

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, СУДОВОЖДЕНИЕ

DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-3-307-315

STATIC OBSTACLES AVOIDANCE ALGORITHM FOR UNMANNED SHIP

A. A. Dyda, I. I. Pushkarev, K. N. Chumakova

Maritime State University named after admiral G. I. Nevelskoy, Vladivostok, Russian Federation

An algorithm for the formation of a route for unmanned ship along a given trajectory and avoiding static obstacles is proposed in the paper. The algorithm is implemented by combining the trajectory motion function and the function that generates circulation around a given point (obstacle). The route of movement is defined by a set of waypoints with coordinates connected by straight line segments. The obstacle is specified in the form of the center coordinate and the radius of the obstacle. To move along the trajectory, an algorithm based on the use of the sum of the gradient vector of the auxiliary function and the vector that specifies the direction on a given route section is used. This allows the vessel to move along a given route. Circulations around the obstacle are formed on the basis of a special class of vector fields proposed in the works of D. Panagou, H. G. Tanner, K. J. Kyriakopoulos. By orienting the circulation in the direction of movement along the trajectory at the point of the obstacle and limiting it to a given maneuvering zone, a navigation vector field, which is a set of vectors showing the required direction of movement at a specific point, is formed. To reduce the probability of an unmanned ship piling up on an obstacle and to ensure safe maneuvering, an additional "repulsive" vector field, which forms a "forbidden" zone in the navigation vector field, is introduced. The algorithms under study are implemented in the Matlab / Simulink modeling environment. The results of numerical experiments are presented for various combinations of algorithm parameters. The results are presented graphically in the form of displaying navigation vector fields showing the movement direction of the unmanned ship, and displaying obstacles, prohibited zones and maneuvering zones. Further improvement of the algorithm for solving problems of avoiding dynamic and group obstacles is planned.

Keywords: unmanned ship, waypoint, algorithm, vector field, navigation vector field, circulation, trajectory, route, static obstacle, maneuvering zone.

For citation:

Dyda, Aleksandr A., Igor I. Pushkarev, and Ksenya N. Chumakova. "Static obstacles avoidance algorithm for unmanned ship." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.3 (2021): 307–315. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-3-307-315.

УДК 681.5

АЛГОРИТМ ОБХОДА СТАТИЧЕСКИХ ПРЕПЯТСТВИЙ ДЛЯ БЕЗЭКИПАЖНОГО СУДНА

А. А. Дыда, И. И. Пушкарев, К. Н. Чумакова

Морской Государственный университет имени адмирала Г. И. Невельского, Владивосток, Российская Федерация

В работе предложен алгоритм формирования маршрута движения безэкипажного судна по заданной траектории и обходу статических препятствий. Алгоритм реализован путем комбинирования функции движения по траектории и функции, формирующей циркуляцию вокруг заданной точки (препятствия). Маршрут движения задается набором путевых точек с координатами соединенных отрезками прямых, препятствие — в виде координаты центра и радиуса препятствия. Для движения по траектории используется алгоритм, основанный на использовании суммы вектора градиента вспомогательной функции и вектора, задающего направление на заданном участке маршрута, что позволяет обеспечить движение судна вдоль заданного маршрута. Циркуляции вокруг препятствия формируются на основе специального класса



векторных полей, предложенных в работах D. Panagou, H. G. Tanner, K. J. Kyriakopoulos. При ориентировании циркуляции в направлении движения по траектории в точке препятствия и ограничении ее заданной зоной маневрирования формируется навигационное векторное поле — набор векторов, показывающих требуемое направление движения в конкретной точке. Для уменьшения вероятности навала безэкипажного судна на препятствие и обеспечения безопасного маневрирования введено дополнительное «отталкивающее» векторное поле, формирующее «запрещенную» зону в навигационном векторном поле. Исследуемые алгоритмы реализованы в среде моделирования Matlab/Simulink. Приведены результаты численных экспериментов для различных сочетаний параметров алгоритма. Результаты представлены графически в виде отображения навигационных векторных полей, показывающих направление движения безэкипажного судна и отображения препятствий, запрещенных зон и зон маневрирования. Планируется дальнейшее совершенствование алгоритма для решения задач обхода динамических и групповых препятствий.

Ключевые слова: безэкипажное судно, путевая точка, алгоритм, векторное поле, навигационное векторное поле, циркуляция, траектория, маршрут, статическое препятствие, зона маневрирования.

