

№ 2 (187)

Раздел VI. Системы управления

УДК 681.513.66

DOI 10.18522/2311-3103-2017-1-146158

В.Х. Пшихопов, М.Ю. Медведев

**АЛГОРИТМЫ ПЛАНИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ ПОДВИЖНЫМИ
ОБЪЕКТАМИ В ТРЕХМЕРНОЙ СРЕДЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
НЕУСТОЙЧИВЫХ РЕЖИМОВ***

В статье рассматривается задача управления подвижным объектом в неопределенной трехмерной среде с подвижными и неподвижными препятствиями. Предлагается двухуровневая система, осуществляющая планирование и обработку заданной траектории движения. Проблема планирования траектории разделена на задачу планирования и обработку глобальных траекторий-миссий, и проблему локального планирования в области препятствий. Глобальная траектория строится на основе априорной информации о состоянии среды и начальной и конечной точках маршрута. Локальная траектория корректирует глобальную траекторию в случае возникновения препятствий, отсутствующих на карте. Предлагается система управления, осуществляющая обработку глобальной траектории на регуляторном уровне, и обход препятствий с использованием неустойчивых режимов. Также разрабатывается гибридная система, осуществляющая обход препятствий за счет использования неустойчивых режимов на нижнем уровне и интеллектуального алгоритма, определяющего требуемое направление обхода на верхнем уровне. Проводится анализ способов введения неустойчивых состояний. Показано, что использованием комплексных корней характеристического уравнения замкнутой системы позволяет осуществлять движение в неустойчивом режиме в заданном направлении. Предлагается процедура расчета действительных и мнимых частей корней в зависимости от начальных условий на момент обнаружения препятствия. Приводятся результаты численного моделирования на примере системы управления гексакоптером. Моделирование проводится для сцены с цилиндрическими подвижными препятствиями и для сложной сцены с подвижными и неподвижными препятствиями типа цилиндр и стена. Показано, что для сложной сцены эффективность метода, базирующегося на неустойчивых режимах, существенно ниже эффективности гибридного метода, использующего эвристические процедуры определения направления движения подвижного объекта. В заключении дается сравнительная оценка предлагаемого метода с существующими методами и подходами.

Планирование движения; подвижный объект; неустойчивый режим; неопределенная среда; гибридные технологии управления.

V.Kh. Pshikhopov, M.Yu. Medvedev

**PATH PLANNING AND CONTROL OF VEHICLES IN 3D ENVIRONMENT
USING UNSTABLE MODES**

The article considers the problem of control vehicle in the uncertain three-dimensional environment with moving and fixed obstacles. Two level control system is proposed. The high level is responsible for the path planning. The low level is responsible for development of a given trajectory. The problem of path planning is divided into a planning task and practicing global trajectories of missions and the problem of local planning obstacles. The global trajectory planning is based on a priori information about the environment and the starting and ending points of the path. Lo-

* Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант 16-08-00012.

cal trajectory corrects the global path in case of obstacles that are missing from the map. Proposed control system carrying out performing of the global trajectory at the regulatory level, and bypass obstacles using the unstable modes. Also a hybrid system is developed. The hybrid system performs the obstacle avoidance by the use of unstable modes on the lower level. On the upper level of the hybrid system an intelligent algorithm determines the desired direction of bypass. The analysis of ways of introducing unstable modes is developed. It is shown that the use of complex roots of the characteristic equation of the closed-loop system allows for movement in an unstable mode in a given direction. Procedure of the real and the imaginary parts of the roots calculation is proposed. This procedure depends on the initial conditions at the time of detection of obstacles. The results of numerical simulation on example control system of hexacopter are presented. The simulation is performed for the scene with a cylindrical moving obstacles and for complex scenes with moving and stationary obstacles of the type cylinder and the wall. It is shown that for complex scenes the effectiveness of the method based on the unstable modes is significantly lower than the efficiency of the hybrid method that uses a heuristic procedure determining the direction of movement of the movable object. In conclusion, comparative evaluation of the proposed method with existing methods and approaches is performed.

Movement planning; vehicle; unstable mode; undetermined environment; hybrid control.

Введение. Решение задачи планирования траектории движения связано с необходимостью устранения неопределенности среды и с принятием решения в условиях нескольких альтернатив или многокритериальности решаемой задачи. Такие проблемы требуют разработки планировщиков движения в классе интеллектуальных систем. При этом под термином «интеллектуальная система управления» мы будем понимать систему, осуществляющую целеполагание, планирование и управление движением в изменяющихся условиях без взаимодействия с оператором или системой верхнего уровня.

Если подвижный объект функционирует в трехмерной среде, то это проявляется в большем числе возможных траекторий и ограничений, накладываемых на траекторию движения и усложнением процессов планирования.

В случае летательных аппаратов, при полете на большой высоте, как правило, задача планировщика сводится к коррекции траектории в заданной допустимой области при обнаружении одиночных движущихся препятствий. В конфликтных средах, на низких высотах, в условиях городской застройки или горной местности задача планировщика существенно усложняется, так как препятствия могут конфигурироваться в сложные объекты, могут существовать подвижные запрещенные зоны, осуществляться целенаправленное блокирование движения подвижного объекта.

В связи со сложностью проблем планирования существует большое число подходов к их решению. Общая проблематика планирования движений роботов широко освещена в литературе [1–4]. В последнее время в литературе активно обсуждаются вопросы планирования движения в трехмерной среде и вопросы группового управления. Так в работе [5] предлагаются алгоритмы планирования, основанные на поведении голубей и проводится сравнение с дифференциальными эволюционными алгоритмами. В работе [6] предлагаются оптимизационные алгоритмы планирования движения многостепенных роботов-манипуляторов и андроидных роботов в среде с препятствиями. Приводятся результаты численных и физических экспериментов. В статье [7] предложен гибридный метод планирования пути, основанный на комбинации искусственных потенциальных полей [8] и бактериального эволюционного алгоритма. Гибридизация методов позволила получить преимущества и устранить недостатки, которые присущи каждому из вышеуказанных методов по отдельности.

