

Интеллектуальные технологии планирования перемещений подвижных объектов в трехмерных недетерминированных средах

Под редакцией
профессора В. Х. ПШИХОПОВА



МОСКВА НАУКА 2017

УДК 681.21
ББК 32.816
И73

*Работа выполнена при поддержке гранта РНФ 14-19-01533
«Разработка теории и методов создания интеллектуальных
позиционно-траекторных систем управления подвижными объектами
в условиях неопределенности» в Южном федеральном университете*

Рецензенты:

доктор технических наук *А.Л. Ронжин*,
доктор технических наук, член-корреспондент РАН *А.А. Галеев*

Авторский коллектив:

*Белоглазов Д.А., Гузик В.Ф., Медведев М.Ю., Пшихопов В.Х.,
Пьявченко А.О., Сапрыкин Р.В., Соловьев В.В., Финаев В.И.*

Интеллектуальные технологии планирования перемещений подвижных объектов в трехмерных недетерминированных средах / Под ред. В.Х. Пшихопова. — М.: Наука, 2017. — 232 с. — ISBN 978-5-2-39996-9

В монографии рассматриваются методы интеллектуального планирования траекторий подвижных объектов в трехмерных неопределенных средах с препятствиями. Предлагаются методы планирования движения, основанные на неустойчивых режимах движения, на виртуальных полях, нейросетевых структурах и гибридных подходах, сочетающих в себе различные методы планирования движений и не требующих предварительного картографирования среды. На сценах различной сложности, с подвижными и неподвижными препятствиями, проводится сравнительный количественный и качественный анализ предлагаемых методов.

Для ученых и аспирантов, работающих в области системного анализа, робототехники и теории систем управления.

ISBN 978-5-2-039996-9

© Белоглазов Д.А., Гузик В.Ф.,
Медведев М.Ю., Пшихопов В.Х.,
Пьявченко А.О., Сапрыкин Р.В.,
Соловьев В.В., Финаев В.И., 2017
© ФГУП Издательство «Наука»,
редакционно-издательское
оформление, 2017

ЛИТЕРАТУРА

1. *Пишихов В.Х., Медведев М.Ю.* Управление подвижными объектами в определенных и неопределенных средах. М.: Наука, 2011. 350 с.
2. Unmanned Systems Integrated Roadmap 2013–2038. Department of defense. US, 2013.
3. *Новичков Н.* ВВС США расширяют боевое применение беспилотных аппаратов // ВПК. 2012. № 6 (423).
4. *Щербинин Р.* Взгляды командования ВВС США на повышение возможностей боевых авиационных патрулей, сформированных на базе стратегических многоцелевых беспилотных систем // Зарубежное военное обозрение. 2012. № 7. С. 63–68.
5. *Денисов Б.* Беспилотные летательные аппараты Израиля // Зарубежное военное обозрение. 2015. № 11.
6. *Русинов В.* Состояние и планы развития наземных робототехнических комплексов США [Электронный ресурс] // Зарубежное военное обозрение. 2013. № 3. С. 44–56.
7. *Бойко А.* Наземные военные роботы. 2011. <http://www.mforum.ru/news/article/111879.htm>
8. *Белюсов И.* Современные и перспективные необитаемые подводные аппараты ВМС США // Зарубежное военное обозрение. 2013. № 5. С. 79–88.
9. *Илларионов Г.Ю., Квашин А.Г., Викторов Р.В.* Применение автономных подводных роботов при отработке комплексов военно-морской техники и в боевой подготовке // Двойные технологии. 2011. № 2 (55). С. 54–62.
10. *Макаренко С.И.* Робототехнические комплексы военного назначения – современное состояние и перспективы развития // Системы управления, связи и безопасности. 2016. № 2.
11. *Калеев И.А., Рубцов И.В.* Боевым роботам нужна программа // Национальная оборона. 2012. № 8.
12. *Буренок В.М.* Вопрос дня – роботизация войск // Военно-промышленный курьер. 2013. № 34.
13. *Суворов А.Н., Кузьменкова Л.А.* На автомобиле Tesla – в будущее // Науч.-методич. электрон. журн. «Концепт». 2015. Т. 25. С. 1–5. URL: <http://e-koncept.ru/2015/65303.htm>
14. *Белоглазов Д.А., Гузик В.Ф., Косенко Е.Ю. и др.* Интеллектуальное планирование траекторий подвижных объектов в средах с препятствиями / Под ред. В.Х. Пишихова. М.: Физматлит, 2014. 300 с.
15. *Jean-Claude Latombe.* Robot Motion Planning. Kluwer Academic Press, 1991.
16. *Steven LaValle.* Planning Algorithms. Cambridge University Press, 2006.

