

Раздел I. Системы управления

УДК 681.511.4

В.Х. Пшихопов

УПРАВЛЕНИЕ ПОДВИЖНЫМИ ОБЪЕКТАМИ В АПРИОРИ НЕФОРМАЛИЗОВАННЫХ СРЕДАХ*

Введение

Решению задач организации движения подвижных объектов (ПО) в априори неформализованных средах посвящен ряд работ отечественных [1, 2, 3] и зарубежных [4, 5, 6] авторов. Предлагаемые решения реализуются как в классе интеллектуальных систем планирования перемещений (стратегический уровень) и управления движением, так и в рамках методов формирования алгоритмов тактического управления ПО. Например, в работах, базирующихся на положениях работы [4], предлагаются алгоритмы формирования управляющих воздействий, предполагающие предварительное планирование траекторий движения ПО, что не всегда возможно в условиях непредсказуемой неопределенности среды [1] и вычисление двух составляющих закона управления: стабилизирующей траекторию движения ПО и деформирующей ее в окрестностях препятствия. В работе [5] концепция, положенная в основу метода достоверных решеток, требует картографирования локальной области функционирования ПО, что предъявляет дополнительные требования к организации сенсорной системы объекта. Алгоритмы формирования управляющих воздействий, представленные в [7], также предполагают предварительное картографирование области функционирования ПО и определение габаритов и параметров движения препятствий.

Основные проблемы, связанные с использованием указанных подходов и методов к формированию управлений тактического уровня, с нашей точки зрения, заключаются в следующем: в необходимости предварительного планирования траектории или картографирования области функционирования ПО, что налагает существенные ограничения на движение объектов в априори неформализованных средах; в недостаточной проработанности процедур согласования стратегических уровней планирования и тактических уровней управления; в необходимости дополнительной информации о геометрии, фазовых координатах объекта управления и т.д.

В настоящей работе, на основе результатов, полученных автором в [8, 9, 10], предлагается подход к реализации тактического уровня управления ПО, функционирующими в априори неформализованных средах, с привлечением третьей теоремы Ляпунова (теоремы о неустойчивости) [11, 12], что позволяет формировать управляющие воздействия в реальном времени без использования интеллектуальных технологий и при минимальных требованиях к сенсорному обеспечению ПО.

Математическая модель ПО и постановка задачи

Пусть модель динамики ПО и его кинематические свойства описываются системой следующих дифференциальных уравнений [4]:

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

$$\dot{\delta} = KU \quad (2)$$

$$\dot{Y} = \Sigma(\Theta, X) = \begin{pmatrix} \Sigma_P(\Theta, X) \\ \Sigma_\Theta(\Theta, X) \end{pmatrix}, \quad (3)$$

где X – m -вектор внутренних координат; M – $(m \times m)$ -матрица массо-инерционных параметров, элементами которой являются масса, моменты инерции, присоединенные массы ПО; $F_u(X, Y, \delta, l)$ – m -вектор управляющих сил и моментов, здесь l – вектор конструктивных параметров; $F_d(X, Y, l)$ – m -вектор нелинейных элементов динамики ПО; F_v – m -вектор измеряемых и неизмеряемых внешних возмущений; δ – m -вектор управляемых координат (углы отклонения рулей, рычагов управления тягой двигателя и т.п.); K – $(m \times m)$ -матрица коэффициентов управления; U – m -вектор управляющих воздействий; $Y = (P, \Theta)^T$ – n -вектор положения P и ориентации Θ связанной системы координат относительно базовой, $n \leq 6$; $\Sigma(\Theta, X)$ – n -вектор кинематических связей; $\Sigma_P(\Theta, X)$ – ν -вектор линейных скоростей связанной системы координат относительно базовой; $\Sigma_\Theta(\Theta, X)$ – $(n-\nu)$ -вектор угловых скоростей связанной системы координат относительно базовой.

Следует отметить, что моделью (1)-(3) описывается достаточно широкий класс подвижных объектов: летательные аппараты, колесные тележки, воздухоплавательные комплексы и т.д.

Предположим, что в зоне движения ПО расположены стационарные и нестационарные препятствия P_j , известны координаты (x, y, z) характерной точки ПО в базовой системе координат, а также заданы координаты целевой точки $A_f(x_A, y_A, z_A)$ в той же системе координат. В общем случае точка A_f может быть нестационарной. Предположим также, что сенсорная система объекта позволяет определить кратчайшие расстояния R_c , $c = \overline{1, k}$ от характерной точки ПО (например, центр связанной системы координат) до ближайших точек, принадлежащих одному или нескольким препятствиям P_j , находящихся в зоне действия сенсора.

Постановка задачи заключается в следующем: для ПО, описываемого системой уравнений (1), (3), необходимо синтезировать такой закон формирования управляющих воздействий $F_u(P, X)$ и алгоритм функционирования тактического уровня системы управления, которые обеспечивали бы перемещение объекта из произвольной точки (x_0, y_0, z_0) в заданную целевую точку $A_f(x_A, y_A, z_A)$ (в случае необходимости могут задаваться и требования к желаемой ориентации ПО в точке A_f), с выполнением условий:

$$R_c \geq R, \quad c = \overline{1, k}, \quad (4)$$

где k – количество ближайших точек, принадлежащих одному или нескольким препятствиям;

R – константа, задающая допустимое кратчайшее расстояние от характерной точки ПО до любого из препятствий P_j .

В отличие от постановки задач, сформулированных в [9, 10], в данном случае для организации движения ПО не требуются значения скорости и ускорения, с которыми перемещаются препятствия P_j , на число препятствий и характер их движе-

ния не накладываются никакие ограничения и не требуется определение координат каких-либо характерных точек. То есть мы расширяем представление о препятствиях до геометрически сложной фигуры, не вдаваясь в ее геометрические характеристики, а зная только расстояние R_c .