Также регулярно появляются обзоры по планированию движений роботов. В работе [9] представлен обзор методов планирования пути в средах с препятствиями. Рассматриваются основные направления исследований, методы обхода стационарных и подвижных препятствий, группового управления. Представлены как методы глобальной, так и реактивной навигации, в том числе с использовани-

ем моделей предсказывающего управления. В [10, 11] особое внимание уделяется эвристическим методам планирования, к которым отнесены нейросети, нечеткая логика, биоинспирированные и гибридные алгоритмы.

Таким образом, можно выделить ряд перспективных направлений развития методов планирования движения: сочетание различных методов планирования; использование интеллектуальных (эвристических) и биоинспирированных методов; разработка методов планирования для неопределенных сред с подвижными и неподвижными препятствиями, которые могут образовывать сложные конфигурации.

В данной статье исследуется ряд подходов, предложенных или развитых авторами, которые позволяют решить задачу планирования траектории подвижного объекта в трехмерной среде в условиях неопределенности. Предполагается, что объект описывается уравнениями кинематики и динамики твердого тела, дополненные уравнениями исполнительных механизмов. Среда содержит стационарные и нестационарные препятствия, расположение которых заранее неизвестно. Подвижный объект оснащен навигационной системой и системой технического зрения, которые позволяют системе управления определять свое положение в глобальной системе координат и обнаруживать и определять текущее положение препятствий. При планировании траекторий не предполагается глобальное картографирование, однако планировщик может строить локальную карту в области действия системы технического зрения.

1. Структура системы управления и постановка задачи. Интеллектуальная система управления подвижного объекта может быть представлена структурой, показанной на рис. 1. Такая структура позволяет решать задачи навигации, управления и планирования, необходимые для обеспечения автономного движения в неопределенных средах.

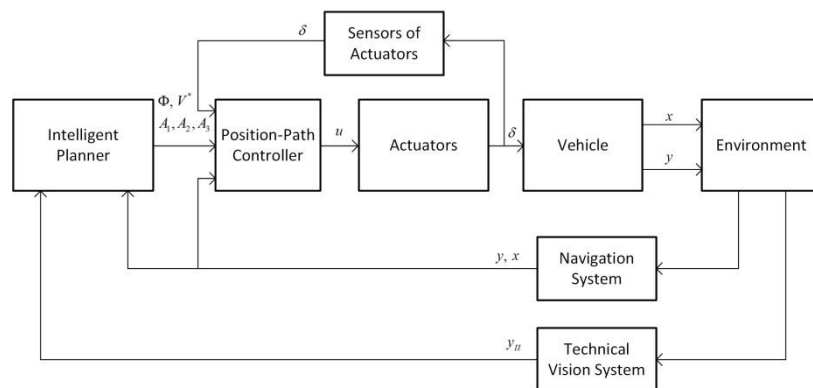


Рис. 1. Структура системы управления подвижного объекта

На основании данных от навигационной системы и локатора интеллектуальный планировщик выдает параметры траектории N , Φ и скорости V перемещения подвижного объекта в регуляторный уровень, который осуществляет управление движением вдоль заданной траектории. В регуляторный уровень также поступают данные от датчиков исполнительных механизмов.

Первая задача – это планирование и обработка глобальных траекторий-миссий, которые строятся на основе априорной информации, включающей в себя начальную и конечную точки маршрута, время движения, допустимые области функционирования и критерии качества. При выработке глобальной траектории используется карта среды. Локальная траектория строится по результатам обработки информации от навигационной системы и системы технического зрения.

Она корректирует глобальную траекторию в случае возникновения препятствий, отсутствующих на карте. Области функционирования режимов локального и глобального планировщика в системе управления поясняются на рис. 2.

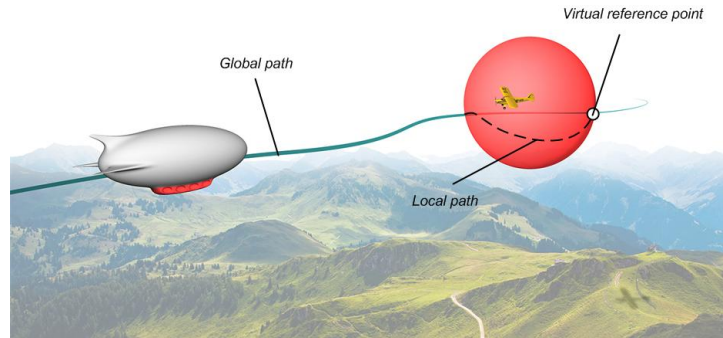


Рис. 2. Место локального и глобального планирования в системе управления

Пусть имеются начальная точка движения и набор точек, которые должен последовательно пройти подвижный объект. В режиме глобального планирования строится траектория по априорным данным, например в виде дуг, отрезков прямых линий, сплайнов, последовательности точек и пр. Уже в процессе функционирования подвижный объект может обнаружить область с препятствиями. В этой области планировщик траектории переходит в режим локального планирования, в котором формируется промежуточная целевая точка на границе области с препятствиями и осуществляется движение к ней до тех пор, пока система технического зрения обнаруживает препятствия между подвижным объектом и промежуточной целевой точкой.