Для цитирования:

Дыда А. А. Алгоритм обхода статических препятствий для безэкипажного судна / А. А. Дыда, И. И. Пушкарев, К. Н. Чумакова // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 3. — С. 307–315. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-3-307-315.

Введение (Introduction)

В современном мире наблюдается повышенный интерес к новому виду морского транспорта — безэкипажным судам (БЭС) [1], [2] как обширной области, имеющей большой потенциал развития и разнообразные сферы применения — от дистанционно управляемых судов с берегового поста управления до полностью автоматических судов, работающих без вмешательства человека.

Безэкипажные суда имеют множество преимуществ по сравнению с традиционными, и в первую очередь их применение позволяет исключить пребывание людей в опасных морских условиях, а также снизить стоимость эксплуатации и повысить безопасность судоходства [3], [4]. Все это заставляет многие страны и компании проводить научные исследования и опытно-конструкторские работы, направленные на развитие технологий безэкипажного судовождения.

Следует отметить, что в настоящее время существует ряд серьезных проблем и ограничений в области безэкипажных судов — это и устаревшее морское законодательство, в котором не учтены современные достижения науки и техники в безэкипажных технологиях [5], и организационные трудности, связанные с использованием и эксплуатацией БЭС, и ряд серьезных технических проблем, требующих качественного решения. К последним относятся вопросы, связанные с разработкой системы управления движением БЭС, которым посвящено большое количество работ. В частности, в работе [6] решается задача синтеза траектории движения судна, принципы построения алгоритмов управления БЭС в акватории порта рассмотрены в статье [7], в работе [8] исследована гибридная система управления движением БЭС в заданную точу.

Целью настоящей работы является решение частной задачи по созданию алгоритма обхода статических препятствий, встречающихся при движении БЭС по заданной траектории.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Для движения БЭС по заданной траектории, представленной набором путевых точек с координатами (x_i, y_i) , i = 0, 1, ..., n, используем алгоритм [9] на основе градиента вспомогательной функции, обеспечивающий движение судна вдоль заданного маршрута, описанный далее.

Уравнение *i*-го фрагмента планируемой траектории движения, соединяющей путевые точки (x_i, y_i) с (x_{i+1}, y_{i+1}) имеет вид:

$$k_i = \frac{y_{i+1} - y_i}{x_{i+1} - x_i}; \ b_i = y_1 - kx_1;$$
(1)

$$y = k_i x + b_i, \tag{2}$$

где k_i, b_i — соответствующие константы, определяемые через координаты путевых точек.



2021 год. Том 13. № 3₁

Введем функцию двух переменных $F_i(x, y)$ так, чтобы она достигала экстремума (максимума) на *i*-м участке маршрута судна:

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

Компоненты вектора-градиента функции $F_i(x, y)$ вычисляются по формуле

$$\operatorname{grad} F_i = \left(k_i \left(y - k_i x - b_i\right), -y + k_i x + b_i\right).$$
(4)

Введем вспомогательный вектор $w_i = (w_{xi}, w_{yi})$ единичной длины, направленный вдоль *i*-го участка траектории движения судна. Его компоненты вычисляются через координаты путевых точек (x_i, y_i) и (x_{i+1}, y_{i+1}) , определяющих *i*-й участок запланированной траектории движения судна:

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

$$w_{yi} = \frac{y_{i+1} - y_i}{\sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2}}.$$
(5)

Определим вектор F_{w_i} :

$$F_{w_i} = \operatorname{grad} F_i(x, y) + w_i = \left(\frac{dF_i}{dx_i} + aw_{xi}, \frac{dF_i}{dy_i} + aw_{yi}\right),\tag{6}$$

где a — весовой коэффициент, a > 0.

На рис. 1 показан пример поля векторов градиента для функции F_{w_i} , которое является навигационным векторным полем — набором векторов, показывающих требуемое направление движение БЭС в конкретной точке.



Существует ряд публикаций, в которых предлагаются различные подходы для построения алгоритма обхода статических препятствий. Для формирования траектории обхода препятствия



используем следующий класс векторных полей, предложенный в работах D. Panagou, H. G. Tanner, K. J. Kyriakopoulos [10], [11]:

$$F'(r) = \lambda(\rho^{\mathrm{T}} r)r - \rho(r^{\mathrm{T}} r), \qquad (7)$$

где $r = \begin{bmatrix} x & y \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$, $p = \begin{bmatrix} p_x & p_y \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$ — параметры ориентации поля;

 λ — специальный параметр.

