

18. Kiselev L.V., Medvedev A.V. Traektornoe obsledovanie fizicheskikh poley okeana i ikh anomalii s pomoshch'yu ANPA [Trajectory survey of physical fields of the ocean and their anomalies using ANPA], *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika* [Underwater research and robotics], 2011, No. 1 (11), pp. 24-31.
19. Bagnickit A.V., Inzarcev A.V. Avtomatizatsiya podgotovki missii dlya avtonomnogo neobitaemogo podvodnogo apparata v zadachakh obsledovaniya akvatoriy [Automation of mission preparation for Autonomous unmanned underwater vehicle in the tasks of water areas survey], *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika* [Underwater research and robotics], 2010, No. 2 (10), pp. 17-24.
20. Tufanov I.E., Shcherbatyuk A.F. Razrabotka algoritmov gruppovogo povedeniya ANPA v zadache obsledovaniya lokal'nykh neodnorodnostej morskoy sredy [Development of algorithms of group behavior of ANPA in the problem of survey of local inhomogeneities of the marine environment], *Upravlenie bol'shimi sistemami* [Management of large systems], 2012, No. 36, pp. 262-284.
21. Vaulin YU.V., Dubrovin F.S., Kushnerik A.A. i dr. Malogabaritnyy avtonomnyy neobitaemyy apparat MARK novogo pokoleniya dlya vypolneniya gruppovykh operatsiy [Small-sized Autonomous uninhabited device MARK of new generation for group operations], *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* [Mechatronics, automation, control], 2012, No. 6, pp. 59-65.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. Ю.В. Матвиенко.

Киселев Лев Владимирович – Институт проблем морских технологий ДВО РАН; e-mail: kiselev@marine.febras.ru; 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 5а; тел.: 84322432674, 84951925540; д.т.н.; г.н.с.

Медведев Андрей Владимирович – e-mail: auv@list.ru; тел.: 89147081014; с.н.с.

Kiselev Lev Vladimirovich – IMTP FEB RAS; e-mail: kiselev@marine.febras.ru; 5a, Suhanov street, Vladivostok, 690091, Russia; phone: +74322432674, +74951925540; dr. of eng. sc.; chief researcher.

Medvedev Andrey Vladimirovich – e-mail: auv@list.ru; phone: +79147081014; senior research.

УДК 621.865.8

DOI 10.23683/2311-3103-2018-3-197-209

Д.А. Белоглазов, В.В. Соловьев, И.О. Шаповалов

ГИБРИДНЫЙ МЕТОД ПЛАНИРОВАНИЯ ТРАЕКТОРИЙ ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ ВИРТУАЛЬНЫХ ПОЛЕЙ

Целью работы является решение задачи планирования перемещения подвижного объекта в трехмерной среде с подвижными препятствиями. Подвижный объект оснащен локатором ограниченной дальности действия. Для решения задачи выполнен анализ ряда работ, по результатам которого предложено использование гибридных систем планирования траекторий перемещения подвижных объектов. Рассмотрены несколько вариантов структурной реализации многомодульных систем планирования и в результате для реализации выбрана последовательная гибридная структура системы планирования траекторий. Данная структура VFC-планировщика (virtual field cell) основана на методе виртуальных полей и разбиении на окружающего пространства на ячейки. Приводится трехмерная реализация метода виртуальных полей с использованием экспоненциальных функций отталкивания от препятствий с учетом взаимной скорости подвижного объекта и препятствий. Предложен алгоритм диагностики области локального минимума поля с использованием буфера, также позволяющий диагностировать ситуации попадания подвижного объекта в области с циклическими траекториями. Для повышения эффективности метода в трехмерных средах предложен алгоритм анализа облака точек препятствий позволяющий вычислить координаты виртуальной целевой точки. В этом алгоритме поле зрения локатора разделяется на призмы, среди которых ищется призма с наименьшим количеством точек препятствий и расположенная на наименьшем угловом расстоянии до целевой

точки. Координаты центра ее основания становятся виртуальной целевой точкой. Приведены модельные эксперименты по планированию траекторий подвижного объекта. Полученные результаты свидетельствуют об эффективности предложенной системы алгоритмов для решения задачи безопасного перемещения подвижного объекта в трехмерной среде с подвижными препятствиями по сравнению с базовым методом виртуальных полей.

Планирование траектории; метод виртуальных полей; локальный минимум поля; анализ облака точек локатора.

D.A. Beloglazov, V.V. Soloviev, I.O. Shapovalov

HYBRID METHOD OF PLANNING TRAJECTORIES OF MOBILE OBJECTS BASED ON VIRTUAL FIELDS

The aim of the work is to solve the problem of the planning of a vehicle motion in a three-dimensional environment with moving obstacles. The vehicle is equipped with a limited-range locator. To solve the problem, an analysis of well-known publications was carried out, the results of which were used to propose the structures of hybrid systems for the path planning of vehicles. Several variants of the structural implementation of multi-module planning systems are considered and as a result, a sequential hybrid structure of the trajectory planning system has been chosen for implementation. This structure of the VFC-planner (virtual field cell) is based on the method of virtual fields and division of the surrounding space into cells. We present a three-dimensional implementation of the method of virtual fields using exponential functions of repulsion from obstacles considering relative velocity of the vehicle and obstacles. The algorithm for diagnostics of areas of the local minimum of a field using a buffer is proposed. This algorithm also makes it possible to diagnose the situations of the vehicle got stuck in areas with cyclic trajectories. To increase the efficiency of the method in three-dimensional environments, the algorithm is proposed for analyzing the clouds of points belonging to obstacles. It makes it possible to calculate the coordinates of the virtual target point. The field of view of the locator is divided into prisms. The prism containing the smallest number of obstacle points and located at the smallest angular distance from the target point is looked for. The coordinates of the center of its base become a virtual target point. The results of the simulation of the path planning for a vehicle are given. The obtained results testify the efficiency of the proposed algorithms for solving the task of the safe motion of a vehicle in a three-dimensional environment with moving obstacles relative to the basic method of virtual fields.