Ключевое отличие глобального и локального режимов планирования заключается в том, что в первом случае планирование осуществляется в определенной среде, а во втором – в неопределенной. В режиме локального планирования планировщик решает задачи, которые обычно выполняет оператор робототехнической системы – распознает препятствия, принимает решения о необходимости изменения траектории движения, вырабатывает новую траекторию движения, принимает решение о возврате на прежнюю траекторию. В этой связи в режиме локального планирования наиболее широко используются интеллектуальные технологии, особенно в конфликтных средах или средах с подвижными препятствиями.

В данной статье рассматривается проблема планирования и управления движением подвижных объектов в трехмерных средах, в которых присутствуют области с неопределенностью. Неопределенность заключается в наличии подвижных или неподвижных препятствий, расположение которых заранее неизвестно.

Задачу разработки интеллектуального планировщика перемещений подвижного объекта можно сформулировать следующим образом. Внешняя среда по отношению к подвижному объекту находится в абсолютном покое. Исключение составляют препятствия. Препятствия могут быть как статическими (стационарными), так и динамическими (нестационарными). Причем скорость перемещения таких препятствий ниже максимально возможной скорости перемещения подвижного объекта. Препятствия могут быть сгруппированы в различные конфигурации такие, как отрезки, линии, многоугольники, карманы, углы. Наличие неопределенности обусловлено тем, что такие препятствия не локализованы: т.е. система управления предварительно о препятствиях не имеет никакой информации: ни об их форме, ни о размере, ни, тем более, о размещении.

2. Регуляторный уровень с неустойчивыми режимами движения. Математическая модель подвижного объекта представлена в виде [12, 13]:

$$\dot{y} = Rx, \quad (1)$$

$$\dot{x} = M^{-1}(F_u + F_d + F_v), \quad (2)$$

где $y = [P^T \ \Theta^T]^T$ – вектор линейных и угловых координат; $x = [V^T \ \omega^T]^T$ – вектор линейных и угловых скоростей; $R = \begin{bmatrix} A & 0 \\ 0 & A_\omega \end{bmatrix}$ – матрица кинематики;

F_u – вектор управляющих сил и моментов; F_d – вектор динамических сил и моментов; F_v – вектор возмущений.

Для синтеза регулятора применяется метод позиционно-траекторного управления [12–14], который позволяет представить единым образом задачи позиционного и траекторного управления перечисленные задачи в виде многообразий, отражающих совокупность требований к траектории движения, ориентации и скорости подвижного объекта.

Требования к траектории движения формируются в виде вектора квадратичных и линейных форм базовых координат, а также функциональных соотношений, определяющих требования к углам ориентации подвижного объекта:

$$\Psi_{tr} = \begin{bmatrix} P^T A_{i1}(t)P + A_{i2}(t)P + A_{i3}(t) \\ \Phi(P, \Theta, t) \end{bmatrix} = 0, \quad i = \overline{1, v}, \quad j = \overline{1, \mu}, \quad (3)$$

где Ψ_{tr} – вектор, отражающий требования к траектории движения подвижного объекта; A_{ij} – матрицы коэффициентов соответствующей размерности, формируемые планировщиками перемещений на основе данных сенсорных систем и определяющие вид, в общем случае, нестационарной траектории; v – размерность пространства функционирования подвижного объекта, $v = 2$ для задач организации перемещения на плоскости, $v = 3$ – при планировании траекторий в трехмерном пространстве; μ – размерность вектора Φ , задающего требования к углам ориентации подвижного объекта.

Требования к скорости подвижного объекта формируются в виде равенства

$$V_k^2 = \dot{y}^T \dot{y} = V_k^{*2}, \quad (4)$$

где V_k, V_k^* – скорость подвижного объекта и ее желаемое значение.

Тогда скоростное многообразие формируется в следующем виде:

$$\Psi_{cx} = J_s \dot{y} + J_t + \tilde{V}, \quad (5)$$

$$\tilde{V} = \begin{bmatrix} 0_{v-1} \xi (V^2 - V_k^2) 0_\mu \\ \frac{\partial \Phi_{ij}(P, \Theta, t)}{\partial t} \end{bmatrix}, \quad J_t = \begin{bmatrix} (P^T \dot{A}_{i1}(t) + \dot{A}_{i2}(t))P + \dot{A}_{i3}(t) \\ \frac{\partial \Phi_{ij}(P, \Theta, t)}{\partial t} \end{bmatrix},$$

J_s – матрица Якоби траекторного многообразия (4); \dot{A}_{ij} – матрица производных по времени элементов матрицы A_{ij} или оценок их скорости изменения; Φ_{ij} – составляющая Φ_j , явно зависящая от параметра t ; $0_{v-1}, 0_\mu$ – векторы нулевых элементов; ξ – параметр, равный нулю при решении позиционной задачи, и равный 1 при решении траекторной задачи управления.

Все требования к установившемуся режиму движения подвижного объекта в этом случае могут быть агрегированы в виде вектор-функции Ψ базовых координат и углов ориентации, а также их производных, вида

$$\Psi = \Psi_{tr} + \tilde{A}\Psi_{ck}, \quad (6)$$

где \tilde{A} – блочная диагональная матрица коэффициентов, определяющая характер движения подвижного объекта относительно траекторного многообразия.

Пусть требования к замкнутой системе управления задаются в виде дифференциального уравнения вида

$$\ddot{\Psi}_{tr} + T_2\dot{\Psi}_{tr} + T_1\Psi_{tr} = 0, \quad (7)$$

где T_1 и T_2 – положительно определенные матрицы постоянных коэффициентов.

Предположим, что некоторым способом, например [14], найден вектор управляющих воздействий F_u , удовлетворяющий уравнению (7).