При определенных значениях λ приведенная формула позволяет создавать векторные поля с различными свойствами, в том числе формирующие циркуляцию вокруг заданной точки. Для $\lambda = 1$ векторное поле имеет вид:

$$F'_{x} = p_{y}xy - \rho_{x}y^{2};$$

$$F'_{y} = p_{x}xy - \rho_{y}x^{2};$$

$$p_{x} = \cos(\varphi);$$

$$p_{y} = \sin(\varphi),$$
(8)

где ф — угол ориентации векторного поля.

Визуальное представление [12] данного векторного поля приведено на рис. 2. Очевидно, что векторное поле (8), позволяющее обходить препятствие по окружности, требует модификации для продолжения движения по заданному маршруту без избыточного маневрирования.



Рис. 2. Векторное поле $F'(\lambda = 1, p_x = 1, p_y = 0,$ вектора нормированы)

Разделим векторное поле F' на две полуплоскости A^+ и A^- прямой, проходящей через центр препятствия и перпендикулярной вектору направления движения F_{w_i} в данной точке. Для положительной полуплоскости A^+ векторное поле F' формируется при $\lambda = 0$. Тогда итоговое векторное поле обхода препятствия F' имеет вид (рис. 3):

$$F' = \begin{cases} \left(p_{y} xy - \rho_{x} y^{2}, \ p_{x} xy - \rho_{y} x^{2} \right) - \text{для точек} \ (x, y) \in A^{-}; \\ \left(-\rho_{x} x^{2} - \rho_{x} x^{2}, \ -\rho_{y} y^{2} - \rho_{y} x^{2} \right) - \text{для точек} \ (x, y) \in A^{+}. \end{cases}$$
(9)





Рис. 3. Итоговое векторное поле F' ($p_x = 1, p_y = 0$, вектора нормированы)

Результаты (Results)

Построим навигационное векторное поле F (рис. 4) для движения БЭС с учетом векторного поля обхода статического препятствия F' и векторного поля заданной траектории движения F_{w_i} :

$$F = \begin{cases} \delta_i F_{wi} + (1 - \delta_i) F' \text{ для } D_i \le R_2; \\ F_{wi} \text{ для } D_i > R_2; \\ \delta_i = \frac{D_i - R_1}{R_2 - R_i}, \end{cases}$$
(10)

где δ_i — коэффициент влияния; R_1 — радиус препятствия; R_2 — радиус зоны маневрирования; D_i — расстояние от центра препятствия до текущего положения безэкипажного судна.







Навигационное векторное поле F позволяет двигаться по заданной траектории, обходя имеющиеся на пути статические препятствия, с учетом размера препятствия и заданной зоны маневрирования. Однако в связи с особенностями безэкипажного судна (Underactuated Vehicle) [13], на которое оказывает значительное воздействие внешняя среда (ветер, течения), возможен навал БЭС на препятствие. Для уменьшения вероятности подобного последствия навигационное векторное поле F может быть дополнено введением «отталкивающих» векторов в ближней области препятствия.

Выберем «отталкивающее» векторное поле *F*" для препятствия с координатами (x_{obst}, y_{obst}) в виде:

$$F_{x}'' = 2(x - x_{obst});$$

$$F_{y}'' = 2(y - y_{obst}).$$
(11)

Введем параметр радиус запрещенной зоны R'_1 , которым будут ограничены влияние векторного поля F'' и коэффициент μ_i . Тогда навигационное векторное поле F примет вид:

$$F = \begin{cases} F'' \quad \text{для } D_i \leq \mathbf{R}_1; \\ \mu_i F' + (1 - \mu_i) F'' \quad \text{для } R_1 > D_i \leq R_1'; \\ \delta_i F_{wi} + (1 - \delta_i) \quad \text{для } R_1' > D_i \leq R_2; \\ F_{wi} \quad \text{для } D_i > R_2 \end{cases}$$

$$\delta_i = \frac{D_i - R_1'}{R_2 - R_1'}; \qquad (12)$$

$$\mu_i = \frac{D_i - R_1}{R_1' - R_1}.$$

Графическое представление примеров полученных навигационных полей при различных параметрах приведено на рис. 5.