17. *Siciliano B., Khatib O.* (Eds.). Springer Handbook of Robotics. Springer, 2008.
18. *Choset H., Lynch K.M., Hutchinson S. et al.* Principles of Robot Motion: Theory, Algorithms, and Implementations. MIT Press, 2005.
19. *Черноусько Ф.Л., Болотник Н.Н., Градецкий В.Г.* Мобильные роботы: проблемы управления и оптимизации движений // Тр. XII Всерос. совещ. по проблемам управления (ВСПУ-2014). М.: ИПУ РАН, 2014.
20. *Платонов А. К., Кирильченко А.А., Колганов М.А.* Метод потенциалов в задаче выбора пути: история и перспективы. М.: ИПМ им. М.В. Келдыша, 2001. 32 с.
21. *Городецкий А.Е., Ерофеев А.А.* Принципы построения интеллектуальных систем управления подвижными объектами // Автоматика и телемеханика. 1997. № 9. С. 101–110.
22. *Пишихов В.Х., Медведев М.Ю., Федоренко Р.В. и др.* Управление воздухоплавательными комплексами: теория и технологии проектирования. М.: Физматлит, 2010. 394 с.
23. *Тимофеев А.В., Юсупов Р.М.* Интеллектуализация систем автоматического управления // Изв. РАН. Техн. кибернетика. 1994. № 5. С. 72–78.
24. *Sukthankar G., Goldman R.P., Geib C. et al.* Plan, Activity, and Intent Recognition: Theory and Practice. 2014. 385 p.
25. *Пишихов В.Х., Медведев М.Ю.* Оценивание и управление в сложных динамических системах. М.: Физматлит, 2009. С. 295.
26. *Бюшгенс Г.С., Студнев Р.В.* Динамика самолета. Пространственное движение. М.: Машиностроение, 1983.
27. *Пишихов В.Х.* Позиционно-траекторное управление подвижными объектами. Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2009. 183 с.
28. *Савельев И.В.* Основы теоретической физики. Т. 1. Механика и электродинамика. М.: Наука, 1975.
29. *Пишихов В.Х.* Математические модели манипуляционных роботов: Учебн. М.: Физматлит, 2008. 124 с.
30. *Остославский И.В.* Аэродинамика самолета. М.: Оборонгиз, 1957.
31. *Щепановский В.А., Щепановская Г.И.* Вычислительное моделирование воздушно-космических систем. В 3 т. Новосибирск: Наука. Сиб. изд. фирма РАН, 2000. Т. 1. Модели, методы, технологии. 232 с.
32. *Гурман В.И., Квоков В.Н., Ухин М.Ю.* Приближенные методы оптимизации управления летательным аппаратом // Автоматика и телемеханика. 2008. № 4. С. 191–201.
33. *Крутько П.Д.* Управление боковым движением летательных аппаратов. Синтез алгоритмов методом обратных задач динамики // Изв. РАН. Теория и системы управления. 2000. № 4. С. 143–164.
34. *Крутько П.Д.* Управление продольным движением летательных аппаратов. Синтез алгоритмов методом обратных задач динамики // Изв. РАН. Теория и системы управления. 1997. № 6. С. 62–79.
35. *Фирсова Е.М.* Адаптивная система управлением маневренным самолетом на основе разделения движений по крену и рысканию // Изв. РАН. Теория и системы управления. 2001. № 1. С. 110–119.
36. *Dejrocher A.A.* Nonlinears model simplification in flight control system design // Al-Jaar., Troy. N.Y.: Renssetaer polytechnic institute, 1983.
37. *Пишихов В.Х.* Организация репеллеров при движении мобильных роботов в среде с препятствиями // Мехатроника, автоматизация, управление. 2008. № 2. С. 34–41.
38. *Юревич Е.И.* Основы робототехники. СПб.: Изд-во БХВ-Петербург, 2005. 412 с.

39. Гурьянов А.Е. Моделирование управления квадрокоптером // Инженерный вестник. 2014. № 8. С. 522–534.
40. Яблонский А.А. Курс теоретической механики: Статика, кинематика, динамика / А.А. Яблонский, В.М. Никифорова. М.: Интеграл-пресс, 2006. 503 с.
41. Галиуллин А.С. Методы решения обратных задач динамики. М.: Наука, 1986. 224 с.
42. Еругин Н.П. Построение всего множества систем дифференциальных уравнений, имеющих заданную интегральную кривую // Прикладная математика и механика. 1952. Вып. 6. С. 659–670.
43. Бойчук Л.М. Метод структурного синтеза нелинейных систем автоматического управления. М.: Энергия, 1971. 112 с.
44. Бойчук Л.М. Синтез координирующих систем автоматического управления. М.: Энергоатомиздат, 1991.
45. Крутько П.Д. Управление движением лагранжевых систем. Синтез алгоритмов методом обратных задач динамики // Изв. РАН. Теория и системы управления. 1995. № 6.
46. Мирошник И.В. О стабилизации движения по многообразию // Автоматика. 1986. № 1. С. 65–68.
47. Колесников А.А. Синергетическая теория управления. М.: Энергоатомиздат, 1994.
48. Krstic M., Kanellakopoulos I., Kokotović P.V. A new generation of adaptive controllers for linear systems // Proc. of 31-st IEEE Conf. Dec. Control, Tuscon. 1992. P. 3644–3651.
49. Jiang Z.-P., Nijmeijer H. Tracking Control of Mobile Robots: A Case Study in Backstepping // Automatica. 1997. Vol. 33 (7). P. 1393–1399.
50. Современная прикладная теория управления. Новые классы регуляторов технических систем. Ч. 3 / Под ред. А.А. Колесникова. Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000.
51. Пишихов В.Х., Медведев М.Ю., Крухмалев В.А. Базовые алгоритмы адаптивного позиционно-траекторного управления подвижными объектами при позиционировании в точке // Мехатроника, автоматизация, управление. 2015. Т. 16, № 4. С. 219–225.
52. Пишихов В.Х., Медведев М.Ю. Структурный синтез автопилотов подвижных объектов с оцениванием возмущений // Информационно-измерительные и управляющие системы. М., 2006. № 1. С. 103–109.
53. Крутько П.Д., Осипов П.А. Кинематические алгоритмы управления движением транспортных систем мобильных роботов // Изв. РАН. Теория и системы управления. 1999. № 3. С. 153–160.
54. Пишихов В.Х., Гуренко Б.В., Медведев М.Ю. и др. Оценивание аддитивных возмущений АНПА робастным наблюдателем с нелинейными обратными связями // Изв. ЮФУ. Технические науки. 2014. № 3(152). С. 128–137.
55. Пишихов В.Х., Медведев М.Ю. Алгоритмы оценивания в системе управления автономного роботизированного дирижабля // Изв. ЮФУ. Технические науки. 2013. № 2(139). С. 200–207.
56. Бугров Я.С., Никольский С.М. Высшая математика. Т. 1. Элементы линейной алгебры и аналитической геометрии. М.: Дрофа, 2004. 288 с.
57. Гантмахер Ф.П. Теория матриц. 5-е изд. М.: Физматлит, 2004. 560 с.
58. Padilla Castaneda M.A., Savage J., Hernandez A., Arambula Cosio F. Local Autonomous Robot Navigation Using Potential Fields//Motion Planning. Xing-Jian Jing (Ed.). InTech, 2008. http://www.intechopen.com/books/motion_planning/local_autonomous_robot_navigation_using_potential_fields