Синтез управляющих воздействий

Как показано в работе [10], все множество требований к установившемуся режиму движения ПО в пространстве $R^{n \times n}$ базовых координат Y и скоростей \dot{Y} , в общем случае может быть представлено в виде вектор-функции Ψ базовых координат и углов ориентации, а также их производных вида:

$$\Psi = \Psi_{tr} + \tilde{A}\Psi_{ck} = 0,$$

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

$$N(v) = \bar{\xi} (P^T A_{v1}(t)P + A_{v2}(t)P + A_{v3}(t)),$$

$$\tilde{V} = \left(0_{v-1}, \quad \xi(V^2 - V^{*2}), \quad 0_{\mu} \right)^T,$$

$$\Psi_{ck} = J_s \dot{Y} + J_t + \tilde{V} = 0, \dim \Psi_{tr} = \dim \Psi_{ck} = v + \mu = m, \quad (5)$$

$$J_s = \begin{vmatrix} \frac{\partial N}{\partial P^T} & \frac{\partial N}{\partial \Theta^T} \\ \frac{\partial \Phi}{\partial P^T} & \frac{\partial \Phi}{\partial \Theta^T} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} J_{NP} & J_{N\Theta} \\ J_{\Phi P} & J_{\Phi\Theta} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 2P^T A_{i1}(t) + A_{i2}(t) & 0 \\ \frac{\partial \Phi_j}{\partial P^T} & \frac{\partial \Phi_j}{\partial \Theta^T} \end{vmatrix}, \dim J_s = (m \times n),$$

$$J_t = \begin{vmatrix} (P^T \dot{A}_{i1}(t) + \dot{A}_{i2}(t))P + \dot{A}_{i3} \\ \frac{\partial \Phi_j(P, \Theta, t)}{\partial t} \end{vmatrix},$$

$$\tilde{A} = \begin{vmatrix} A & 0 \\ 0 & A_{\Phi} \end{vmatrix},$$

где \tilde{A} – блочная диагональная матрица коэффициентов, $\dim \tilde{A} = (m \times m)$; A_{Φ} – $(\mu \times \mu)$ -матрица коэффициентов, определяющих характер переходных процессов по углам ориентации ПО, здесь μ – размерность вектора Φ_{μ} , задающего требования к углам ориентации ПО; A – диагональная $(v \times v)$ -матрица, определяющая характер движения ПО относительно траекторного многообразия Ψ_{tr} , здесь v – размерность пространства функционирования ПО; A_{ij} – матрицы коэффициентов соответствующей размерности, формируемые планировщиками перемещений на основе данных сенсорных систем и определяющие вид нестационарной траектории; \dot{A}_{ij} – матрица производных по времени элементов матрицы A_{ij} или оценок их скорости изменения; Φ_{μ} – дважды дифференцируемая функция своих аргументов, отражающая требования к углам ориентации ПО; ξ – параметр, принимающий значение 0 (для позиционной задачи) или 1 (для случая движения с за-

данной скоростью); V, V^* – скорость ПО и ее желаемое значение; $0_{\nu-1}, 0_\mu$ – векторы нулевых элементов размерности $\nu-1$ и μ соответственно.

При управлении ПО на плоскости, $Y = (x \ y \ \alpha)^T, \nu=2, \mu=1$, здесь x, y, α – координаты положения и угол ориентации ПО. В зависимости от конкретной задачи, многообразия (5) задаются в следующем виде:

- ♦ движение вдоль прямой $y=kx+b$, проходящей через две стационарные точки (x_0, y_0) и (x_f, y_f) , с постоянной скоростью V^* :

$$A_{12} = (-k \ 1), A_{13} = b, A_{11} = A_{21} \equiv 0, A_{22} \equiv 0, A_{23} = 0, \\ \tilde{V} = \left(0 \ , \ (V^2 - V^{*2}) \right)^T, J_s = \begin{vmatrix} -k & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}, J_t \equiv 0, \quad (6a)$$

здесь $k = \frac{y_f - y_0}{x_f - x_0}, b = y_0 - x_0 k$;

- ♦ поворот на заданный угол α^* при движении с заданной скоростью V^* :

$$\Phi_1 = \alpha - \alpha^*, \tilde{V} = \left((V^2 - V^{*2}) \ , \ 0 \right)^T, J_s = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}, J_t = \begin{vmatrix} 0 \\ \dot{\alpha} \end{vmatrix}. \quad (6b)$$

- ♦ выход в стационарную точку (x_f, y_f) с нулевой скоростью:

$$A_{11} = A_{21} \equiv 0, A_{12} = (1 \ 0), A_{22} = (0 \ 1), A_{13} = -x_f, A_{23} = -y_f, \\ \tilde{V} \equiv 0, J_s = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{vmatrix}, J_t \equiv 0. \quad (6в)$$

- ♦ движение вдоль траектории, проходящей через две нестационарные точки $(x_0(t), y_0(t))$ и $(x_f(t), y_f(t))$, с постоянной скоростью V^* :

$$A_{12} = (-k(t) \ 1), A_{13} = b(t), A_{11} = A_{21} \equiv 0, A_{22} \equiv 0, A_{23} = 0, \\ \tilde{V} = \left(0 \ , \ (V^2 - V^{*2}) \right)^T, J_s = \begin{vmatrix} -k(t) & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}, J_t = \begin{vmatrix} -\dot{k}(t)x + y - \dot{b}(t) \\ 0 \end{vmatrix}. \quad (6г)$$