Заключение (Conclusion)

Предложен алгоритм (12), использующий специальные функции для генерации навигационного векторного поля, которое формирует требуемое направление движения БЭС с учетом обхода статических препятствий. Алгоритм обеспечивает безопасный обход препятствий путем введения дополнительного «отталкивающего» векторного поля, принуждающее судно к маневрированию в разрешенной зоне. Приведенные результаты моделирования подтвердили работоспособность алгоритма при различных параметрах. Планируется его дальнейшее развитие для решения задач обхода динамических и групповых препятствий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Koikas G. New Technology trends in the design of Autonomous Ships / G. Koikas, M. Papoutsidakis, N. Nikitakos // International Journal of Computer Application. — 2019. — Vol. 178. — No. 25. — Pp. 4–7. DOI: 10.5120/ ijca2019919043.

2. *Komianos A*. The autonomous shipping era. operational, regulatory, and quality challenges / A. Komianos // TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation. — 2018. — Vol. 12. — No. 2. — Pp. 335–348. DOI: 10.12716/1001.12.02.15.

3. *Kretschmann L*. Analyzing the economic benefit of unmanned autonomous ships: An exploratory cost-comparison between an autonomous and a conventional bulk carrier / L. Kretschmann, H. C. Burmeister, C. Jahn//Research in transportation business & management. — 2017. — Vol. 25. — Pp. 76–86. DOI: 10.1016/j.rtbm.2017.06.002.

4. *Wróbel K*. Towards the assessment of potential impact of unmanned vessels on maritime transportation safety / K. Wróbel, J. Montewka, P. Kujala // Reliability Engineering & System Safety. — 2017. — Vol. 165. — Pp. 155–169. DOI: 10.1016/j.ress.2017.03.029.

5. Дмитриев В. И. Методы обеспечения безопасности мореплавания при внедрении беспилотных технологий / В. И. Дмитриев, В. В. Каретников // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 6. — С. 1149–1158. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-6-1149-1158.

6. *Смоленцев С. В.* Простая аналитическая модель движения судна / С. В. Смоленцев, Д. В. Исаков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 1. — С. 7–21. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-7-21.

7. *Каретников В. В.* Основные принципы построения алгоритмов управления беспилотным судном в акватории порта / В. В. Каретников, С. В. Рудых, А. А. Буцанец // Речной транспорт (XXI век). — 2019. — № 2 (90). — С. 55–57.

8. *Пшихопов В. Х.* Гибридная система управления движением безэкипажного судна в заданную точку / В. Х. Пшихопов, М. Ю. Медведев, В. В. Соловьев // Известия ЮФУ. Технические науки. — 2019. — № 1 (203). — С. 163–176. DOI: 10.23683/2311-3103-2019-1-163-176.

9. Дыда А. А. Подход к управлению судном по траектории на основе градиента вспомогательной функции / А. А. Дыда, К. Н. Чумакова, И. И. Пушкарев // Научные проблемы водного транспорта. — 2020. — № 65. — С. 27–36. DOI: 10.37890/jwt.vi65.125.

10. *Panagou D*. Control of nonholonomic systems using reference vector fields / D. Panagou, H. G. Tanner, K. J. Kyriakopoulos // 2011 50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference. — IEEE, 2011. — Pp. 2831–2836. DOI: 10.1109/CDC.2011.6160922.

11. *Panagou D*. Motion planning and collision avoidance using navigation vector fields / D. Panagou // 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). — IEEE, 2014. — Pp. 2513–2518. DOI: 10.1109/ICRA.2014.6907210.

12. *Сирота А. А.* Методы и алгоритмы анализа данных и их моделирование в Matlab: учеб. пособие / А. А. Сирота. — СПб.: БХВ — Петербург, 2016. — 384 с.

13. *Yi G*. Research on Underactuated USV Path Following Algorithm / G. Yi, Z. Liu, J. Q. Zhang, J. Dong // 2020 IEEE 4th Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC). — IEEE, 2020. — Vol. 1. — Pp. 2141–2145. DOI: 10.1109/ITNEC48623.2020.9085222.



REFERENCES

1. Koikas, G., M. Papoutsidakis, and N. Nikitakos. "New Technology trends in the design of Autonomous Ships." *International Journal of Computer Application* 178.25 (2019): 4–7. DOI: 10.5120/ijca2019919043.

2. Komianos, Aristotelis. "The autonomous shipping era. Operational, regulatory, and quality challenges." *TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation* 12.2 (2018): 335–348. DOI: 10.12716/1001.12.02.15.