59. *Li F., Tan Y., Wang Y., Ge G.* Mobile Robots Path Planning Based on Evolutionary Artificial Potential Fields Approach // Proc. The 2nd Int. Conf. on Computer Science and Electronics Engineering. 2013. P. 1314–1317.
60. *Masehian E., Amin-Naseri M.R.* A Voronoi diagram-visibility graph-potential field compound algorithm for robot path planning // J. Intelligent & Robotic Systems. 2004. Vol. 21, N 6. 2004. P. 275–300.
61. *Hsu P.-M., Lin C.-L., Yang M.-Y.* On the Complete Coverage Path Planning for Mobile Robots // J. Intelligent & Robotic Systems. 2014. Vol. 74, Is. 3. P. 945–963.
62. *Korayem M.H., Nazemizadeh M., Nohooji H.R.* Optimal point-to-point motion planning of nonholonomic mobile robots in the presence of multiple obstacles // J. the Brazilian Soc. of Mechanical Sci. and Engineering. 2014. Vol. 36, Is. 1. P. 221–232.
63. *Mohamed J.M., Abbas M.W.* Optimal Path Planning for Mobile Robot Based on Genetically Optimized Artificial Potential Field // J. Engineering and Development. 2012. Vol. 16, N 4.
64. *Dolgov D., Thrun S., Montemerlo M., Diebel J.* Practical Search Techniques in Path Planning for Autonomous Driving // American Association for Artificial Intelligence (www.aaai.org). 2008.
65. *Garrido S., Moreno L., Blanco D.* Exploration of 2D and 3D environments using Voronoi Transform and Fast Marching Method // J. Intelligent Robot Systems. 2009. Vol. 55. 2009. P. 55–80.
66. *Seda M., Pich V.* Robot motion planning using generalized Voronoi diagrams // Proc. of the 8th WSEAS Int. Conf. on Signal Processing, Computational Geometry and Artificial Vision. Greese, 2008. P. 215–220.
67. *Brock O., Khatib O.* High-speed navigation using the global dynamic window approach // Proc. The IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation. 1999. P. 341–346.
68. *Fox D., Burgard W., Thrun S.* The Dynamic Window Approach to Collision Avoidance // IEEE Robotics and Automation Magazine. 1997. Vol. 4(1). P. 23–33.
69. *Barraquand J., Latombe J.-C.* Robot motion planning: A distributed representation approach // Int. J. Robotics Research. 1991. Vol. 10(6). P. 628–649.
70. *Pozna C., Precup R.-E., Koczy L.T., Ballagi A.* Potential field-based approach for obstacle avoidance trajectories // The IPSI BgD Transactions on Internet Research. 2002. Vol. 8, N 2. 2002. P. 40–45.
71. *Koren Y., Borenstein J.* Potential Field Methods and their Inherent Limitations for Mobile Robot Navigation // Proc. Int. Conf. on Robotics and Automation. 1991. Vol. 2. P. 1398–1404.
72. *Macek K., Petrovic I., Ivanjko E.* An Approach to Motion Planning of Indoor Mobile Robots // Proc. IEEE Int. Conf. on Industrial Technology. 2003. P. 969–973.
73. *Stentz A.* The Focussed D* Algorithm for Real-Time Replanning // Proc. Int. Joint Conf. on Artificial Intelligence. 1995.
74. *Seder M., Macek K., Petrovic I.* An integrated approach to real-time mobile robot control in partially known indoor environments // Proc. 31st Ann. Conf. of IEEE Industrial Electronics Society. 2005.
75. *Philippesen R., Siegwart R.* Smooth and Efficient Obstacle Avoidance for a Tour Guide Robot // ICRA'03. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, 2003.
76. *La Valle S.M.* Rapidly-Exploring Random Trees // A New Tool for Path Planning. 1998.
77. *Shimoda S., Kuroda Y., Iagnemma K.* High Speed Navigation of Unmanned Ground Vehicles on Uneven Terrain Using Potential Fields // Robotica. 2007. Vol. 25. N 4. P. 409–424.