Path planning; vehicle; virtual fields; local minimum; sensor data processing.

Введение. Одним из перспективных способов повышения эффективности систем планирования и управления подвижных объектов (ПО) является применение гибридных методов, которые позволяют сочетать наилучшие свойства различных алгоритмов. Здесь под гибридизацией понимается сочетание базовых алгоритмов планирования траекторий с целью повышения эффективности функционирования подвижных объектов. Однако гибридные подходы к планированию траекторий перемещения еще недостаточно развиты. В большинстве известных работ, посвященных совершенствованию систем планирования траекторий, исследуются базовые методы планирования траекторий перемещения ПО в средах со стационарными препятствиями простой формы. Для случаев, когда ПО перемещается в сложных средах, предлагаются гибридные подходы.

Например, в работах [1–7] рассмотрены подходы к планированию траекторий подвижных объектов, в основе которых применяется метод потенциальных полей в сочетании с другими графо-аналитическими методами, генетическими алгоритмами, методами оптимального управления, A*- алгоритмом. В работах [8–10] рассмотрены биоинспирированные алгоритмы планирования траекторий подвижных объектов на основе бактериального алгоритма, метода роя частиц и муравьиного алгоритма. В работах [11–18] рассмотрены методы планирования траекторий на основе нечеткой логики в сочетании с нейросетевыми подходами, D*- и A*-алгоритмами, поведенческими подходами, методом потенциальных полей.

Анализ работ показывает, что отсутствие единой методики разработки гибридных систем планирования траекторий затрудняет процесс их синтеза, снижает их эффективность и ограничивает возможности их применения в случае изменения характера среды и/или параметров ПО.

Постановка задачи. Необходимо организовать перемещение ПО в трехмерной среде с подвижными препятствиями из точки $A(x_0, y_0, z_0)$ в точку $B(x_g, y_g, z_g)$. Априорная информация о расположении и форме препятствий отсутствует. Сенсорная подсистема ПО представляет собой впередсмотрящий локатор ограниченной дальности действия $L=5$ м. Локатор периодически формирует набор интенсивностей отраженных лучей с шагом 3° . Угол раскрытия диаграммы локатора от -45° до $+45^\circ$ по горизонтали и от -15° до $+15^\circ$ по вертикали. В качестве ПО рассматривается гексакоптер [19], а в качестве регулятора - позиционный регулятор [20].

Необходимо реализовать планировщик перемещения ПО. На каждом шаге моделирования планировщик должен формировать желаемые координаты и углы ориентации ПО с учетом влияния движущихся препятствий.

Модульная структура гибридной системы планирования перемещения подвижных объектов. Рассмотрим виды структурной реализации систем планирования траектории ПО. На вход системы планирования траектории поступает информация о текущем расположении препятствий в среде, цель миссии и начальные условия. Объем этой информации варьируется в зависимости от того, какой метод или подход к планированию траекторий применяется.

В зависимости от характеристик ПО и среды его функционирования система планирования траекторий может быть построена по одномодульному (рис. 1,а) и многомодульному (рис. 1,б) принципам.

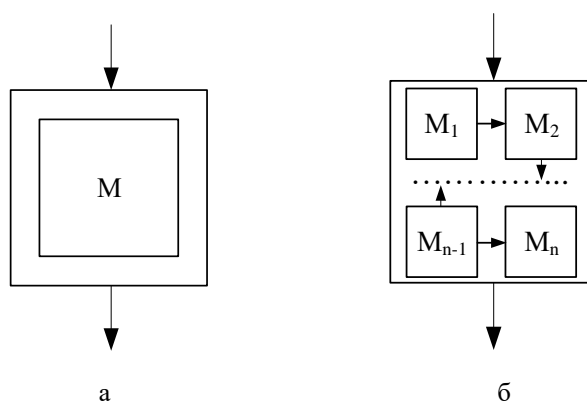


Рис. 1. Виды систем планирования траектории

В многомодульных системах некоторые модули могут функционировать для настройки параметров базовых методов в процессе планирования траекторий. Многомодульные системы планирования траекторий будем называть гибридными.

В зависимости от характера взаимодействия функциональных модулей можно выделить два типа гибридных систем планирования траекторий. К первому типу можно отнести системы, в которых функционируют несколько базовых методов планирования траекторий (рис. 2). В таких системах каждый модуль выполняет дополняющие функции для других модулей. В системах планирования траекторий второго типа можно выделить модули, которые модифицируют параметры базовых методов или входную информацию (рис. 3).