В работах [8, 9, 10] были синтезированы законы формирования управляющих воздействий (автопилоты), стабилизирующие многообразия (5), вида

$$F_u = -M(\tilde{T}\tilde{A}K_0)^{-1}(\tilde{T}\tilde{A}K_1\Sigma_\Theta + K_2\Sigma + K_3 + K_4(t)) + F_d + \hat{F}_v, \quad (7)$$

$$K_0 = (JJ_{\Sigma Px} + J_\Theta J_{\Sigma \Theta x}), K_1 = (JJ_{\Sigma P\Theta} + J_\Theta J_{\Sigma \Theta \Theta}), K_2 = (\tilde{T} + \tilde{A})J_s + \tilde{T}\tilde{A}\Gamma_s,$$

$$K_3 = \tilde{A}\tilde{V} + \Psi_{tr}, K_4 = (\tilde{T} + \tilde{A})J_t + \tilde{T}\tilde{A}J_t^*, J = (J_P + J_V),$$

$$J_V = (0_{(\nu-1) \times \nu} \quad 2\Sigma_P^T \quad 0_{\mu \times \nu})^T, \quad J_{\Sigma ij} = \frac{\partial \Sigma_i}{\partial j}, \quad \text{здесь } i = \{P, \Theta\}, \quad j = \{x, \Theta\},$$

$$J_P = \begin{vmatrix} J_{NP} \\ J_{\Phi P} \end{vmatrix}, \quad J_{\Theta} = \begin{vmatrix} J_{N\Theta} \\ J_{\Phi\Theta} \end{vmatrix},$$

$$J_t^* = \left(j_t^*(1, 1), j_t^*(1, 2), j_t^*(1, 3), \frac{\partial^2 \Phi_1}{\partial t^2}, \frac{\partial^2 \Phi_2}{\partial t^2}, \frac{\partial^2 \Phi_3}{\partial t^2} \right)^T,$$

$$j_t^*(1, k) = \left((P^T \ddot{A}_{k1} + \ddot{A}_{k2})P + 2(2P^T \dot{A}_{k1} + \dot{A}_{k2})\dot{P} + \ddot{A}_{k3} \right),$$

где Γ_s – первая производная по времени матрицы J_s ; \ddot{A} – вторая производная по времени матрицы A или ее оценка; \hat{F}_V – оценка вектора неопределенных сил и моментов, \tilde{T} – диагональная, знакоопределенная матрица коэффициентов, определяющих характер переходных процессов, $\dim \tilde{T} = (m \times m)$.

Матрица \tilde{T} имеет следующую структуру:

$$\tilde{T} = \begin{vmatrix} T & 0 \\ 0 & T_{\Phi} \end{vmatrix},$$

где T_{Φ} – $(\mu \times \mu)$ -матрица коэффициентов, определяющих характер переходных процессов по углам ориентации ПО; T – диагональная $(\nu \times \nu)$ -матрица, определяющая характер движения ПО относительно траекторного многообразия Ψ_{tr} . Причем при $\xi = 1$, элемент $T(\nu, \nu)$ будет определять характер изменения траекторной скорости V_k в переходном режиме.

В случае, если исходная математическая модель ПО задана только уравнениями кинематики (3), то говорят о синтезе алгоритма кинематического управления [13]. Вводя на m выходах регулятора дополнительные динамические звенья в виде интеграторов $\dot{X} = U$, можно получить следующий алгоритм кинематического управления:

$$F_u = -M(\tilde{T}\tilde{A}K_0)^{-1}(\tilde{T}\tilde{A}K_1\Sigma_{\Theta} + K_2\Sigma + K_3 + K_4(t)), \quad (7a)$$

где функциональные матрицы K_0, K_1, K_2, K_3, K_4 имеют тот же смысл, что и в выражении (7).

Следует отметить, что реализация алгоритма (7a) не требует оценки элементов вектора внешних возмущений \hat{F}_V и вектора нелинейных элементов динамики F_d , что существенным образом сказывается на качестве отработки ПО заданий при больших скоростях и значительных внешних возмущениях.

Алгоритм (7) обеспечивает стабилизацию многообразий (6) при следующих значениях функциональных коэффициентов в (7):

$$J_P = \begin{vmatrix} -k & 1 \\ 0 & 0 \end{vmatrix}, \quad J_{\Theta} \equiv 0, \quad J_t^* \equiv 0, \quad \Gamma_s \equiv 0. \quad (8a)$$

$$\Gamma_s \equiv 0, J_P = \begin{vmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{vmatrix}, J_\Theta = \begin{vmatrix} 0 \\ 1 \end{vmatrix}, J_t^* = \begin{vmatrix} 0 \\ \ddot{\alpha} \end{vmatrix} \quad (8б)$$

$$\Gamma_s \equiv 0, J_P = \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{vmatrix}, J_\Theta = \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \end{vmatrix}, J_t^* = J_t \equiv 0. \quad (8в)$$

$$J_P = \begin{vmatrix} -k(t) & 1 \\ 0 & 0 \end{vmatrix}, J_\Theta \equiv 0, \Gamma_s = \begin{vmatrix} -\dot{k}(t) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}, J_t^* = \begin{vmatrix} -\dot{k}(t)\dot{x} + -\ddot{k}(t)x + \dot{y} - \ddot{b}(t) \\ 0 \end{vmatrix}. \quad (8г)$$

Матрицы $J_{\Sigma ij}$ и J_V однозначно определяются по уравнениям (3) динамики конкретного ПО в соответствии с выражениями, представленными в (7).

Структурно-алгоритмическая реализация системы управления ПО

Основная идея предлагаемого подхода к структурно-алгоритмической реализации системы управления ПО заключается в использовании управляющих воздействий (6), стабилизирующих траектории (5) в зонах свободных от препятствий, и в применении третьей теоремы Ляпунова (теорема о неустойчивости) при нарушении неравенств (4), т.е. при нахождении ПО в зоне стационарных или нестационарных препятствий на расстояниях R_c , меньше допустимого значения R .