В работах [15–19] изложена идея преобразования препятствий в репеллеры, используя теорему Ляпунова о неустойчивости. Согласно предложенному методу, для подвижного объекта, описываемого уравнениями кинематики и динамики, синтезируется такой закон управления, который обеспечивает асимптотическую устойчивость желаемых траекторий движения, трансформируя их в аттракторы, а препятствие, положение характерной точки которого описывается вектором $P_p = [x_p \quad y_p \quad z_p]^T$, трансформируя в репеллер, т.е. отталкивающее многообразие, с радиусом обхода, не превышающим некоторое значение r .

Из выражения (7) следует, что устойчивый характер движения подвижного объекта вдоль траектории Ψ_{tr} обеспечивается при положительной определенности матриц T_1 и T_2 . Таким образом, изменяя коэффициенты матриц T_1 и T_2 , можно обеспечить требуемый характер движения – устойчивый или неустойчивый.

Возникает вопрос, каким образом нужно изменять собственные числа матриц T_1 и T_2 , чтобы обеспечить обход препятствий в заданном направлении.

В данной статье исследуются способы обеспечения неустойчивых режимов в случаях: (а) два комплексно сопряженных корня изменяются так, что их действительные части принимают положительные значения, а мнимые части остаются неизменными; (б) два одинаковых действительных корня изменяются, принимая положительные значения; (в) один из двух одинаковых действительных корня изменяется, принимая положительные значения; (г) два различных действительных корня становятся положительными.

Чтобы проанализировать типы бифуркации, представим эталонное уравнение замкнутой системы (7) в виде

$$s^2 + T_1s + T_2 = (s + s_1)(s + s_2) = s^2 + (s_1 + s_2)s + s_1s_2, \quad (8)$$

Рассмотрим случай комплексных корней $s_{1,2} = \alpha^i \pm j\beta^i$. В этом случае решение матричного линейного уравнения (1) сводится к решению независимых скалярных уравнений, каждое из которых может быть представлено в виде:

$$\Psi_i = \left(\Psi_i^0 \cos \beta^i t + \frac{\dot{\Psi}_i^0 - \alpha^i \Psi_i^0}{\beta^i} \sin \beta^i t \right) e^{\alpha^i t}, \quad (9)$$

где $\Psi_i^0, \dot{\Psi}_i^0$ – начальные условия в момент перехода в неустойчивый режим.

Рассмотрим можно ли обеспечить желаемый знак выражения (9) при произвольных начальных условиях $\Psi_i^0, \dot{\Psi}_i^0$ за счет выбора параметров $\alpha^i > 0, \beta^i > 0$. Очевидно, что одно неравенство с двумя неизвестными, может приводить к боль-

шому числу решений, потому, в общем случае, требуется оптимизация получаемого решения. С точки зрения простоты решения в данном проекте предлагается следующий алгоритм. Планировщик выдает в регулятор направление обхода препятствия, т.е. требуемый знак выражения (9). Рассматривается уравнение вида

$$\Psi_i^0 \cos \beta^i t + \frac{\dot{\Psi}_i^0 - \alpha^i \Psi_i^0}{\beta^i} \sin \beta^i t = 0, \quad (10)$$

Задается начальное значение параметра $\beta^i > 0$, и из (7) находится параметр $\alpha^i > 0$:

$$\alpha^i = \frac{\beta^i \Psi_i^0 \operatorname{ctg} \beta^i t + \dot{\Psi}_i^0}{\Psi_i^0}, \quad \Psi_i^0 \neq 0. \quad (11)$$

Далее проверяется знак выражения (10) при значениях $\alpha^i > 0$, лежащих слева и справа от решения (8) и выбирается значение $\alpha^i \pm \Delta\alpha$, обеспечивающее требуемый знак выражения (9). Если решение не удается найти, то увеличивается параметр $\beta^i > 0$. Такая численно-аналитическая процедура позволяет найти решение при наименьшем значении собственной частоты замкнутой системы.

На рис. 3 представлены результаты работы изложенного алгоритма. На рис. 3 представлена зависимость переменной Ψ_i (7) от времени при $\beta^i = 0.2$ и различных значениях α^i . Начальные условия при вхождении подвижного объекта в область неустойчивого режима равны $\Psi_i^0 = -1$, $\dot{\Psi}_i^0 = -1$. Отметим, что $\alpha^i(t)$ являются функцией времени.

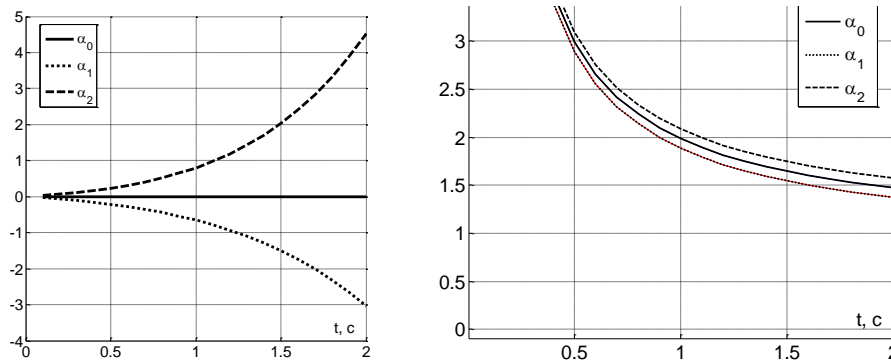


Рис. 3. Зависимость функции (9) и параметра α^i от времени

Аналогичные результаты получаются при других начальных условиях. Численные исследования подтверждают, что при различных начальных условиях удается найти решение, обеспечивающее заданное направление обхода в установившемся режиме. В частности, на рис. 4 представлены зависимости переменной Ψ_i (9) от параметра α^i при различных значениях параметра β^i .