На рис. 2,а представлена последовательная структура гибридной системы планирования траекторий. Выходные сигналы предшествующих модулей являются входными для последующих модулей. Например, по данному принципу можно построить систему планирования траекторий на основе D*-алгоритма и метода потенциальных полей, когда с помощью D*-алгоритма формируется желаемая траектория перемещения ПО, точки которой будут являться целевыми для метода потенциальных полей.

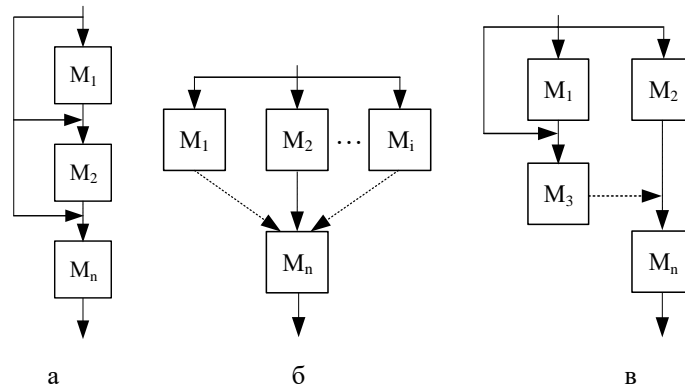


Рис. 2. Структуры гибридных систем планирования первого типа

На рис. 2,б показана параллельная структура гибридной системы планирования траекторий. Здесь выходные сигналы модулей M_i являются входными для модуля M_n . Например, по данному принципу можно построить систему планирования траекторий на основе поведенческого подхода. Модули M_1, M_2, \dots, M_i реализуют отдельные элементарные поведения, а модуль M_n выполняет функции координатора.

На рис. 2,в показана смешанная структура гибридной системы планирования траекторий, сочетающая оба предыдущих варианта реализации планировщиков.

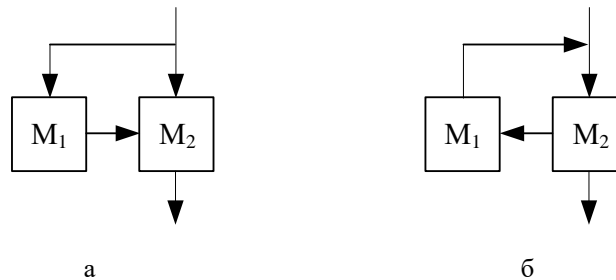


Рис. 3. Структуры гибридных систем планирования второго типа

На рис. 3,а представлена гибридная система планирования, в которой модуль M_1 модифицирует параметры модуля M_2 , реализующего один из базовых методов. Например, по данному принципу можно построить систему планирования траекторий на основе метода потенциальных полей, параметры потенциальных сил которого модифицируются контроллером с нечеткой логикой.

На рис. 3,б представлена гибридная система планирования, в которой модуль M_1 модифицирует входную информацию модуля M_2 . В модуле M_2 реализован один из базовых методов. Например, по данному принципу можно построить систему планирования траекторий на основе метода потенциальных полей, в которой специальный алгоритм рассчитывает координаты виртуальной целевой точки.

Очевидно, что в гибридных системах планирования траекторий модули могут функционировать с разной дискретностью. Это дает возможность снижать вычислительные затраты на планирование путем включения некоторых модулей только при изменении информации о расположении препятствий. С другой стороны, это требует согласования функционирования модулей между собой.

Метод виртуальных полей. Метод потенциальных полей характеризуется такими достоинствами, как низкие требования к бортовому вычислителю и сенсорной подсистеме ПО, возможность использования неточной информации о координатах точек препятствий и целевой точке, широкие возможности для модификации и т.д.

Но наряду с достоинствами данному методу присущ и ряд недостатков, включающих возникновение областей локального минимума поля, низкая эффективность при применении в трехмерных средах и в плоских средах со сложными препятствиями, невозможность учета динамики ПО и, как следствие, возможная нереализуемость планируемой траектории.

Указанные недостатки делают затруднительным самостоятельное применение данного метода для планирования траекторий ПО в недетерминированных средах. При этом, широкие возможности модификации позволяют синтезировать гибридные методы планирования, нивелирующие эти недостатки.

Рассмотрим *непотенциальное* поле, когда отталкивающие силы зависят от скорости ПО и, следовательно, являются *неконсервативными*. Рассмотрим воздействие виртуальных сил на ПО, используя пояснения на рис. 4.

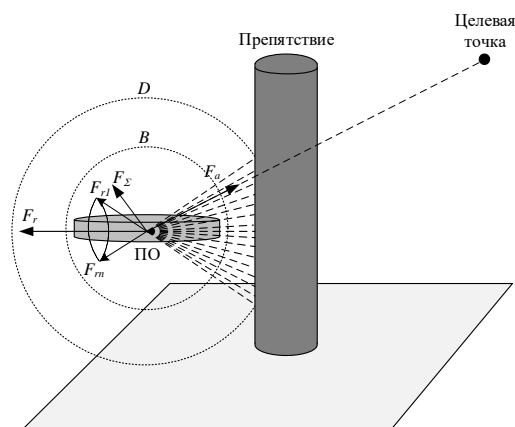


Рис. 4. Воздействие виртуальных сил на ПО

Движение ПО к цели осуществляется под воздействием притягивающей виртуальной силы F_a , являющейся функцией координат ПО и целевой точки. Точки препятствия, попавшие в зону действия сенсорной системы ПО, формируют отталкивающие виртуальные силы F_{ri} с равнодействующей F_r , являющейся функцией координат ПО, его скорости и координат точек препятствий. Направление и модуль равнодействующей силы притяжения к цели и отталкивания от препятствия F_s определяют последующее движение ПО.