78. *Matias L.P.N., Santos T.C., Wolf D.F., Souza J.R.* Path Planning and Autonomous Navigation using AMCL and AD* // Proc. The 12th Latin American Robotics Symp. (LARS) and The 3rd Brazilian Symp. on Robotics (LAPS-SBR). 2015.
79. *Moon C.-B., Chung W.* Practical Probabilistic Trajectory Planning Scheme based on the Rapidly Exploring Random Trees for Two-Wheeled Mobile Robots // Int. J. Precision Engineering and Manufacturing. 2016. Vol. 17. N 5. P. 591–596.
80. *Walambe R., Agarwal N., Kale S., Joshi V.* Optimal Trajectory Generation for Car-type Mobile Robot using Spline Interpolation // IFAC-PapersOnLine. 2016. Vol. 49. Iss. 1. P. 601–606.
81. *Yuan H., Shim T.* Model Based Real-Time Collision-Free Motion Planning for Nonholonomic Mobile Robots in Unknown Dynamic Environments // Int. J. Precision Engineering and Manufacturing. 2013. Vol. 14. N 3. P. 359–365.
82. *Kawabata K.* A trajectory generation method for mobile robot based on iterative extension-like process // Artificial Life and Robotics. 2016. 28 July. P. 1–10.
83. *Raghvendra V.* Cowlagi Hierarchical Hybrid Control with Classical Planning and Trajectory Optimization // IFAC-PapersOnLine. 2015. Vol. 48, Is. 27. P. 175–180.
84. *Ellips Masehian, Yalda Katebi.* Sensor-Based Motion Planning of Wheeled Mobile Robots in Unknown Dynamic Environments // J. Intelligent & Robotic Systems. 2014. Vol. 74, Is. 3. P. 893–914.
85. *Vladislav Nenchev, Calin Belta, Jorg Raisch.* Optimal motion planning with temporal logic and switching constraints // Proc. 14th European Control Conf. ECC. 2015. P. 1141–1146.
86. *Lim Chee Wang, Lim Ser Yong, Marcelo H. Ang Jr.* Hybrid of Global Path Planning and Local Navigation implemented on a Mobile Robot in Indoor Environment // <http://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/1157868/authors>
87. *Liang X.-D., Li L.-Y., Wu J.-G., Chen H.-N.* Mobile robot path planning based on adaptive bacterial foraging algorithm // J. Central South University. December 2013. Vol. 20, Is. 12. P. 3391–3400.
88. *Deepak B.B.V.L., Parhi D.R.* PSO based path planner of an autonomous mobile robot / Centr. Europ. J. Computer Science. June 2012. Vol. 2, Is. 2. P. 152–168.
89. *Ahmad R., Plapper P.* Path planning self-learning Algorithm for a dynamic changing environment // MATEC Web of Conferences 42, 03002 (2016). DOI:10.1051/mateconf/20164203002
90. *Nohaidda Binti Sariff, Nur Hidayatul Nadiyah Bt Abd Wahab.* Automatic Mobile Robot Obstacles Avoidance in a Static Environment by using a Hybrid Technique based on Fuzzy Logic and Artificial Neural Network // 4th Int. Conf. on Artificial Intelligence with Applications in Engineering and Technology. 2014.
91. *Lo C.-W., Wu K.-L., Lin Y.-C., Liu J.-S.* Robot Navigation Tasks in Surveillance // 2nd Int. Conf. on Robot Intelligence Technology and Applications, Denver, Colorado, USA, Advances in Intelligent Systems and Computing. Springer Verlag, December 2013.
92. *Li I.-H., Chien Y.-H., Wang W.-Y., Kao Y.-F.* Hybrid Intelligent Algorithm for Indoor Path Planning and Trajectory-Tracking Control of Wheeled Mobile Robot // Int. J. Fuzzy Systems. August 2016. Vol. 18, Is. 4. P. 595–608.
93. *Almasri M.M., Elleithy K.M., Abrar M.* Development of Efficient Obstacle Avoidance and Line Following Mobile Robot with the Integration of Fuzzy Logic System in Static and Dynamic Environments // Alajlan Computer Science and Engineering. Department University of Bridgeport Bridgeport. 2016.
94. *Mac T.T., De Keyser R., Tran T.D., Vu T.* MIMO Fuzzy Control for Autonomous Mobile Robot // Computational Intelligence and Neuroscience. 2016. Vol. 2016. 10 p. <http://dx.doi.org/10.1155/2016/9548482>.