Рассмотрим теперь случай, когда полином (8) имеет два различных действительных собственных числа $\alpha^i > 0$, $\beta^i < 0$. В этом случае решение уравнения (7) имеет вид

$$\Psi_i = \frac{\beta^i \Psi_i^0 - \dot{\Psi}_i^0}{\beta^i - \alpha^i} e^{\alpha^i t} + \frac{\dot{\Psi}_i^0 - \alpha^i \Psi_i^0}{\beta^i - \alpha^i} e^{\beta^i t}. \quad (12)$$

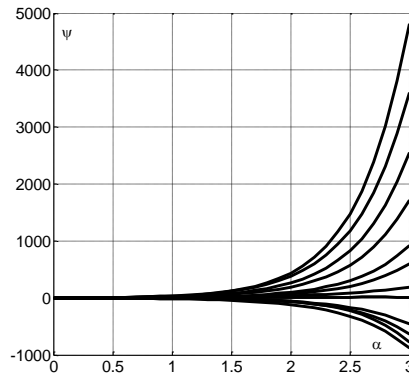


Рис. 4. Зависимость переменной Ψ_i (6) от параметра α^i

Очевидно, что вторая часть (12), при $\beta^i < 0$ стремится к нулю, поэтому знак этого выражения определяется в пределе соотношением

$$\frac{\beta^i \Psi_i^0 - \dot{\Psi}_i^0}{\beta^i - \alpha^i} = 0. \quad (13)$$

Решение уравнения (13) имеет вид

$$\beta^i = \frac{\dot{\Psi}_i^0}{\Psi_i^0}. \quad (14)$$

Очевидно, что знак выражения (14) определяется начальными условиями и не может быть скорректирован параметром $\alpha^i > 0$. В этой связи можно сделать вывод, что задание желаемого направления обхода в случае, когда полином (8) имеет два различных действительных собственных числа $\alpha^i > 0$, $\beta^i < 0$, возможно только при определенных начальных условиях.

Рассмотрим теперь случай, когда полином (8) имеет два различных действительных собственных числа $\alpha^i > 0$, $\beta^i > 0$. В этом случае решение уравнения (7) имеет вид (12), причем оба слагаемых с течением времени нарастают.

Численные исследования показывают, что в этом случае также не при всех начальных условиях удастся подобрать значения корней $\alpha^i > 0$, $\beta^i > 0$, обеспечивающих желаемый знак функции (12). Аналогичный результат имеет место и при кратных корнях.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что для обеспечения заданного направления обхода препятствия в неустойчивом режиме, в общем случае, наиболее целесообразно использовать комплексные корни.

3. Результаты численных исследований. В качестве объекта исследования рассмотрена система управления подвижного объекта на примере гексакоптера ERLY-HEXACOPTER DRONE. Гексакоптер снабжен шестью винтовыми движителями, расположенными на штангах. Основные параметры гексакоптера: масса 1.08 кг; диаметр 0,55 м; масса полезной нагрузки до 2.5 кг; масса подвеса 0.2 кг; время полета 20 мин; максимальная скорость 3 м/с.

В результате идентификации модели гексакоптера (1), (2) получены следующие параметры и функциональные соотношения:

$$A(\psi, \vartheta, \omega) = \begin{bmatrix} \cos \psi \cos \vartheta - \cos \psi \sin \vartheta \cos \gamma + \sin \psi \sin \gamma \sin \psi \cos \gamma + \cos \psi \sin \vartheta \sin \gamma \\ \sin \vartheta & \cos \vartheta \cos \gamma & -\cos \vartheta \sin \gamma \\ -\sin \psi \cos \vartheta & \cos \psi \sin \gamma + \sin \psi \sin \vartheta \cos \gamma & \cos \psi \cos \gamma - \sin \psi \sin \vartheta \sin \gamma \end{bmatrix},$$

$$A_{\omega} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{\cos \gamma}{\cos \theta} & -\frac{\sin \gamma}{\cos \theta} \\ 0 & \sin \gamma & \cos \gamma \\ 1 & -tg \theta \cos \gamma & tg \theta \sin \gamma \end{bmatrix}, \quad M = \text{diag}([m, m, m, J_x, J_y, J_z]),$$

$$m = 2 \text{ kg}, \quad J_x = J_z = 0.032 \text{ kg} \cdot \text{m}^2, \quad J_y = 0.062 \text{ kg} \cdot \text{m}^2,$$

$$F_d = -mg [\sin \vartheta \cos \vartheta \cos \gamma - \cos \vartheta \sin \gamma \ 0 \ 0 \ 0]^T,$$

$$F_u = [P \ N_p]^T, \quad P = [0 \ P_y \ 0]^T, \quad N_p = [N_x \ N_y \ N_z]^T,$$

$$P = \begin{bmatrix} 0 \\ k(\omega_1^2 + \omega_2^2 + \omega_3^2 + \omega_4^2 + \omega_5^2 + \omega_6^2) \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$N_p = \begin{bmatrix} kl(\omega_1^2 + \cos \varphi_k \omega_2^2 + \cos \varphi_k \omega_6^2 - \omega_4^2 - \cos \varphi_k \omega_5^2 - \cos \varphi_k \omega_3^2) \\ b(-\omega_1^2 + \omega_2^2 - \omega_3^2 + \omega_4^2 - \omega_5^2 + \omega_6^2) \\ kl \sin \varphi_k (\omega_2^2 + \omega_3^2 - \omega_5^2 - \omega_6^2) \end{bmatrix},$$

где P и N_p – соответственно главный вектор и главный момент силы тяги, создаваемой двигателями гексакоптера; ω_i – частота вращения винта; $k = 11.5 \cdot 10^{-6}$; $b = 10.0 \cdot 10^{-5}$; $\varphi_k = \pi/3$.