Так как виртуальные силы обычно прикладываются к центру масс или к центру симметрии ПО, то необходимо вводить некоторую зону безопасности радиусом B вокруг ПО и учитывать ее размеры при планировании его движения. Иногда целесообразно вводить область действия отталкивающих виртуальных сил радиусом D , меньшую, чем дальность действия сенсорной подсистемы ПО, за пределами которой эти силы не действуют. Это необходимо для того, чтобы не учитывать воздействие препятствий, находящихся на значительном удалении от ПО.

В каждый момент времени, в процессе движения ПО к цели, компоненты притягивающей виртуальной силы вычисляются в соответствии с выражением:

$$\begin{bmatrix} F_{aX} \\ F_{aY} \\ F_{aZ} \end{bmatrix} = \frac{k}{d_g} \left(\begin{bmatrix} x_0^k \\ y_0^k \\ z_0^k \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} \right), \quad (1)$$

где d_g – расстояние между ПО и целью

($d_g = \sqrt{(x_0 - x_0^k)^2 + (y_0 - y_0^k)^2 + (z_0 - z_0^k)^2}$); k – коэффициент ($k > 0$); x_0, y_0, z_0 и x_0^k, y_0^k, z_0^k – координаты ПО и целевой точки соответственно.

Компоненты отталкивающей виртуальной силы вычисляются в соответствии с выражением:

$$\begin{bmatrix} F_{riX} \\ F_{riY} \\ F_{riZ} \end{bmatrix} = c \cdot V_{kob} \cdot \exp(-b \cdot d_i) \cdot \begin{bmatrix} v_{ix} \\ v_{iy} \\ v_{iz} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где V_{kob} – скорость ПО относительно препятствия; d_i – расстояние от ПО до i -й точки препятствия ($d_i = \sqrt{(x_0 - x_{obi})^2 + (y_0 - y_{obi})^2 + (z_0 - z_{obi})^2}$); c, b – коэффициенты настройки ($c > 0, b > 0$); v_{ix}, v_{iy}, v_{iz} – проекции вектора

$$v_{ro} = [x_{obi} - x_0, y_{obi} - y_0, z_{obi} - z_0]^T, \quad (3)$$

на оси неподвижной системы координат.

В отличие от описания отталкивающих сил с использованием тригонометрических, гиперболических, логарифмических выражений [1], их представление в виде (2) позволяет более гибко настраивать отталкивающие виртуальные силы, действующие на ПО, за счет изменения амплитуды (коэффициент c) и степени затухания (коэффициент b) виртуального поля.

После расчета силы притяжения ПО к целевой точке и отталкивающих сил от препятствий и границ рабочей зоны компоненты равнодействующей силы виртуального поля могут быть найдены по формуле

$$\begin{bmatrix} F_X \\ F_Y \\ F_Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{aX} \\ F_{aY} \\ F_{aZ} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sum_i F_{riX} \\ \sum_i F_{riY} \\ \sum_i F_{riZ} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Координаты спланированной точки перемещения ПО на шаге Δt определяются выражением

$$\begin{bmatrix} x_0^c \\ y_0^c \\ z_0^c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix} \cdot \Delta t, \quad (5)$$

где Δt – шаг времени; x, y, z – координаты ПО в текущий момент времени; x_0^c, y_0^c, z_0^c – координаты спланированной точки.

Модуль диагностики локальных минимумов виртуального поля. Под локальным минимумом в поле виртуальных сил будем понимать некоторую область, в которой суммарный вектор сил F_{Σ} таков, что ПО не может продолжить движение к цели.

В данной работе для диагностики локальных минимумов виртуального поля в системе планирования перемещения координаты сохраняются ПО в буфер за последние n шагов и сравниваются с текущими координатами в соответствии с выражениями:

$$\begin{aligned} x_{0i} - x &\leq \Delta x, \\ y_{0i} - y &\leq \Delta y, \quad i=1, 2, \dots, n, \\ z_{0i} - z &\leq \Delta z, \end{aligned} \quad (6)$$

где x, y, z – текущие координаты ПО; x_{0i}, y_{0i}, z_{0i} – координаты ПО, сохраненные в буфере; $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ – заданные малые величины.

Если на текущем шаге планирования условия (6) выполняются хотя бы для одной тройки координат из сохраненных в буфере, то наращивается переменная s счетчика буфера ($s=s+1$), в противном случае переменная s приравнивается нулю ($s=0$). Если переменная счетчика достигнет заданной максимальной величины s_{max} , то можно сделать вывод, что ПО находится в области локального минимума поля.

Модельные эксперименты показали, что для диагностики сложных циклических движений достаточно величины переменной счетчика $s_{max} = 5$. Величины $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ целесообразно выбирать исходя из масштаба среды, в которой перемещается ПО, его динамики и размеров.

Модуль расчета координат виртуальной цели. Для повышения эффективности метода виртуальных полей в трехмерной среде предлагается специальный алгоритм расчета координат виртуальной целевой точки ПО. Виртуальная целевая точка заменяет глобальную до тех пор, пока в поле зрения локатора находятся препятствия или ПО не приблизится к цели на заданную величину.