95. *Gerdelan A.P., Reyes N.H.* Synthesizing Adaptive Navigational Robot Behaviours Using a Hybrid Fuzzy A* Approach // <http://www.massey.ac.nz/~nhreyes/MASSEY/159741/Lectures/Gerdelan-Reyes.pdf>
96. *Babak Ranjbar, Javad Mahmoodi, Hasan Karbasi, Gholam Dashti, Ali Omidvar.* Robot Manipulator Path Planning Based on Intelligent Multi-resolution Potential Field // *Int. J. u- and e- Service, Science and Technology.* 2015. Vol. 8. N 1. P. 11–26 <http://dx.doi.org/10.14257/ijunesst.2015.8.1.02>
97. *Răzvan Tănăsie.* Enhanced Graphic Simulator for Dynamic Fuzzy Path Finding Using Potential Fields // https://www.researchgate.net/publication/266464182_Enhanced_Graphic_Simulator_for_Dynamic_Fuzzy_Path_Finding_Using_Potential_Fields
98. *Tsourveloudis N.C., Valavanis K.P., Hebert T.* Autonomous Vehicle Navigation Utilizing Electrostatic Potential Fields and Fuzzy Logic // *IEEE Transactions on robotics and automation.* August 2001. Vol. 17, N 4.
99. *Mohammad Abdel Kareem Jaradat, Mohammad H. Garibeh, Eyad A. Feilat.* Autonomous mobile robot dynamic motion planning using hybrid fuzzy potential field // *Soft Comput.* 2012. Vol. 16. P. 153–164. DOI 10.1007/s00500-011-0742-z.
100. *Jong-Wook Park, Hwan-Joo Kwak, Young-Chang Kang, Dong W. Kim.* Advanced Fuzzy Potential Field Method for Mobile Robot Obstacle Avoidance // *Hindawi Publishing Corp. Computational Intelligence and Neuroscience.* 2016. Article ID6047906. 13 p. <http://dx.doi.org/10.1155/2016/6047906>.
101. *Hromatka M., Holt M., West J., Biaz S.* A fuzzy logic approach to collision avoidance in smart UAVs // http://www.eng.auburn.edu/files/acad_depts/csse/csse_technical_reports/csse12-05.pdf.
102. *Ahmed A.A., Abdalla T.Y., Abed A.A.* Path Planning of Mobile Robot Using Fuzzy-Potential Field Method // *Iraq J. Electrical and Electronic Engineering.* 2015. Vol. 11, N 1.
103. *Muhammad Abdullah.* Mobile Robot Navigation using potential fields and market based optimization // *Studies from the Department of Technology at Orebro University.* 2013.
104. *Платонов А.К., Карпов И.И., Кирильченко А.А.* Метод потенциалов в задаче прокладки трассы. М.: Препринт Ин-та прикл. матем. АН СССР, 1974. 27 с.
105. *Khatib O.* Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots// *IEEE Int. Conf. Robotics and Automation.* 1985. P. 500–505.
106. *Khatib O.* Real-Time Obstacles Avoidance for Manipulators and Mobile Robots // *Int. J. Robotics Research.* 1986. Vol. 5. N 1. P. 90–98.
107. *Brooks R.A.* Self calibration of motion and stereo vision for mobile robots // *IEEE Int. Robotics and Automation,* 1986.
108. *Ichikawa Y., Fujie M., Ozaki N.* On mobility and autonomous properties of mobile robots // *Robot.* 1984. N 44. P. 31–36.
109. *Koditschek D.E.* Task encoding: toward a scientific paradigm for robot planning and control // *Robotics and Automation systems,* 1992. Vol. 9, N 1/2. P. 5–39.
110. *Rimon E., Koditschek D.E.* The construction of analytic diffeomorphisms for star worlds. // *IEEE Int. Conf. Rob. and Autom,* 1989: Proc. Washington etc., 1989. Vol. 1. P. 21–26.
111. *Pozna C., Precup R.-E., Koczy L.T., Ballagi A.* Potential field-based approach for obstacle avoidance trajectories // *The IPSI BgD Transactions on Internet Res.* 2002. Vol. 8, N 2. P. 40–45.
112. *Adams M.D., Hu Huosheng, Probert P.J.* Towards a real-time architecture for obstacle avoidance and path palnning in mobile robots // *IEEE Int. Conf. Robotics and Automation.* 1990. P. 584–589.

