20: 15-29.

AUXILIARY FUNCTION GRADIENT APPROACH TO MARINE VEHICLE PATH-FOLLOWING CONTROL

Alexander A., Dyda

Maritime State University named after Admiral Nevelskoy, Vladivostok, Russia

Ksenya N., Chumakova

Maritime State University named after Admiral Nevelskoy, Vladivostok, Russia

Igor I., Pushkarev

Maritime State University named after Admiral Nevelskoy, Vladivostok, Russia

Abstract. This paper develops an approach to solving the problem of controlling the movement of a ship along a route. It is assumed that the route is specified using waypoints connected by line segments. The main idea of the developed approach is to construct a set of auxiliary smooth functions having an extremum (maximum) on the corresponding sections of the route. The gradient vectors of the selected auxiliary functions are directed towards the corresponding section of the vessel's route. The sum of the vectors of the gradient of the auxiliary functions and the vector that specifies the direction on the selected section of the route determines the desired course of the vessel movement. It is shown that the chosen constructing algorithm for the desired vessel course ensures its output to the given trajectory.

A generalized scheme of the ship traffic control systems along the route is proposed. Its main blocks provide input of route waypoints, determination of the parameters of the equations of individual sections of the route, assignment of auxiliary functions, calculation of gradient vectors of auxiliary functions for each section of the route at the point corresponding to the current coordinates of the vessel, construction of normalized vectors that specify the direction on each section of the trajectory of a sea vessel, assignment necessary parameters of the control algorithm. The proposed approach has a fairly high degree of generality and can be used to control the ship along curved trajectory sections.

The algorithms under study were implemented in the Matlab / Simulink modeling environment. Results of numerical experiments for various combinations of algorithm parameters and initial conditions are presented. Mathematical modeling of the developed control system for the movement of the vessel along the trajectory confirmed the effectiveness of the proposed approach. Further development of the approach based on the principles of adaptive management is planned.

Keywords: marine ship , pass-following control, program course, control algorithm, trajectory, route, waypoints, gradient vector, auxiliary function, direction vector, mathematical modelin.

References:

1. Vaskov, A.A. Trajectory control of the ship by the methods of inverse problems of dynamics [Text] / *Izv. Universities. North Caucasus. region. Tech. Science.* - 2003. - Special issue. - P. 30-34.
2. Vaskov, A.S., Mironenko A.A. Control of the programmed movement of the vessel [Text] / A.S. Vaskov, A.A. Mironenko // *Operation of sea transport.*— 2015.— P. 40-49.
3. Demin S.I., Zhukov E.I., Kubachev N.A. Ship management: Proc. For universities. - M.: Transport, 1991. -- 359 p.
4. Dorrie M.H. "Automation of control of marine mobile objects", *Problems of management*, 2009, No. 3.1, 94–102.
5. Dyakonov V. MATLAB. Analysis, identification and modeling of systems. Special reference book [Text] / V. Dyakonov, V. Kruglov. - SPb.: Peter, 2002. -- 448 p.

6. Mironenko A.A. Identification of the vessel's trajectory. XII ALL-RUSSIAN MEETING ON PROBLEMS OF GSPU-2014 MANAGEMENT.
7. Pat. 2465169 Russian Federation Method of vessel trajectory control. [Text] / Dorri M.Kh., Ostretsov G.E., Roshchin A.A. ; applicant and patentee Institution of the Russian Academy of Sciences Institute of Management Problems. V.A. Trapeznikov RAS; declared 04/21/2011; publ. 27.10.2012, Bul. No. 30.
8. Pat. 2501064 Russian Federation Method of vessel trajectory control. [Text] / Yudin Yu.I., Pashentsev S.V. ; applicant and patentee Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education "Murmansk State Technical University" (FGBOUVO "MSTU"); declared 11.13.2012; publ. 10.12.2013, Bul. No. 34.
9. Pshikhopov V.Kh. Methods of automatic control of marine mobile objects: monograph / Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu., Gurenko B.V. ; South Federal University. - Rostov - on - Don - Taganrog: Publishing House of the Southern Federal University, 2016. - 268p.
10. Orphan A.A. Methods and algorithms for data analysis and their modeling in Matlab: textbook. allowance. - SPb. : BHV - Petersburg, 2016. -- 384 p. : ill. - (Tutorial).
11. Smolentsev S. V. Automatic synthesis of solutions for diverging vessels at sea / Sergei Viktorovich Smolentsev // Bulletin of the State University of Marine and River Fleet named after Admiral S. O. Makarov. - 2016. - No. 2 (36). - С. 7-16. DOI: 10.21821 / 2309-5180-2016-8-2-7-16.
12. Sharlai G.N. Management of a sea vessel: a study guide / G.N. Sharlay. - Vladivostok: Mor. state un-t, 2011. - 543p.
13. Yudin Yu.I., Sotnikov II Mathematical models of plane-parallel movement of the vessel. Classification and critical analysis // Vestnik MGTU. 2006. T. 9, No. 2. S. 200-208.
14. Blaich, M., Rosenfelder M., Schuster M., Bittel, O. & Reuter J. 2012a. Extended Grid Based Collision Avoidance Considering COLREGs for Vessels. In Proc. of the 9th IFAC Conference on Manoeuvring and Control of Marine Craft (MCMC).
15. Davis, P. V., Dove, M. J. & Stockel, C. T. 1982. A computer simulation of multi-ship encounters. Journal of Navigation 35 (2): 347-352.
16. Gasparetto A., Boscaroli P., Lanzutti A., Vidoni R. Path Planning and Trajectory Planning Algorithms: A General Overview. Motion and Operation Planning of Robotic Systems 29: 3-27, 2015.
17. Kamil F, Tang SH, Khaksar W, Zulkifli N, Ahmad SA (2015) A Review on Motion Planning and Obstacle Avoidance Approaches in Dynamic Environments. Adv Robot Autom 4: 134.doi: 10.4172 / 2168-9695.1000134.2.
18. Tang SH, Khaksar W, Ismail NB, Ariffin MKA (2012) A Review on Robot Motion Planning Approaches. Pertanika Journal of Science and Technology 20: 15-29.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Дыда Александр Александрович, д.т.н., профессор, профессор кафедры автоматических и информационных систем, «Морской Государственный университет им. адм. Г. И. Невельского» (ФГБОУ ВО «МГУ им. адм. Г. И. Невельского»), 690059, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50-а, e-mail: adyda@mail.ru

Чумакова Ксения Николаевна, аспирант, «Морской Государственный университет им. адм. Г.И.Невельского» (ФГБОУ ВО «МГУ им. адм. Г. И. Невельского»), 690059, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50-а, e-mail: ksushechka_1991@mail.ru

Пушкарев Игорь Игорьевич, аспирант, «Морской Государственный университет им. адм. Г. И. Невельского» (ФГБОУ ВО «МГУ им. адм. Г.И. Невельского»), 690059, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50-а, e-mail: B_i_g88@mail.ru

Alexander A. Dyda, Doctor in Engineering Science, Professor of the Department of Automatic and Information Systems, Maritime State University named after Admiral G.I. Nevelskoy, 50-a, st. Verkhneportovaya, Vladivostok, 690059

Ksenya N. Chumakova, graduate student, Maritime State University named after Admiral G.I. Nevelskoy, 50-a, st. Verkhneportovaya, Vladivostok, 690059

Igor I. Pushkarev, graduate student, Maritime State University named after Admiral G.I. Nevelskoy, 50-a, st. Verkhneportovaya, Vladivostok, 690059

Статья поступила 17.09.2020 г.