3. Kretschmann, Lutz, Hans-Christoph Burmeister, and Carlos Jahn. "Analyzing the economic benefit of unmanned autonomous ships: An exploratory cost-comparison between an autonomous and a conventional bulk carrier." *Research in transportation business & management* 25 (2017): 76–86. DOI: 10.1016/j.rtbm.2017.06.002.

4. Wróbel, Krzysztof, Jakub Montewka, and Pentti Kujala. "Towards the assessment of potential impact of unmanned vessels on maritime transportation safety." *Reliability Engineering & System Safety* 165 (2017): 155–169. DOI: 10.1016/j.ress.2017.03.029.

5. Dmitriev, Vladimir I., and Vladimir V. Karetnikov. "Methods of ensuring the safety of navigation when implement unmanned technology." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.6 (2017): 1149–1158. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-6-1149-1158.

6. Smolentsev, Sergey V., and Dmitry V. Isakov. "A simple analytical model of ship movement." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.1 (2019): 7–21. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-7-21.

7. Karetnikov, V., S. Rudykh, and A. Butsanets. "Basic principles for creating algorithms of control unmanned ship in port's water area." *River transport (21st century)* 2(90) (2019): 55–57.

8. Pshikhopov, Viacheslav Khasanovich, Mikhail Yur'evich Medvedev, and Viktor Vladimirovich Solovjev. "A hybrid control system of movement of unmanned vessel to a given point." *Izvestiya SFedU. Engineering sciences* 1(203) (2019): 163–176.

9. Dyda, Alexander A., Ksenya N. Chumakova, and Igor I. Pushkarev. "Auxiliary function gradient approach to marine vehicle path-following control." *Russian Journal of Water Transport* 65 (2020): 27–36. DOI: 10.37890/ jwt.vi65.125.

10. Panagou, Dimitra, Herbert G. Tanner, and Kostas J. Kyriakopoulos. "Control of nonholonomic systems using reference vector fields." 2011 50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference. IEEE, 2011. 2831–2836. DOI: 10.1109/CDC.2011.6160922.

11. Panagou, Dimitra. "Motion planning and collision avoidance using navigation vector fields." 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE, 2014. 2513–2518. DOI: 10.1109/ ICRA.2014.6907210.

12. Sirota, A. A. *Metody i algoritmy analiza dannykh i ikh modelirovanie v Matlab: ucheb. posobie.* SPb.: BKhV — Peterburg, 2016.

13. Yi, Ge, Zhong Liu, Jian-Qiang Zhang, and Jiao Dong. "Research on Underactuated USV Path Following Algorithm." 2020 IEEE 4th Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC). Vol. 1. IEEE, 2020. 2141–2145. DOI: 10.1109/ITNEC48623.2020.9085222.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ	INFORMATION ABOUT THE AUTHORS
Дыда Александр Александрович —	Dyda, Aleksandr A. —
доктор технических наук, профессор	Dr. of Technical Sciences, professor
Морской государственный университет имени	Maritime State University named after admiral
адмирала Г. И. Невельского	G. I. Nevelskoy
690003, Российская Федерация, г. Владивосток,	50a, Verhneportovaya Str., Vladivostok, 690003,
ул. Верхнепортовая, д. 50а	Russian Federation
e-mail: <i>adyda@mail.ru</i>	e-mail: adyda@mail.ru
Пушкарев Игорь Игоревич — аспирант	Pushkarev, Igor I. — Postgraduate
Научный руководитель:	Supervisor:
Дыда Александр Александрович	Dyda, Aleksandr A.
Морской государственный университет	Maritime State University named
имени адмирала Г. И. Невельского	after admiral G. I. Nevelskoy
690003, Российская Федерация, г. Владивосток,	50a, Verhneportovaya Str., Vladivostok, 690003,
ул. Верхнепортовая, д. 50а	Russian Federation
e-mail: <i>B_r_i_g88@mail.ru</i>	e-mail: B_r_i_g88@mail.ru



Чумакова Ксения Николаевна — аспирант

Научный руководитель: Дыда Александр Александрович Морской государственный университет имени адмирала Г. И. Невельского 690003, Российская Федерация, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, д. 50a e-mail: ksushechka_1991@mail.ru

Chumakova, Ksenya N. — Postgraduate Supervisor: Dyda, Aleksandr A. Maritime State University named after admiral G. I. Nevelskoy 50a, Verhneportovaya Str., Vladivostok, 690003, Russian Federation e-mail: ksushechka 1991@mail.ru

Статья поступила в редакцию 19 марта 2021 г. Received: March 19, 2021.