113. *Hauge T., Brady M., Cameron S.* Using moments to plan paths for the Oxford AGV // IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, 1990. P. 210–215.
114. *Borenstein J., Koren Y.* Real-time Obstacle Avoidance for Fast Mobile Robots In Cluttered Environments // IEEE Int. Conf. Robotics and Automation. 1990. P. 572–577.
115. *Uusitalo T., Johansson S.J.* A Reactive Multi-agent Approach to Car Driving using Artificial Potential Fields // Proc. IEEE Conf. on Computational Intelligence and Games. 2011. P. 203–210.
116. *Ge S.S., Cui Y.J.* New Potential Functions for Mobile Robot Path Planning // IEEE Transactions on Robotics and Automation. 2000. Vol. 16, N 5. P. 615–620.
117. *Soloviev V.V., Pshikhopov V.K., Shapovalov I.O., Finaev V.I., Beloglazov D.A.* Planning of the mobile robot motion in non-deterministic environments with potential fields method // Int. J. Applied Engineering Res. 2015. Vol. 10. P. 41954–41961.
118. *Beloglazov D.A., Finaev V.I., Titov A.E., Shapovalov I.O., Soloviev V.V.* Group robot control in non-deterministic environments using the potential field method // 16th Int. Conf. on Control, Automation and Systems (ICCAS2016). Oct. 16–19, Gyeongju, Korea. 2016.
119. *Shapovalov I., Soloviev V., Finaev V., Kosenko E., Zargaryan J.* Research of graph-analytical methods for a vehicle motion planning (ICCAS2015) // 15th Int. Conf. on Control, Automation and Systems. Proc 2015. P. 585–591.
120. *Hoy M., Matveev A.S., Savkin A.V.* Algorithms for collision-free navigation of mobile robots in complex cluttered environments: A survey // Robotica. 2015. Vol. 33(3). P. 463–497.
121. *Pshikhopov V.Kh., Ali A.S.* Hybrid motion control of a mobile robot in dynamic environments // IEEE Int. Conf. on Mechatronics, ICM 2011. Proc. P. 540–545.
122. *Pshikhopov V., Medvedev M., Kolesnikov A. et al.* Decentralized Control of a Group of Homogeneous Vehicles in Obstructed Environment // J. Control Science and Engineering. 2016. Vol. 2016. Article ID7192371. 8 p.
123. *Пишихов В.Х., Медведев М.Ю.* Децентрализованное управление группой однородных подвижных объектов в двумерной среде с препятствиями // Мехатроника, автоматизация, управление. 2016. Т. 17, № 5. С. 346–353.
124. *Федосов Б.Т.* Управление неустойчивыми объектами // <http://model.exponenta.ru/>
125. *Формальский А.М.* О стабилизации перевернутого маятника с неподвижной или подвижной точкой подвеса // Докл. АН. 2006. Т. 406, № 2. С. 175–179.
126. *Формальский А.М.* О стабилизации двойного перевернутого маятника при помощи одного управляющего момента // Изв. РАН. ТиСУ. 2006. № 3. С. 5–12.
127. *Николис Г., Пригожин И.* Самоорганизация в неравновесных системах. М., 1979.
128. *Хакен Г.* Синергетика. Иерархия неустойчивостей в самоорганизующихся системах и устройствах. М., 1985.
129. *Пишихов В.Х.* Аттракторы и репеллеры в конструировании систем управления подвижными объектами // Изв. ТРТУ. 2006. № 3(58). С. 117–123.
130. *Пишихов В.Х., Медведев М.Ю., Крухмалев В.А.* Позиционно-траекторное управление подвижными объектами в трехмерной среде с точечными препятствиями // Изв. ЮФУ. Техн. науки. 2015. № 1(162). С. 238–250.
131. *Зимин М.Ф.* Об уравнениях, определяющих площади, объемы и их границы // Математическое образование. 1930. № 1.
132. *Пишихов В.Х., Али А.С.* Обход локальных минимумов функции ошибки при движении робота в неопределенной среде // Изв. вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2011. № 6 (164). С. 26–31.

133. *Pshikhopov V., Medvedev M., Gaiduk A. et al.* Mathematical model of robot on base of airship // Proc. IEEE Conf. on Decision and Control. 2013. P. 959–964.
134. *Pshikhopov V., Medvedev M., Gaiduk A. et al.* Position-trajectory control system for robot on base of airship // Proc. IEEE Conf. on Decision and Control. 2013. P. 3590–3595.
135. *Cielniak G., Treptow A., Duckett T.* Quantitative Performance Evaluation of a People Tracking System on a Mobile Robot // Proc. Eur. Conf. on Mobile Robots (ECMR). Ancona, Italy, 2005.
136. *Ferrara A., Rubagotti M.* Sliding Mode Control of a Mobile Robot for Dynamic obstacle Avoidance Based on a Time-Varying Harmonic Potential Field // ICRA. Workshop: Planning, Perception and Navigation for Intelligent Vehicles. 2007.
137. *Ajith Abraham.* Neuro Fuzzy Systems: State-of-the-art Modeling Techniques // School of Computing & Information Technology. Monash University, Australia, 2000. <http://ajith.softcomputing.net>
138. *Viharos Zs.J., Kis K.B.* Survey on Neuro-Fuzzy Systems and their Applications in Technical Diagnostics // 13th IMEKO TC10 Workshop on Technical Diagnostics Advanced measurement tools in technical diagnostics for systems' reliability and safety June 26–27, 2014.
139. *Donner R.F.* Neural Fuzzy Systems // Abo Akademi University. 1995.
140. *Vieira J., Dias F.M., Mota A.* Neuro-Fuzzy Systems: A Survey 2000. <http://www.cce.uma.pt/morgado/down/483-343.pdf>
141. *Canny J.F., Lin M.C.* An opportunistic global path planner // Proc. IEEE Int. Conf. On Robotics and Automation. 1990. P. 1554–1559.
142. *Mohanraj T., Arunkumar S., Raghunath M., Anand M.* Mobile Robot Path Planning using Ant Colony Optimization // Int. J. Research in Engineering and Technology. 2014. Vol. 3, Iss. 11. P. 1–6.
143. *Анохин П.К.* Общая теория функциональных систем организма // Прогресс биологической и медицинской кибернетики. М.: Медицина, 1974. С. 52–110.
144. *Чернухин Ю.В.* Микропроцессорное и нейрокомпьютерное управление адаптивными мобильными роботами: Учеб. пос. Таганрог: Изд-во ТРТИ, 1993. 91 с.
145. *Borenstein J., Koren Y.* The vector field histogram – fast obstacle avoidance for mobile robots // IEEE J. Robotics and Automation. 1991. Vol. 7, N 3. P. 278–288.
146. *Borenstein J., Raschke U.* 1991. Real-time Obstacle Avoidance for Non-Point Mobile Robots // Proc. Fourth World Conf. on Robotics Research, Pittsburgh, Pennsylvania, Sept. 17–19. 1991. P. 2.1–2.9. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www-personal.umich.edu/~johannb/Papers/paper30.pdf>, свободный
147. *Ulrich I., Borenstein J.* VFH+: Reliable obstacle avoidance for fast mobile robots // Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation. 1998. P. 1572–1577.
148. *Ulrich I., Borenstein J.* VFH*: Local obstacle avoidance with look-ahead verification // Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation. 2000. P. 2505–2511.
149. *An D., Wang H.* VPH: a new laser radar based obstacle avoidance method for intelligent mobile robots // IEEE Int. Conf. on Intelligent Control and Automation. June 2004. Vol. 5. P. 4681–4685.
150. *Gong J., Duan Y., Man Y., Xiong G.* VPH+: An enhanced vector polar histogram method for mobile robot obstacle avoidance // Proc. IEEE Inter. Conf. on Mechatronics and Automation. 2007.