Разработан комплекс моделирования, в котором проведены численные исследования. Произведено моделирование на двух сценах, представленных на рис. 5. Гексакоптер снабжен 3D-сканером дальностью действия 5 м с углами сканирования 90° по горизонтали и 30° по вертикали. Угловое разрешение 3° . Также моделируется система радионавигации, обеспечивающая точность определения собственного положения 0,1 м с частотой 10 Гц.

Первая тестовая сцена представляет собой помещение $10 \times 10 \times 10$ м, с подвижными препятствиями в виде цилиндров с радиусом 0,25 м (рис. 5,а). Вторая тестовая сцена представляет собой помещение $10 \times 10 \times 3$ м, с подвижными и неподвижными препятствиями в виде столбов и плоскостей (рис. 5,б), полностью соответствующее реальному испытательному полигону, созданному в Научно-исследовательском институте робототехники и процессов управления Южного федерального университета.

В табл. 1 представлены усредненные показатели качества движения гексакоптера на указанных сценах, полученные при различных начальных и конечных условиях, для двух случаев: I – при использовании неустойчивых режимов в чистом виде; II – при использовании неустойчивых режимов вместе с блоком определения направления. Данный блок анализирует облако точек, получаемое от сканера и определяет в какой стороне находится наиболее свободная зона от препятствий. При этом первые три показателя вычислялись только для тех случаев, когда сцена пройдена без коллизий. Всего проведено 17 экспериментов.

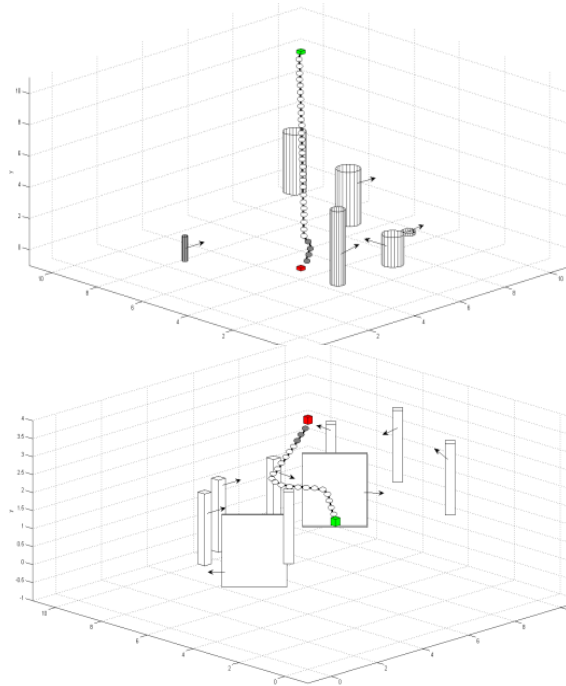


Рис. 5. Сцены для моделирования полета гексакоптера

Таблица 1

Усредненные показатели качества

Показатель	Сцена 1 – I	Сцена 1 – II	Сцена 2 – I	Сцена 2 – II
Минимальное расстояние до препятствия, м	0,96	0,96	0,48	0,5
Длина траектории, м	11,7	12,5	10,9	13,6
Время движения, с	39,3	41,1	29,7	36,0
Успешность прохождения сцены	0,82	0,94	0,18	0,41

Из табл. 1 видно, что при увеличении сложности сцены эффективность обхода препятствий с использованием неустойчивых режимов существенно падает. Однако введение простого блока определения направления движения позволяет увеличить вероятность прохождения роботом сцены. Достижение 100 % показателей возможно при наличии сканера кругового обзора.

Заключение. В работе исследованы способы форсирования неустойчивых режимов для обхода препятствий. Данный метод наиболее близок к методу искусственных потенциальных полей [8, 20], однако использует динамические силы, которые зависят не только от положения робота, препятствий и цели, но и от скоростей движения, что дает более широкие возможности по формированию отталкивающих и притягивающих сил. Подвижный объект переходит в неустойчивый режим на основе информации о расстоянии до цели. Это позволяет не строить карту и функционировать в неопределенной среде, используя только датчик расстояния до препятствия, как это делает, например, летучая мышь. С другой стороны, эффективность такого метода падает в сложной среде, поэтому в статье рассмот-