Иными словами, в зависимости от принадлежности текущего положения ПО зоне свободной от препятствий, когда соблюдаются неравенства (4), или зоне, где эти условия не выполняются, предлагается организовывать такие режимы движения ПО, при которых планируемые траектории, задаваемые многообразиями (5), были бы устойчивыми в первом случае и неустойчивыми во втором.

В работах [14, 15] показано, что неравенства вида (4) могут быть представлены одним равенством, которое в настоящей работе предлагается формировать в следующем виде:

$$\beta = \sum_j |R_c - R| + \sum_j (R_c - R), \quad (9)$$

где j – количество ближайших точек, находящихся в зоне действия сенсорной системы ПО и принадлежащих одному или нескольким препятствиям.

Очевидно, что при соблюдении всех неравенств (4) значение параметра β (9) равно нулю и соответственно не равно нулю, если хотя бы одно из неравенств (4) нарушается. Причем во втором случае, значение β всегда положительно.

В работе [9] показано, что устойчивый характер движения ПО вдоль траектории Ψ_{tr} обеспечивается при положительной определенности матриц T и A . Соответственно при нарушении условий (4), одна из или обе матрицы T и A должны быть отрицательно определенными. Без потери общности предположим, что $T = A = \text{diag } s_i, i = \overline{1, V}$, где s_i – некоторый функциональный параметр, задающий знакоопределенность матриц T и A .

С учетом вышеизложенного, элементы матриц T и A предлагается задавать в виде следующей функции:

$$s_i = \begin{cases} s_0 = \text{const} > 0, & \text{при } \beta = 0, \\ -\frac{1}{\beta}, & \text{при } \beta \neq 0, \end{cases} \quad (10)$$

здесь s_0 задает характер движения в свободной от препятствия зоне.

Таким образом, формируя элементы матриц T и A в соответствии с зависимостью вида (10), мы обеспечиваем устойчивый характер движения ПО вдоль многообразия Ψ_{tr} , за исключением областей, где нарушаются неравенства (4).

Поскольку в предлагаемой организации движения ПО предполагается переход из одного устойчивого состояния через неустойчивое движение в другое устойчивое состояние, то параметр β предлагается назвать бифуркационным.

Структурная схема замкнутой системы, реализующей предлагаемый алгоритм управления, представлена на рис.1 и включает в себя следующие элементы: блоки M , F_d , $\Sigma(\theta, x)$, сумматор, интеграторы и связи, отражающие структуру объекта управления (1), (3); планировщик движений ПО (оператор, бортовая ЭВМ, нейросеть и т.п.), предназначенный для формирования коэффициентов многообразий (5), (6) и элементов матриц \tilde{T} и \tilde{A} ; датчики внутренних D_x и внешних D_y координат; блок F_u вычисления в соответствии с выражениями (7), (8) управляющих воздействий; датчик R определения расстояния до ближайших точек, находящихся в зоне действия сенсорной системы ПО и принадлежащих одному или нескольким препятствиям.

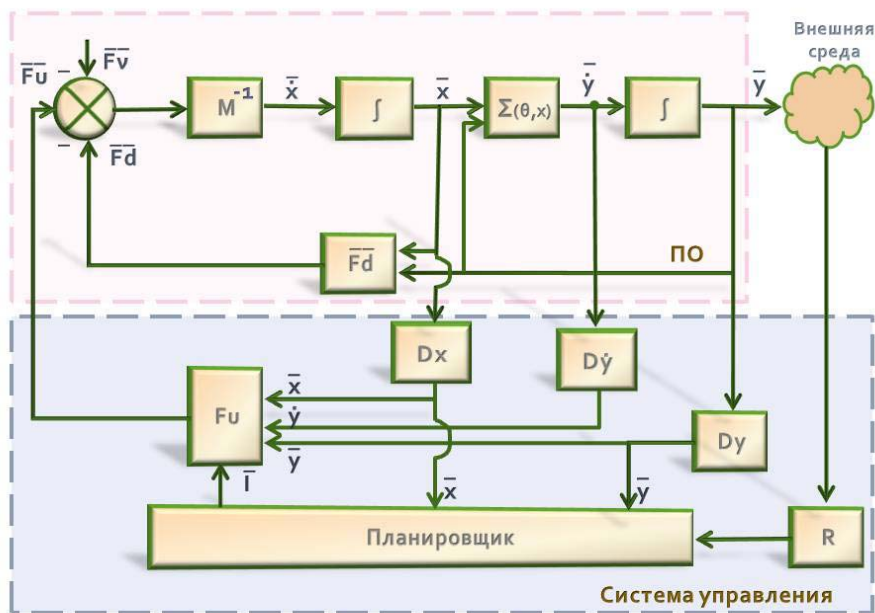


Рис. 1. Структурная схема замкнутой системы

Замкнутая система функционирует следующим образом. После инициализации системы управления блок R определяет расстояния R_c и вычисляет, в соответствии с выражением (9), значение бифуркационного параметра β , которое передается в планировщик для формирования элементов матриц T и A .

Планировщик формирует вектор I параметров движения: координаты целевой точки A_f , в общем случае нестационарной; элементы матриц A_{ij} , определяющих требования к установившимся движениям ПО (в начальный момент, в случае отсутствия препятствий, элементы матриц A_{ij} задают прямую, соединяющую начальное положение ПО с точкой A_f); желаемую скорость перемещения объекта V^* ; параметры s_i , определяемые в соответствии с выражением (10) и задающие характер движения ПО в переходных режимах; параметр ξ , характеризующий вид задачи управления; и, в случае необходимости, векторы оценок \hat{l} и \hat{F}_V конструктивных параметров и внешних возмущений [16].