151. *Пьявченко А.О., Переверзев В.А.* Нейросетевая реализация DVH-метода планирования перемещения роботизированного объекта // Матер. Десятой Всерос. научно-практич. конф. «Перспективные системы и задачи управления» и Шестой молодежной школы-семинара «Управление и обработка информации в технических системах». В 2 т. Р. н/Д.: Изд-во Южн. федер. ун-та, 2015. Т. II. С. 277–288.
152. *Пьявченко А.О., Куценко А.С., Коваленко А.А.* Гибридная реализация нейросетевого DVH-метода планирования перемещения автономных мобильных объектов // Информационные технологии, системный анализ и управление (ИТСАиУ-2014): Сб. тр. XII Всерос. научн. конф. молодых ученых, аспирантов и студентов, г. Таганрог, 18–19 декабря 2014 г. Р. н/Д.: Изд-во Южн. фед. ун-та, 2015. Т. I. С. 134–141.
153. Scanning range finder (Distance Data Output Type for Robotic from Hokuyo). [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.hokuyo-aut.jp/02sensor/index.html#laser>, свободный
154. Network Interface Specification Teledyne BlueView ProScan Software. Doc Number: 202525–01. Rev.: A // URL: <http://www.blueview.com/assets/Uploads/downloads/202525-01-Manual-Network-Interface-Specificati on-ProScan3.10-REV-A.pdf> (Дата обращения 25.10.2016).
155. *Бронштейн И. Н., Семендяев К.А.* Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. 13-е изд., исправл. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. 544 с.
156. *Препатра Ф., Шеймос М.* Вычислительная геометрия. Пер. с англ. М.: Мир, 1989. 478 с.
157. *Корн Г., Корн Т.* Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1968.
158. *Гонсалес Р., Вудс Р.* Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2005. 1072 с.
159. Учебник по нейронным сетям. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.neuralnet.info>, свободный
160. *Круглов В.В., Борисов В.В.* Искусственные нейронные сети. Теория и практика. 2-е изд., стереотип. М.: Горячая линия Телеком, 2002. 382 с.
161. *Пишихов В.Х., Медведев М.Ю., Бекишев А.В.* Структурный синтез динамических регуляторов для позиционно-траекторных систем управления адаптивными мобильными роботами на базе дирижаблей // Тр. научно-технич. конф. «Экстремальная робототехника» / Под ред. Е.И. Юревича. СПб., 2002. С. 45–54.
162. *Пьявченко А.О., Переверзев В.А.* Комплексный метод ситуационного планирования поведения мобильного роботизированного объекта в условиях частичной неопределенности для двухмерного пространства // Изв. Южн. фед. ун-та. Технические науки. 2016. № 3(176). С. 98–115.
163. *Чернухин Ю.В.* Искусственный интеллект и нейрокомпьютеры. Таганрог: Изд-во ТРТУ, 1997. 273 с.
164. *Чернухин Ю.В.* Нейропроцессорные сети. Таганрог: Изд-во ТРТУ, 1999. 439 с.
165. Однородные управляющие структуры адаптивных роботов / А.В. Каляев, Ю.В. Чернухин, В.П. Носков, И.А. Каляев / Под ред. А.В. Каляева и Ю.В. Чернухина. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1990. 152 с. (Научные основы робототехники).
166. *Чернухин Ю.В., Сапрыкин Р.В., Бутов П.А.* Подходы к реализации нейросетевых систем управления интеллектуальными мобильными роботами // Изв. ЮФУ. Технические науки. 2011. № 1(114). С. 157–162.