Рассмотрим этапы алгоритма на основе рис. 5.

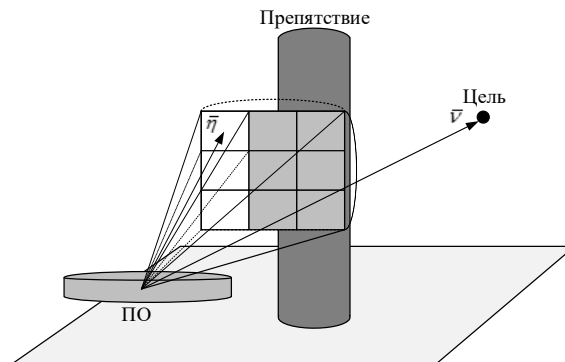


Рис. 5. Разбиение области видимости локатора на призмы

Шаг 1. Поле зрения локатора делится на n призм таким образом, чтобы основание каждой призмы было не меньше радиуса B .

Шаг 2. Рассчитывается количество точек препятствий m_i , ($i = 1, 2, \dots, n$) попадающих в каждую призму.

Шаг 3. Рассчитываются расстояния до точек препятствий d_{ij} , ($j = 1, 2, \dots, m_i$) в каждой призме.

Шаг 4. Для каждой призмы рассчитывается оценка загруженности по формуле

$$\varepsilon_i = \frac{m_i}{\sum_{j=1}^{m_i} d_{ij}}, \quad (i = 1, 2, \dots, n). \quad (7)$$

Таким образом, чем больше оценка загруженности (7), тем меньше точек препятствий попадает в призму.

Шаг 5. Выбираются k призм, для которых $\varepsilon_i > \varepsilon_{\min}$ (ε_{\min} – заданное пороговое значение, при котором она считается перспективной).

Шаг 6. Рассчитываются координаты направляющих векторов η_r , ($r = 1, 2, \dots, k$) к центрам основания призм.

Шаг 7. Определяются углы θ_r между каждым из направляющих векторов призм и направляющим вектором \bar{V} к целевой точке.

Шаг 8. Рассчитываются оценки предпочтительного направления перемещения ПО для каждой из k призм по формуле

$$S_r = \beta_1 \varepsilon_r + \beta_2 \frac{1}{\theta_r}, \quad r = 1, 2, \dots, k, \quad (8)$$

где β_1 и β_2 – весовые коэффициенты.

Призма с наибольшей оценкой (8) является наиболее предпочтительной для перемещения ПО. Координаты центра ее основания становятся виртуальной целью. Если на шаге 6 не было найдено ни одной перспективной призмы, то виртуальная целевая точка не назначается. Достоинством данного алгоритма является возможность его применения не только для вывода ПО из области локального минимума, но и для организации движения к целевой точке.

Структура гибридного VFC-планировщика. Структура гибридного VFC-планировщика (virtual field cell), основанного на методе виртуальных полей и разбиении на ячейки, представлена на рис. 6.

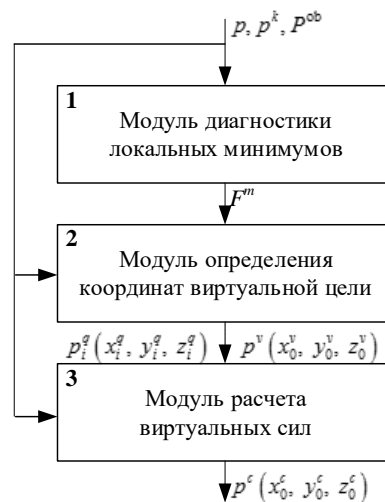


Рис. 6. Структура гибридного VFC-планировщика

В этом планировщике, в модуле диагностики локальных минимумов виртуального поля, реализован алгоритм с использованием буфера размерности n . На вход модуля 1 поступает массив P^{ob} данных о текущих и $n-1$ предыдущих координатах ПО. На выходе модуля формируется флаг F^m наличия или отсутствия локального минимума виртуального поля.

Модуль 2 предназначен для определения координат виртуальной целевой точки. На вход модуля 2 поступает информация о координатах точек препятствий $P^{ob}(X_{ob}, Y_{ob}, Z_{ob})$, находящихся в области действия сенсорной системы, текущих координатах ПО $p(x_0, y_0, z_0)$ и координатах целевой точки $p^k(x_0^k, y_0^k, z_0^k)$. На выходе модуля формируются координаты виртуальной целевой точки $p^v(x_0^v, y_0^v, z_0^v)$.

В модуле расчета виртуальных сил рассчитываются планируемые координаты $p^c(x_0^c, y_0^c, z_0^c)$ ПО. Отметим, что до тех пор, пока в буфер не будут занесены n значений координат ПО, модули 1 и 2 не функционируют, и желаемые координаты и ориентация ПО формируются модулем 3. Как видно из структуры VFC-планировщика, он относится ко второму типу гибридных систем планирования перемещения ПО.

Исследование VFC-планировщика перемещения ПО. Разработанный гибридный планировщик реализован в среде MatLab. При моделировании было принято следующее:

- ◆ зона безопасности $B=0,5$ м;
- ◆ область действия отталкивающих виртуальных сил $D=2,5$ м;
- ◆ коэффициенты отталкивающей силы виртуального поля $c=28,5$, $b=0,6$;
- ◆ коэффициент притягивающей силы виртуального поля $k=25$;
- ◆ девять подвижных препятствий (3 стены, 6 столбов);
- ◆ скорость препятствий 0,3 м/с;
- ◆ скорость гексакоптера 1 м/с.