Блок F_u , на основании параметров I , полученных от планировщика, в соответствии с выражением (7), (8а), формирует управляющие воздействия F_u , которые подаются на исполнительные механизмы ПО и обеспечивают его движение вдоль прямой, соединяющей начальное положение ПО с точкой A_f .

В случае нарушения условий (4), планировщик, в соответствии с выражением (10), изменяет значение параметров s_i и ПО переходит в режим неустойчивого движения до обнуления бифуркационного параметра β , т.е. выхода объекта в зону, свободную от препятствий.

После выхода в зону, свободную от препятствий, планировщик формирует элементы матриц A_{ij} в выражении (6б) и объект, в соответствии с управляющими воздействиями, вычисляемыми по выражениям (7), (8б), осуществляет разворот до выполнения условия $\alpha_A - \alpha < \frac{\pi}{2}$, где α_A , α – соответственно угол направления на целевую точку A_f и текущее значение угла ориентации объекта. В случае равенства нулю бифуркационного параметра β планировщик формирует элементы матриц A_{ij} , соответствующие прямой, соединяющей текущее положение ПО с точкой A_f , а блок F_u обеспечивает движение ПО вдоль вновь спланированной прямой. В противном случае, при $\beta \neq 0$, объект переходит в режим неустойчивого движения до обнуления бифуркационного параметра β .

Следует отметить, что организация разворота объекта используется для доопределения направления его движения вдоль вновь спланированной прямой. В случае использования иных процедур формирования требований к траекторной скорости V [3], этап разворота может быть исключен из предлагаемого алгоритма.

После выхода объекта в свободную от препятствий зону целевой точки A_f планировщик формирует элементы матриц A_{ij} по выражениям (6в) или (6г), что соответствует управляющим воздействиям (7), (8в) или (7), (8г) соответственно.

Из описанного алгоритма функционирования системы управления ПО следуют ограничения на его использование: так, например, при целенаправленном блокировании перемещений объекта со стороны препятствий или других ПО объект может не выйти из режима неустойчивого движения; в случае, если препятствия имеют достаточно сложную форму, типа лабиринта, то поставленная перед объектом задача может быть не решена им в рамках предлагаемого алгоритма без интеллектуализации планировщика, например с использованием нейросетевых технологий [17]; цель управления может быть не достигнута, если энерговооруженность ПО не соответствует динамике нестационарных препятствий и цели.

Основные преимущества предлагаемого в настоящей работе подхода заключаются в простоте его реализации и в том, что при организации обхода препятствий в априори неформализованной среде не требуется построение траекторий в зоне препятствия, что в ряде случаев, связанных с динамическими изменениями среды, не всегда представляется возможным в реальном времени.

В описанном алгоритме могут быть использованы отличные от (7), (8) выражения для формирования управляющих воздействий, стабилизирующие спланированные траектории в свободной от препятствий области функционирования ПО.

Моделирование движения ПО

Моделирование движения ПО на базе колесной тележки, имеющей переднее рулевое колесо и два задних ведущих колеса, управляемых одним приводом в априори неформализованных средах, проведено с использованием изложенных выше процедур и пакета Matlab 7.4. Математическая модель ПО представлена в [9].

Функциональные коэффициенты из (7) определяются в соответствии со следующими выражениями:

$$\Sigma_p = \begin{vmatrix} r^* \omega \left(c\beta c\alpha - h \frac{s\beta c\alpha}{d} \right) \\ r^* \omega \left(c\beta s\alpha + h \frac{s\beta c\alpha}{d} \right) \end{vmatrix}, \quad \Sigma_\theta = \left| \frac{r^* \omega s\beta}{d} \right|,$$

$$s(\cdot) = \sin(\cdot), \quad c(\cdot) = \cos(\cdot), \quad P = (x \quad y), \quad \Theta = \alpha, \quad X = (\omega \quad \beta)^T,$$

где ω – угловая скорость задних колес; β – угол поворота рулевого колеса; α – угол ориентации продольной оси тележки относительно базовой системы координат; r^* , h , d , α , b_1 , b_2 – конструктивные параметры.

Соответственно,

$$J_{\Sigma P\Theta} = \begin{vmatrix} r^* \omega \left(-c\beta s\alpha - \frac{hs\beta c\alpha}{d} \right) \\ r^* \omega \left(c\beta c\alpha - \frac{hs\beta s\alpha}{d} \right) \end{vmatrix}, \quad J_{\Sigma\Theta\Theta} = 0, \quad J_{\Sigma\Theta x} = \begin{vmatrix} \frac{r^* s\beta}{d} & \frac{r^* \omega c\beta}{d} \end{vmatrix},$$

$$J_{\Sigma Px} = \begin{vmatrix} r^* \left(c\beta c\alpha - \frac{hs\beta s\alpha}{d} \right) & r^* \omega \left(-s\beta c\alpha - \frac{hc\beta s\alpha}{d} \right) \\ r^* \left(c\beta s\alpha + \frac{hs\beta c\alpha}{d} \right) & r^* \omega \left(-s\beta s\alpha + \frac{hc\beta c\alpha}{d} \right) \end{vmatrix}.$$

На рис. 2 представлены результаты моделирования движения ПО из начальной точки (0;0) к стационарной точке A_f (140; 140) в среде с выпуклыми препятствиями: а) траектории движения ПО при различном расположении и геометрии стационарных препятствий и б) графики изменения бифуркационного параметра β на траектории движения.