167. *Чернухин Ю.В., Приемко А.А.* Моделирование поведения интеллектуальных агентов в динамических средах. Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2007. 233 с.
168. *Чернухин Ю.В., Писаренко С.Н.* Нейросетевая экстраполяция в системах управления интеллектуальных мобильных роботов // Докл. Юбилейной Междунар. конф. по нейрокибернетике. Р. н/Д.: Изд-во ООО «ЦВВР», 2002. Т. 2. С. 147–151.
169. *Гузик В.Ф., Переверзев В.А., Пьявченко А.О., Сапрыкин Р.В.* Принципы построения экстраполирующего многомерного нейросетевого планировщика интеллектуальной системы позиционно-траекторного управления подвижными объектами // Изв. ЮФУ. Технические науки. 2016. № 2(175). С. 67–80.
170. *Немудров В., Мартин Г.* Системы-на-кристалле. Проектирование и развитие. М.: Техносфера. 2004. 216 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
Принятые сокращения	5
Глава 1	
Системы интеллектуального позиционно-траекторного управления подвижными объектами в трехмерных средах	7
1.1. Проблемы автономного управления подвижными объектами в трехмерной среде.....	8
1.2. Структура системы управления и общая постановка задачи	11
1.3. Позиционно-траекторное управление при отработке глобальных траекторий движения в трехмерной среде.....	14
1.3.1. Математическая модель подвижного объекта	14
1.3.1.1. Системы координат	14
1.3.1.2. Уравнения кинематики подвижного объекта.....	18
1.3.1.3. Уравнения динамики подвижного объекта	20
1.3.1.4. Силы, действующие на подвижный объект	21
1.3.1.5 Математическая модель исполнительных механизмов...	23
1.3.1.6. Обобщенная модель подвижного объекта в векторно-матричной форме	25
1.3.2. Позиционно-траекторный регулятор.....	33
1.3.2.1. История развития метода	33
1.3.2.2. Форма представления траекторий движения	34
1.3.2.3. Постановка задачи и позиционно-траекторные законы управления регуляторного уровня	36
1.3.2.4. Алгоритмы оценивания возмущений.....	38
1.4. Постановка задачи разработки интеллектуального планировщика	48
1.5. Использование гибридных методов при планировании перемещения подвижных объектов	51
1.6. Модульная структура гибридной системы планирования перемещения подвижных объектов	60
Глава 2	
Планирование и управление движением с использованием неустойчивых режимов в трехмерной среде	64
2.1. Использование неустойчивых режимов в позиционно-траекторных системах управления подвижными объектами.....	64
2.2. Анализ возможности обхода препятствий в неустойчивом режиме с заданным направлением движения	69
2.3. Алгоритмы позиционно-траекторного управления с неустойчивыми режимами.....	74
2.3.1. Базовый алгоритм управления движением с неустойчивыми режимами	74
2.3.2. Алгоритм управления движением с неустойчивыми режимами и выбором направления движения.....	76
2.4. Моделирование системы управления с неустойчивыми режимами в средах с препятствиями	77
2.4.1. Описание сцен моделирования.....	77

2.4.2. Критерии оценки качества	81
2.4.3. Результаты моделирования регулятора с неустойчивыми режимами	83
2.5. Гибридный регулятор с неустойчивыми режимами и интеллектуальным уровнем выбора направления обхода препятствий	92
2.6. Анализ вычислительной сложности метода	97

Глава 3

Методы локального планирования траекторий с применением виртуальных полей.....	100
3.1. Модуль планирования траекторий на основе виртуальных полей....	100
3.2. Диагностика локальных минимумов виртуального поля	106
3.3. Вывод ПО из локальных минимумов виртуального поля	108
3.3.1. Модуль определения координат виртуальной цели для ПО с узкополосным локатором	108
3.3.2. Модуль определения координат виртуальной цели для ПО с широкополосным локатором.....	110
3.4. Планирование траекторий на основе нечеткой логики	113
3.5. Примеры реализации гибридных методов планирования траекторий	129
3.5.1. Гибридный VFC-метод планирования перемещения на основе виртуальных полей и разбиения пространства на ячейки	129
3.5.2. Гибридный VFFL-метод планирования перемещения на основе виртуальных полей и нечеткой логики	136
3.5.3. Гибридный VVF-метод планирования перемещения на основе виртуальных полей и нечеткой логики	142

Глава 4

Ситуационные методы нейросетевого планирования перемещения автономных подвижных объектов	150
4.1. Общие требования к методу нейросетевого планирования и обзор ближайших аналогов.....	150
4.1.1. Общие требования	150
4.1.2. Обзор зарубежных методов и отечественных аналогов	151
4.2. Улучшенный нейросетевой метод ситуационного планирования	160
4.2.1. Общие исходные положения.....	160
4.2.2. Описание DVH3D-NN метода.....	161
4.2.3. Синтез планировщика DVH3D-NN в нейроподобном базисе	178
4.3. Бионический метод поиска пути в трехмерном пространстве на базе нейроподобных структур.....	193
4.3.1. Постановка и формализация задачи планирования применительно к рассматриваемому методу	193
4.3.2. Применение прогнозирования в бионическом методе интеллектуального планирования на базе нейроподобных структур	200
4.3.3. Моделирование бионического метода интеллектуального планирования на базе нейроподобных структур.....	204
4.4. Оценка вычислительной эффективности методов ситуационного планирования	208
Заключение.....	213
Литература	218