На рис. 7 представлены результаты моделирования перемещения ПО с гибридным VFC-планировщиком на тестовой сцене при следующих начальных и конечных условиях: начальная точка $[1, 1, 1]$, конечная точка $[9, 2,5, 9]$.

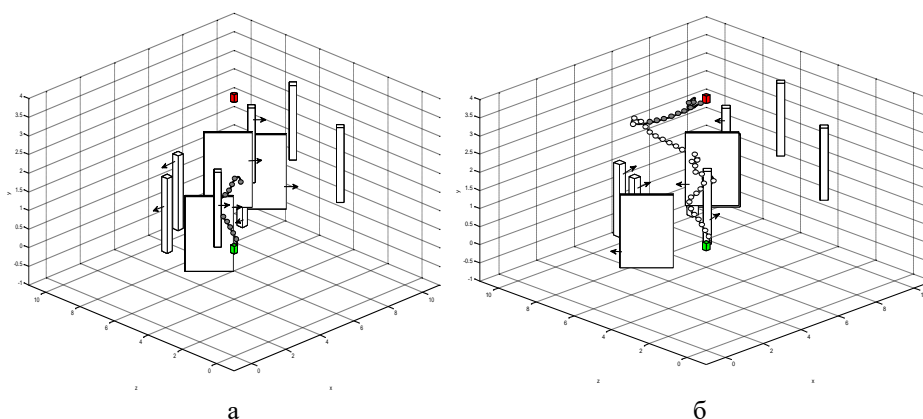


Рис. 7. Результаты моделирования работы VFC-планировщика: а – момент времени $t = 5,35$ с; б – момент времени $t = 21,4$ с

Выводы. Для оценки эффективности гибридного метода и сравнения его с базовым методом на основе виртуальных полей была проведена серия из 68 экспериментов на тестовой сцене при разных начальных и конечных условиях. По результатам экспериментов были получены значения критериев оценки качества системы с гибридным планировщиком [21], приведенные в табл. 1.

Таблица 1

Оценки качества систем с гибридным и базовым планировщиком

Критерий	Значение	
	Базовый	Гибридный
Показатель безопасности S_m	0,72	0,43
Показатель длины траектории движения P_L	0,72	0,64
Показатель времени выполнения задания t_m	0,13	0,14
Показатель успешного выполнения миссии F_m	0,23	0,32

По значениям критериев оценки качества системы построена сравнительная диаграмма VFC-метода и базового метода на основе виртуальных полей, показанная на рис. 8.

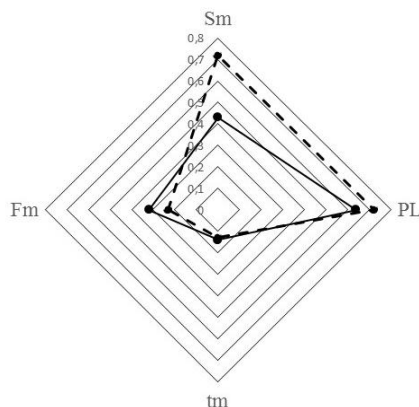


Рис. 8. Сравнительная диаграмма VFC-метода и базового метода на основе виртуальных полей

Из представленных диаграмм следует, что в системе с VFC-методом показатель безопасности ниже по сравнению с базовым методом виртуальных полей. Это связано с тем, что интеллектуальный модуль анализа облака точек препятствий позволяет выбирать направление движения ПО ближе к препятствиям, но при этом наблюдается увеличение показателя F_m успешности миссии на 28 %, что свидетельствует о целесообразности гибридизации метода.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Padilla Castaneda M.A., Savage J., Hernandez A. and Arambula Cosio F. Local Autonomous Robot Navigation Using Potential Fields // Motion Planning, Xing-Jian Jing (Ed.). – ISBN: 978-953-7619-01-5, InTech, 2008.
2. Masehian E., Amin-Naseri M.R. A Voronoi diagram-visibility graph-potential field compound algorithm for robot path planning // Journal of Intelligent & Robotic Systems. – 2004. – Vol. 21, No. 6. – P. 275-300.
3. Hsu P.-M., Lin C.-L., Yang M.-Y. On the Complete Coverage Path Planning for Mobile Robots // Journal of Intelligent & Robotic Systems. – June 2014. – Vol. 74, Issue 3. – P. 945-963.