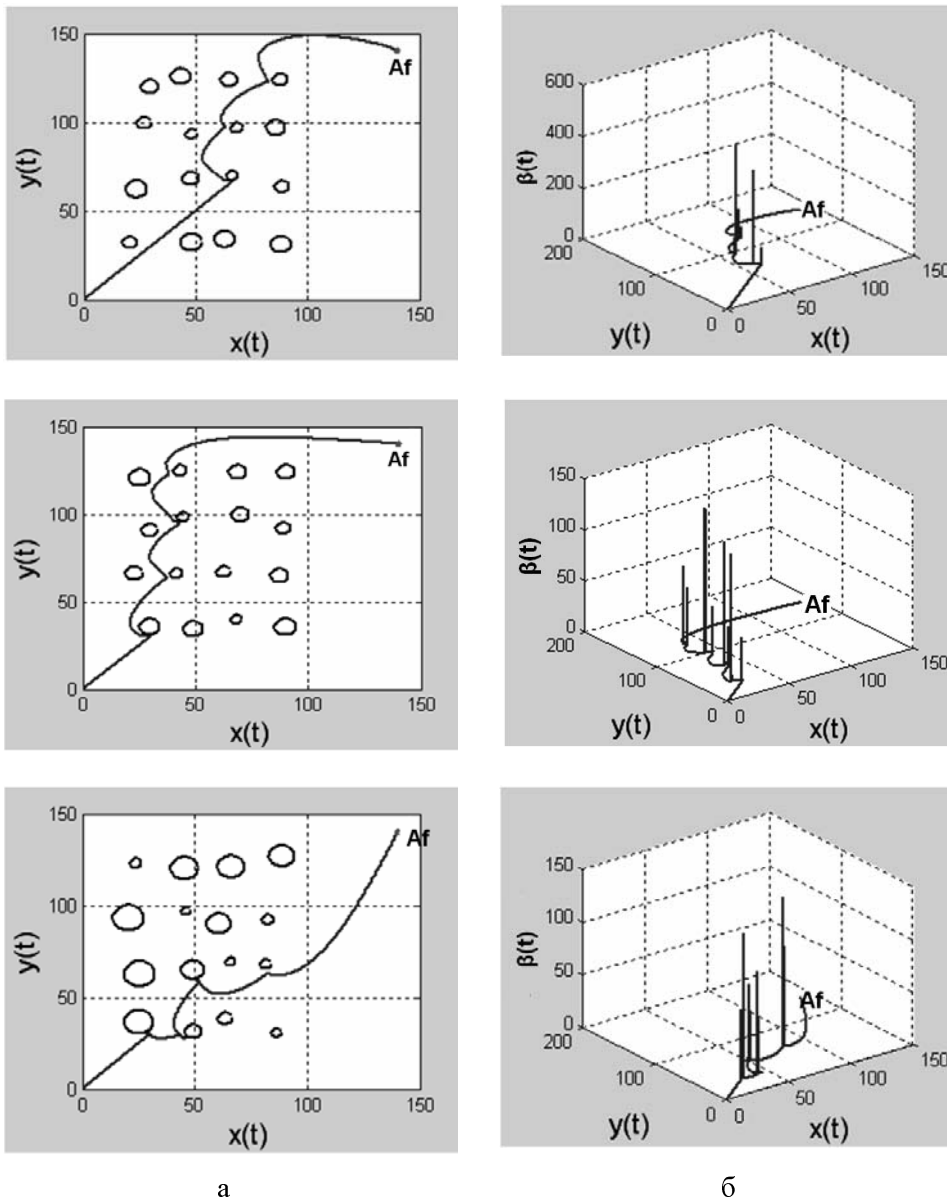


Рис. 2. Результаты моделирования движения ПО к стационарной точке A_f в среде с выпуклыми препятствиями: а – траектории движения ПО; б – графики изменения бифуркационного параметра β на траектории движения

На рис. 3 приведены результаты моделирования движения ПО из начальной точки (30;30) к стационарным точкам A_f в среде с линейными препятствиями, со скоростью $V=3$ м/с и $V=2$ м/с (а) траектории движения и б) значения траекторной скорости ПО) Нижний рис. 3,а демонстрирует ограничение на использование предлагаемого подхода. Задача управления может быть успешно решена при придании планировщику интеллектуальных свойств.