рен вопрос сопряжения метода обхода препятствий на основе неустойчивых режимов с методами интеллектуального планирования. Возможность создания таких гибридных систем управления движением обусловлена показанной в статье возможностью реализации в неустойчивом режиме заданного направления отталкивания от траектории движения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Jean-Claude Latombe*. Robot Motion Planning. Kluwer Academic Press, 1991.
2. *Steven LaValle*. Planning Algorithms. Cambridge University Press, 2006.
3. *Bruno Siciliano and Oussama Khatib (Eds.)*. Springer Handbook of Robotics. Springer, 2008.
4. *Howie Choset, Kevin M. Lynch, Seth Hutchinson, George Kantor, Wolfram Burgard, Lydia E. Kavraki and Sebastian Thrun*. Principles of Robot Motion – Theory, Algorithms, and Implementations. – MIT Press, 2005.
5. *Duan H., Qiao P.* Pigeon-inspired optimization: A new swarm intelligence optimizer for air robot path planning // International Journal of Intelligent Computing and Cybernetics. – 2014. – Vol. 7 (1). – P. 24-37.
6. *Schulman J., Duan Y., Ho J., Lee A., Awwal I., Bradlow H., Pan J., Patil S., Goldberg K., Abbeel P.* Motion planning with sequential convex optimization and convex collision checking // International Journal of Robotics Research. – 2014. – Vol. 33 (9). – P. 1251-1270.
7. *Montiel O., Orozco-Rosas U., Sepúlveda R.* Path planning for mobile robots using Bacterial Potential Field for avoiding static and dynamic obstacles // Expert Systems with Applications. – 2015. – Vol. 42 (12). – P. 5177-5191.
8. *Khatib O.* Real-Time Obstacles Avoidance for Manipulators and Mobile Robots // Int. Journal of Robotics Research. – 1986. – Vol. 5. (1). – P. 90-98.
9. *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.
10. *Mac T.T., Copot C., Tran D.T., De Keyser R.* Heuristic approaches in robot path planning: A survey // Robotics and Autonomous Systems. – 2016. – Vol. 86. – P. 13-28.
11. *Белоглазов Д.А., Гузик В.Ф., Косенко Е.Ю. и др.* 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.
12. *Pshikhopov V., Medvedev M., Gaiduk A., Neydorf R., Belyaev V., Fedorenko R., Krukhmalev V.* Mathematical model of robot on base of airship // Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control. – 2013. – P. 959-964.
13. *Пшихопов В.Х., Медведев М.Ю.* Управление подвижными объектами в определенных и неопределенных средах. – М.: Наука, 2011. – 350 с. – ISBN 978-5-02-037509-3.
14. *Pshikhopov V., Medvedev M., Gaiduk A., Belyaev V., Fedorenko R., Krukhmalev V.* Position-trajectory control system for robot on base of airship // Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control. – 2013. – P. 3590-3595.
15. *Pshikhopov V., Medvedev M., Gaiduk A., Kolesnikov A.* Control Method for Heterogeneous Vehicle Groups Control in Obstructed 2-D Environments // Lecture Notes in Computer Science. – 2016. – Vol. 9812. – P. 40-47.
16. *Pshikhopov V., Medvedev M., Kolesnikov A., Fedorenko R., and Gurenko B.* Decentralized Control of a Group of Homogeneous Vehicles in Obstructed Environment // Journal of Control Science and Engineering Volume, Article ID 7192371. 2016.
17. *Pshikhopov V.Kh., Ali A.S.* Hybrid motion control of a mobile robot in dynamic environments // IEEE International Conference on Mechatronics, ICM 2011: Proceedings. – 2011. – P. 540-545.
18. *Пшихопов В.Х.* Аттракторы и репеллеры в конструировании систем управления подвижными объектами // Известия ТРТУ. – 2006. – № 3 (58). – С. 117-123.
19. *Пшихопов В.Х., Али А.С.* Обход локальных минимумов функции ошибки при движении робота в неопределенной среде // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2011. – № 6 (164). – С. 26-31.
20. *Khatib O.* Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots // IEEE Int. Conf. Robotics and Automation. – 1985. – P. 500-505.

REFERENCES

1. *Jean-Claude Latombe*. Robot Motion Planning. Kluwer Academic Press, 1991.
2. *Steven LaValle*. Planning Algorithms. Cambridge University Press, 2006.

3. Bruno Siciliano and Oussama Khatib (Eds.). Springer Handbook of Robotics. Springer, 2008.
4. Howie Choset, Kevin M. Lynch, Seth Hutchinson, George Kantor, Wolfram Burgard, Lydia E. Kavraki and Sebastian Thrun. Principles of Robot Motion – Theory, Algorithms, and Implementations. MIT Press, 2005.
5. Duan H., Qiao P. Pigeon-inspired optimization: A new swarm intelligence optimizer for air robot path planning, *International Journal of Intelligent Computing and Cybernetics*, 2014, Vol. 7 (1), pp. 24-37.
6. Schulman J., Duan Y., Ho J., Lee A., Awwal I., Bradlow H., Pan J., Patil S., Goldberg K., Abbeel P. Motion planning with sequential convex optimization and convex collision checking, *International Journal of Robotics Research*, 2014, Vol. 33 (9), pp. 1251-1270.
7. Montiel O., Orozco-Rosas U., Sepúlveda R. Path planning for mobile robots using Bacterial Potential Field for avoiding static and dynamic obstacles, *Expert Systems with Applications*, 2015, Vol. 42 (12), pp. 5177-5191.
8. Khatib O. Real-Time Obstacles Avoidance for Manipulators and Mobile Robots, *Int. Journal of Robotics Research*, 1986, Vol. 5. (1), pp. 90-98.
9. 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), pp. 463-497.
10. Mac T.T., Copot C., Tran D.T., De Keyser R. Heuristic approaches in robot path planning: A survey, *Robotics and Autonomous Systems*, 2016, Vol. 86, pp. 13-28.
11. Beloglazov D.A., Guzik V.F., Kosenko E.Yu., et al. Intellectual'noe planirovanie traektoriy podvizhnykh ob"ektov v sredakh s prepyatstviyami [Intelligent planning of vehicles path in the environment with obstacles], ed. by V.Kh. Pshikhopova. Moscow: Fizmatlit, 2014, 300 p. ISBN 978-5-9221-1595-7.
12. Pshikhopov V., Medvedev M., Gaiduk A., Neydorf R., Belyaev V., Fedorenko R., Krukhmalev V. Mathematical model of robot on base of airship, *Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control*, 2013, pp. 959-964.
13. Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu. Upravlenie podvizhnymi ob"ektami v opredelennykh i neopredelennykh sredakh [Mobile object control in definite and indefinite environments]. Moscow: Nauka, 2011, 350 p. ISBN 978-5-02-037509-3.
14. Pshikhopov V., Medvedev M., Gaiduk A., Belyaev V., Fedorenko R., Krukhmalev V. Position-trajectory control system for robot on base of airship, *Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control*, 2013, pp. 3590-3595.
15. Pshikhopov V., Medvedev M., Gaiduk A., Kolesnikov A. Control Method for Heterogeneous Vehicle Groups Control in Obstructed 2-D Environments, *Lecture Notes in Computer Science*, 2016, Vol. 9812, pp. 40-47.
16. Pshikhopov V., Medvedev M., Kolesnikov A., Fedorenko R., and Gurenko B. Decentralized Control of a Group of Homogeneous Vehicles in Obstructed Environment, *Journal of Control Science and Engineering* Volume, Article ID 7192371. 2016.
17. Pshikhopov V.Kh., Ali A.S. Hybrid motion control of a mobile robot in dynamic environments, *IEEE International Conference on Mechatronics, ICM 2011: Proceedings*, 2011, pp. 540-545.
18. Pshikhopov V.Kh. Attraktory i repellery v konstruirovanii sistem upravleniya podvizhnymi ob"ektami [Attractors and repellers in design of mobile object control systems], *Izvestiya TRTU [Izvestiya TSURE]*, 2006, No. 3 (58), pp. 117-123.
19. Pshikhopov V.Kh., Ali A.S. Obkhod lokal'nykh minimumov funktsii oshibki pri dvizhenii robota v neopredelennoy srede [Avoidance of local minima of error function during robot motion in indefinite environment], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Severo-Kavkazskiy region. Tekhnicheskie nauki* [Proceedings of the Universities of The North-Caucasian Region, Technical sciences], 2011, No. 6 (164), pp. 26-31.
20. Khatib O. Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots, *IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, 1985, pp. 500-505.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Н.А. Глебов.