4. *Korayem M.H., Nazemizadeh M., Nohooji H.R.* Optimal point-to-point motion planning of nonholonomic mobile robots in the presence of multiple obstacles // Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. – January 2014. – Vol. 36, Issue 1. – P. 221-232.
5. *Dr. Mohamed J.M., Abbas M.W.* Optimal Path Planning for Mobile Robot Based on Genetically Optimized Artificial Potential Field // Journal of Engineering and Development. – Dec 2012. – Vol. 16, No. 4. – ISSN 1813 - 7822.
6. *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.
7. *Barraquand J., Latombe J.-C.* Robot motion planning: A distributed representation approach // International Journal of Robotics Research. – 1991. – Vol. 10 (6). – P. 628-649.
8. *Liang X.-D., Li L.-Y., Wu J.-G., Chen H.-N.* Mobile robot path planning based on adaptive bacterial foraging algorithm // Journal of Central South University. – December 2013. – Vol. 20, Issue 12. – P. 3391-3400.
9. *Deepak, B.B.V.L., Parhi, D.R.* PSO based path planner of an autonomous mobile robot // Central European Journal of Computer Science. – June 2012. – Vol. 2, Issue 2. – P. 152-168.
10. *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 // International Journal of Applied Engineering Research. – 2015. – Vol. 10, Issue 21. – P. 41954-41961.
11. *Nohaidda Binti Sariff, Nur Hidayatul Nadiah 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 // 2014 4th International Conference on Artificial Intelligence with Applications in Engineering and Technology.
12. *Lo C.-W., Wu K.-L., Lin Y.-C., Liu J.-S.* Robot Navigation Tasks in Surveillance // 2nd International Conference on Robot Intelligence Technology and Applications, Denver, Colorado, USA, Advances in Intelligent Systems and Computing, Springer Verlag, December 2013.
13. *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 // International Journal of Fuzzy Systems. – August 2016. – Vol. 18, Issue 4. – P. 595-608.
14. *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>.
15. *Nguyen T.H., Kim D.H., Lee C.H., Kim H.K., Kim S.B.* Mobile robot localization and path planning in a picking robot system using kinect camera in partially known environment // Proceedings of the International Conference on Advances in Electrical Engineering and Related Sciences - Theory and Application (AETA 2016). Busan, South Korea; 8-10 December 2016. – Vol. 415 LNEE. – P. 686-701.
16. *Li W., Yang C., Jiang Y., Liu X., Su C.-Y.* Motion planning for omnidirectional wheeled mobile robot by potential field method // Journal of Advanced Transportation. – 2017. – Vol. 2017, No. 4961383.
17. *Pyavchenko A.O., Pereverzev V.A., Gurenko B.V.* Functional and modular organization of planning subsystems of mobile robot behaviour with partial uncertainty for the two-dimensional space // Proc. Of 2017 2nd International Conference on Control and Robotics Engineering, ICCRE 2017. May 2017. – No 7935031. – P. 1-7.
18. *Kamil F., et al.* New robot navigation algorithm for arbitrary unknown dynamic environments based on future prediction and priority behavior // Expert Systems with Applications. – November 2017. – Vol. 86. – P. 274-291.
19. *Moussid M., Sayouti A., Medromi H.* Dynamic Modeling and Control of a HexaRotor using Linear and Nonlinear Methods // International Journal of Applied Information Systems. – 2015. – Vol. 9, Issue 5. – P. 9-17.
20. *Pshikhopov V., Medvedev, M., Gurenko B., Beresnev M.* Basic algorithms of adaptive position-path control systems for mobile units // ICCAS 2015 - 2015 15th International Conference on Control, Automation and Systems. – 2015. – P. 54-59.
21. *Белоглазов Д.А., Гузик В.Ф., Косенко Е.Ю., Крухмалев В.А., Медведев М.Ю., Переверзев В.А., Пшихопов В.Х., Пьявченко А.О., Сапрыкин Р.В., Соловьев В.В., Финаев В.И., Чернухин Ю.В., Шаповалов И.О.* Интеллектуальное планирование траекторий подвижных объектов в средах с препятствиями / под ред. В.Х. Пшихопова. – М.: Физматлит, 2014. – 300 с. – ISBN 978-5-9221-1595-7.