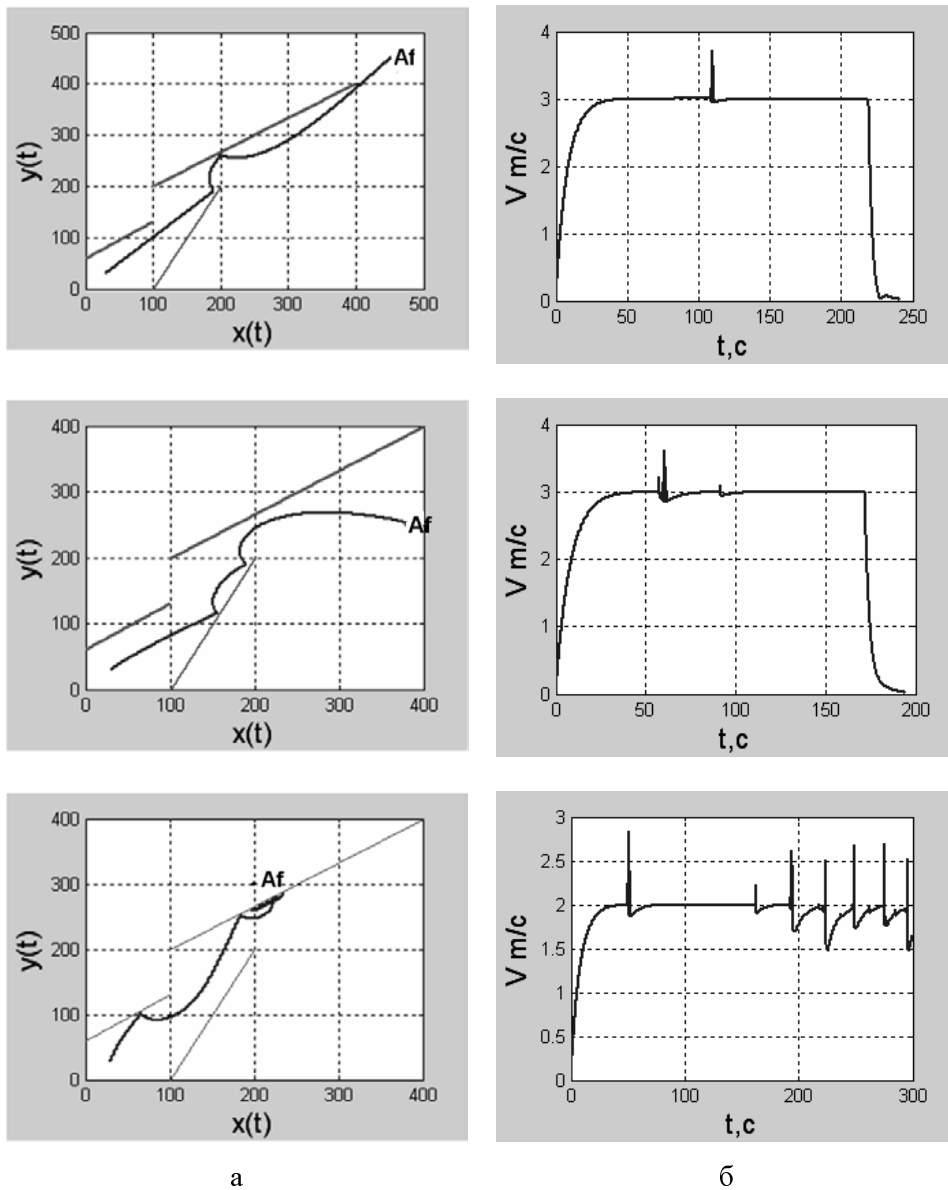


Рис. 3. Результаты моделирования движения ПО к стационарной точке A_f в среде с линейными препятствиями: а – траектории движения ПО; б – графики изменения траекторной скорости V

На рис. 4 представлены траектории движения ПО к целевой нестационарной точке в среде с различными вариантами размещения выпуклых препятствий. Причем целевая точка осуществляет равномерное прямолинейное движение из точки A_0 в точку A_f .

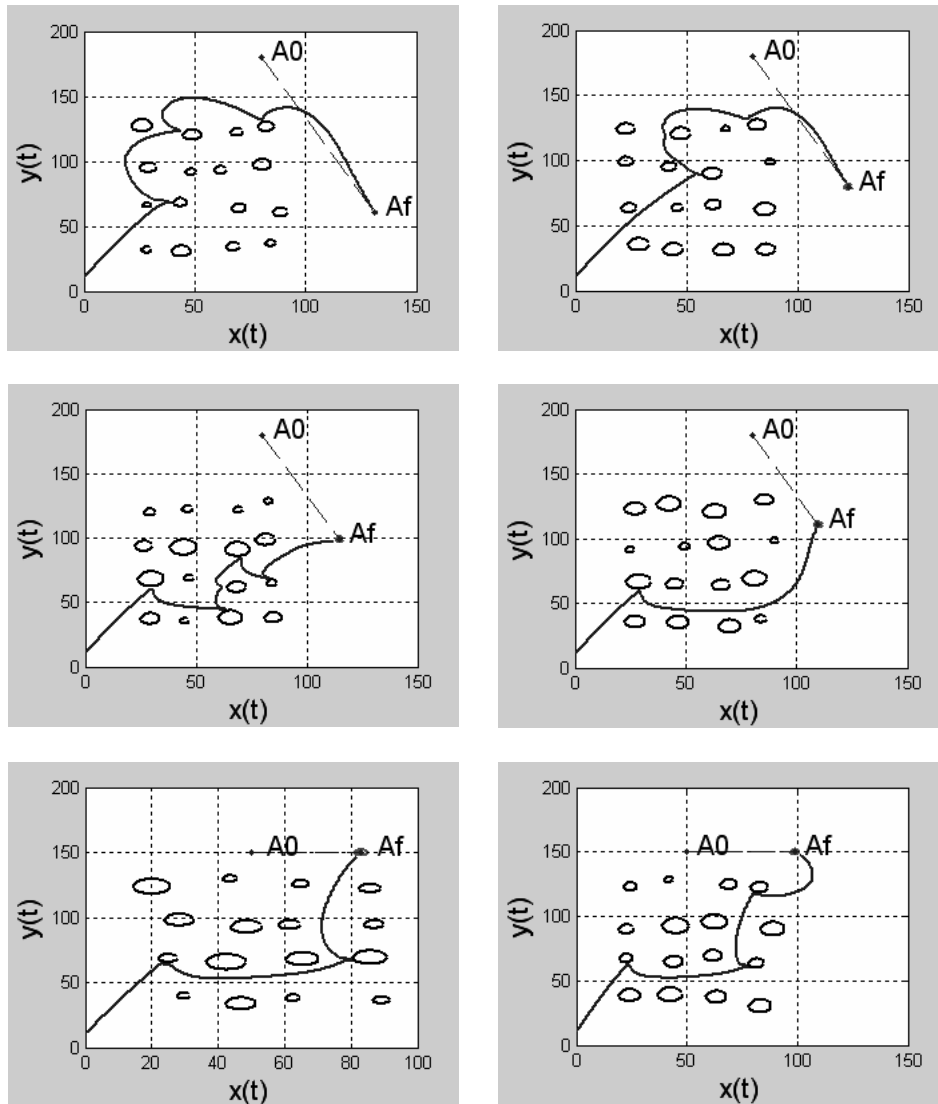


Рис. 4. Траектории движения ПО к нестационарной точке A_f в среде с выгнутыми препятствиями

На рис. 5 представлены результаты моделирования движения ПО при организации его движения в целевую стационарную точку $A_f(150, 150)$ в среде с нестационарными препятствиями, осуществляющими прямолинейное и равномерное движение. Траектории движения препятствий представлены пунктирной линией.