Пшихопов Вячеслав Хасанович – Южный федеральный университет; e-mail: pshichop@rambler.ru; 347900, Таганрог, ул. Шевченко, 2, корп. К, офис 225; тел.: +78634371694; НИИ робототехники и процессов управления; директор; д.т.н.; профессор.

Медведев Михаил Юрьевич – e-mail: medvmihal@sfnu.ru; НИИ робототехники и процессов управления; д.т.н.; профессор.

Pshikhopov Vyacheslav Khasanovich – Southern Federal University; e-mail: pshichop@rambler.ru; 347900, Taganrog, Shevchenko street, 2, office K-225; phone: +78634371694; Research and Development Institute of Robotics and Control Systems; Director, dr. of eng. sc.; professor.

Medvedev Mikhail Yur'evich – e-mail: medvmihal@sfedu.ru; Research and Development Institute of Robotics and Control Systems; dr. of eng. sc.; professor.

УДК 629.7.05

DOI 10.18522/2311-3103-2017-1-158172

П.П. Кравченко, Н.А. Хусаинов, В.В. Щербинин**СИНТЕЗ АЛГОРИТМОВ ЦИФРОВОГО УПРАВЛЕНИЯ
МНОГОРЕЖИМНЫМ БЕСПИЛОТНЫМ ЛЕТАТЕЛЬНЫМ АППАРАТОМ
САМОЛЕТНОГО ТИПА НА ОСНОВЕ ОПТИМИЗИРОВАННЫХ
ДЕЛЬТА-ПРЕОБРАЗОВАНИЙ ВТОРОГО ПОРЯДКА**

В работе приводится анализ известных проблем синтеза алгоритмов управления БПЛА, базирующегося на линеаризации уравнений движения и использовании ПИД-регуляторов. В рассматриваемой методологии синтеза алгоритмов для БПЛА самолетного типа используются теория оптимизированных по быстродействию и точности дельта-преобразований второго порядка и принцип управления двумя состояниями БПЛА (углом атаки/крена и положением центра масс по высоте/боковому отклонению) одним управляющим воздействием (принцип управления тележкой с перевернутым маятником). Методология нацелена на обеспечение возможности комплексного решения вопросов повышения многорежимности и универсальности практического использования БПЛА: оперирование с нелинейными модельными описаниями, реализация отработки больших отклонений по высоте и боковому отклонению на основе единых алгоритмов в условиях проявления нестационарности параметров, планирующее движение с больших высот, возможность управления боковым отклонением только креном, высокоточный выход по высоте и боковому отклонению на заданные координаты в пространстве и на земле, автоматическая посадка с обеспечением малых динамических ошибок, оптимизация по быстродействию при реализации переходных процессов, устойчивость, грубость алгоритмов управления, существенная простота теоретического синтеза и инженерной реализации. Представленный вариант компьютерного эксперимента автоматической посадки показал при движении с высоты 1000 м, боковом отклонении 600 м и начальной скорости 20 м/сек среднюю скорость снижения по высоте ~12 м/сек, по боковому отклонению – ~7.5 м/сек, максимально развиваемую скорость при спуске – 63 м/сек, выход на глиссаду практически без перерегулирования и высокую точность на протяженных участках установившегося процесса при движении по глиссаде (по обоим каналам динамическая ошибка в пределах ~0.1 м).

Беспилотный летательный аппарат; самолет; синтез алгоритмов; цифровое управление; оптимизация; дельта-преобразования второго порядка; быстродействие; ошибка; грубость.

P.P. Kravchenko, N.S. Khusainov, V.V. Scherbinin**SYNTHESIS OF DIGITAL CONTROL ALGORITHMS OF THE
MULTIFUNCTIONAL AIRCRAFT-TYPE UNMANNED AERIAL VEHICLE
BASED ON OPTIMISED DELTA-TRANSFORMATIONS OF THE SECOND
ORDER**

The paper analyses the known problems of synthesis of UAV control algorithms based on linearization of motion equations and use of PID-controllers. The considered methods of synthesis of algorithms for aircraft-type UAV use the optimized for high speed response and accuracy delta-transformations of the second order, including forecast functions, and the principles of two UAV