REFERENCES

1. Padilla Castaneda M.A., Savage J., Hernandez A. and Arambula Cosio F. Local Autonomous Robot Navigation Using Potential Fields, *Motion Planning, Xing-Jian Jing (Ed.)*. ISBN: 978-953-7619-01-5, InTech, 2008.
2. Masehian E., Amin-Naseri M.R. A Voronoi diagram-visibility graph-potential field compound algorithm for robot path planning, *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2004, Vol. 21, No. 6, pp. 275-300.
3. Hsu P.-M., Lin C.-L., Yang M.-Y. On the Complete Coverage Path Planning for Mobile Robots, *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, June 2014, Vol. 74, Issue 3, pp. 945-963.
4. Korayem M.H., Nazemizadeh M., Nohooji H.R. Optimal point-to-point motion planning of nonholonomic mobile robots in the presence of multiple obstacles, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, January 2014, Vol. 36, Issue 1, pp. 221-232.
5. Dr. Mohamed J.M., Abbas M.W. Optimal Path Planning for Mobile Robot Based on Genetically Optimized Artificial Potential Field, *Journal of Engineering and Development*, Dec 2012, Vol. 16, No. 4. ISSN 1813 - 7822.
6. 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.
7. Barraquand J., Latombe J.-C. Robot motion planning: A distributed representation approach, *International Journal of Robotics Research*, 1991, Vol. 10 (6), pp. 628-649.
8. Liang X.-D., Li L.-Y., Wu J.-G., Chen H.-N. Mobile robot path planning based on adaptive bacterial foraging algorithm, *Journal of Central South University*, December 2013, Vol. 20, Issue 12, pp. 3391-3400.
9. Deepak, B.B.V.L., Parhi, D.R. PSO based path planner of an autonomous mobile robot, *Central European Journal of Computer Science*, June 2012, Vol. 2, Issue 2, pp. 152-168.
10. 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, *International Journal of Applied Engineering Research*, 2015, Vol. 10, Issue 21, pp. 41954-41961.
11. Nohaidda Binti Sariff, Nur Hidayatul Nadiah 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, *2014 4th International Conference on Artificial Intelligence with Applications in Engineering and Technology*.
12. Lo C.-W., Wu K.-L., Lin Y.-C., Liu J.-S. Robot Navigation Tasks in Surveillance, *2nd International Conference on Robot Intelligence Technology and Applications, Denver, Colorado, USA, Advances in Intelligent Systems and Computing, Springer Verlag, December 2013*.
13. 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, *International Journal of Fuzzy Systems*, August 2016, Vol. 18, Issue 4, pp. 595-608.
14. 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>.
15. Nguyen T.H., Kim D.H., Lee C.H., Kim H.K., Kim S.B. Mobile robot localization and path planning in a picking robot system using kinect camera in partially known environment, *Proceedings of the International Conference on Advances in Electrical Engineering and Related Sciences - Theory and Application (AETA 2016)*. Busan, South Korea; 8-10 December 2016, Vol. 415 LNEE, pp. 686-701.
16. Li W., Yang C., Jiang Y., Liu X., Su C.-Y. Motion planning for omnidirectional wheeled mobile robot by potential field method, *Journal of Advanced Transportation*, 2017, Vol. 2017, No. 4961383.
17. Pyavchenko A.O., Pereverzev V.A., Gurenko B.V. Functional and modular organization of planning subsystems of mobile robot behaviour with partial uncertainty for the two-dimensional space, *Proc. of 2017 2nd International Conference on Control and Robotics Engineering, ICCRE 2017, May 2017*, No. 7935031, pp. 1-7.
18. Kamil F., et al. New robot navigation algorithm for arbitrary unknown dynamic environments based on future prediction and priority behavior, *Expert Systems with Applications*, November 2017, Vol. 86, pp. 274-291.

19. *Moussid M., Sayouti A., Medromi H.* Dynamic Modeling and Control of a HexaRotor using Linear and Nonlinear Methods, *International Journal of Applied Information Systems*, 2015, Vol. 9, Issue 5, pp. 9-17.
20. *Pshikhopov V., Medvedev, M, Gurenko B., Beresnev M.* Basic algorithms of adaptive position-path control systems for mobile units, *ICCAS 2015 - 2015 15th International Conference on Control, Automation and Systems*, 2015, pp. 54-59.
21. *Beloglazov D.A., Guzik V.F., Kosenko E.Yu., Krukhmalev V.A., Medvedev M.Yu., Pereverzev V.A., Pshikhopov V.Kh., P'yavchenko A.O., Saprykin R.V., Solov'ev V.V., Finaev V.I., Chernukhin Yu.V., Shapovalov I.O.* Intellektual'noe planirovanie traektoriy podvizhnykh ob"ektov v sredakh s prepyatstviyami [Intelligent trajectory planning of moving objects in environments with obstacles], ed. by V.Kh. Pshikhopova. Moscow: Fizmatlit, 2014, 300 s. ISBN 978-5-9221-1595-7.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Я.Е. Ромм.

Белоглазов Денис Александрович – Южный федеральный университет; e-mail: d.beloglazov@gmail.com; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634371689; кафедра систем автоматического управления; к.т.н.; доцент.

Соловьев Виктор Владимирович – e-mail: soloviev-tti@mail.ru; кафедра систем автоматического управления; ст. преподаватель.

Шаповалов Игорь Олегович – e-mail: shapovalovio@gmail.ru; кафедра систем автоматического управления; ассистент.

Beloglazov Denis Alexandrovich – Southern Federal University; e-mail: d.beloglazov@gmail.com; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: 88634371689; the department of automatic control systems; cand. of eng. sc.; associate professor.

Soloviev Victor Vladimirovich – e-mail: soloviev-tti@mail.ru; the department of automatic control systems; senior lecturer.

Shapovalov Igor Olegovich – e-mail: shapovalovio@gmail.ru; the department of automatic control systems; assistant.

УДК 681.142

DOI 10.23683/2311-3103-2018-3-209-219

В.А. Балыбердин, А.М. Белевцев, О.А. Степанов

О ТЕСТИРОВАНИИ ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ МОБИЛЬНЫХ АСУ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Рассматриваются некоторые вопросы организационно-технологического плана в отношении тестирования ПС с учетом специфики прикладной области мобильных АСУ специального назначения (СН). При этом внимание уделяется таким важным факторам надежности ПС как завершенность и отказоустойчивость, которые имеют существенное значение для эффективности функционирования АСУ СН. Факторы восстанавливаемости и готовности ПС не рассматриваются как не критичные в условиях специфики рассматриваемых АСУ. Анализируются вопросы организации статического и динамического тестирования ПС завершенности и отказоустойчивости ПС. Отмечается, что существующие методы организации и проведения динамического тестирования завершенности ПС требуют использования достаточно объемной статистики отказов ПС, которую не всегда возможно получить в практических ситуациях. В этом плане предлагается оригинальный подход для реализации процедуры динамического тестирования завершенности ПС, основанный на обработке статистики положительных исходов тестирования ПС и позволяющий значительно упростить практическую реализацию процедуры тестирования. В качестве проверяемых