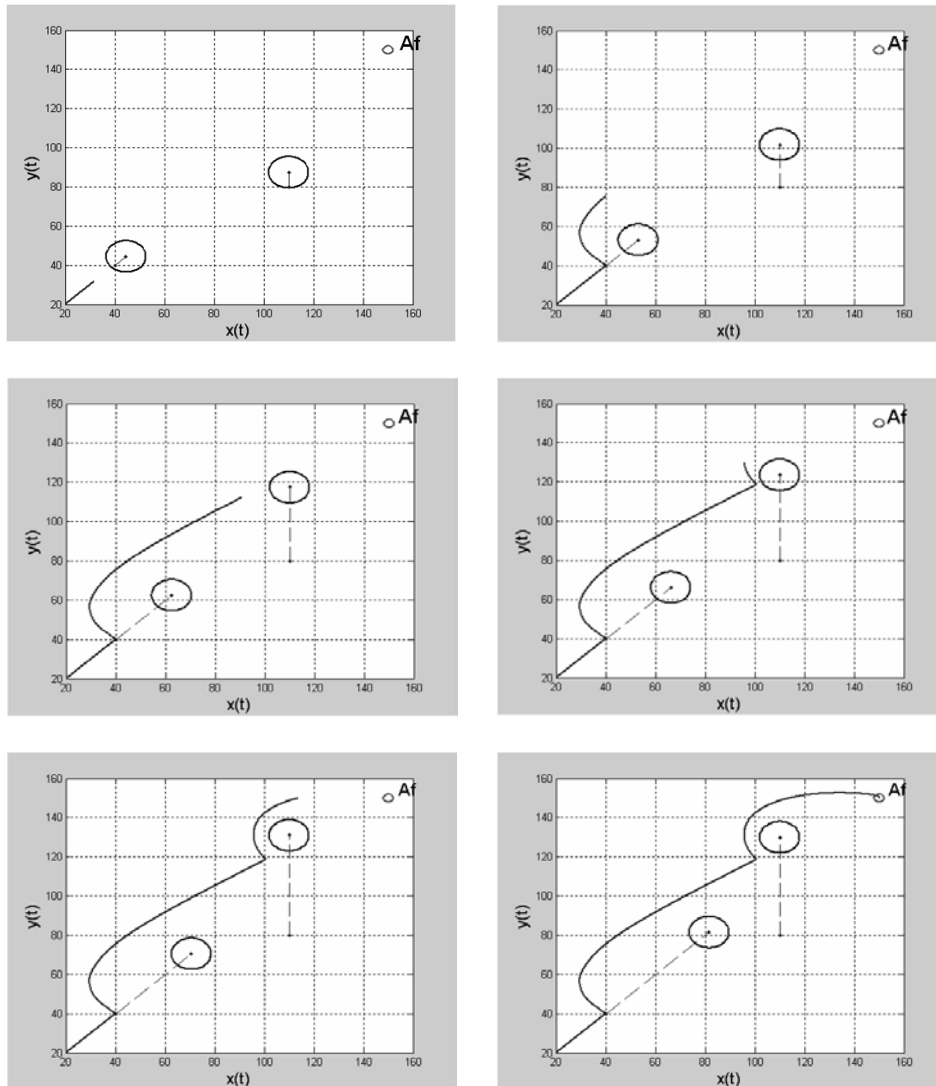


Рис. 5. Траектории движения ПО к стационарной точке A_f в среде с нестационарными препятствиями

Следует отметить, что предлагаемый подход не накладывает каких-либо, кроме энергетических, ограничений на характер движения целевой точки, препятствий, а также на начальное положение ПО.

Представленные результаты моделирования движения ПО в различных априори неформализованных средах демонстрируют эффективность предлагаемого в работе подхода.

Заключение

Предложенный в работе подход к организации движений автономных мобильных объектов в априори неформализованных средах, основанный на введении бифуркационного параметра для формирования режимов неустойчивого движения при переходе из одного устойчивого состояния в другое, не требует привлечения

интеллектуальных технологий планирования и управления, предварительного картографирования, а также наличия сложной системы навигации. Представленные процедуры формирования управляющих воздействий и алгоритм функционирования тактического уровня системы управления позволяют организовать движение ПО в средах со стационарными и нестационарными целевыми точками и препятствиями различной формы.

Предложенные решения могут быть использованы при формировании автопилотов для колесных тележек, транспортных платформ на базе летательных и подводных аппаратов, а также средств воздухоплавательной техники.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Интеллектуальные системы автоматического управления / Под ред. И.М. Макарова, В.М. Лохина. – М.: Физматлит, 2001. – 576 с.
2. 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.
3. Бурдаков С.Ф., Мирошник И.В., Стельмаков Р.Э. Системы управления движением колесных роботов. – СПб.: Наука, 2001.
4. Khatib O. Real-Time Obstacle Avoidance for Manipulators and Mobile Robots. The Int. Journal of Robotics Researches, Vol. 5, №1, 1986. – P. 90-98.
5. Borenstein J., Koren Y. Real-time Obstacle Avoidance for Fast Mobile Robots. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. 19, No. 5, Sept./Oct. 1989. – P. 1179-1187.
6. Canudas de Wit, Khennouf C.H., Samson C. and Sordalen O.J. Nonlinear control design for mobile robots // Y. Zheng (ed.) Recent trends in mobile robots. 1993. World Scientific. – P.121-156.
7. Топчиев Б.В. Синергетическое управление мобильными роботами// Нелинейный мир. – Т.2. – 2004. – №4. – С. 239-249.
8. Чернухин Ю. В., Пшихопов В. Х., Писаренко С.Н., Трубочев О.Н. Программная среда для моделирования поведения адаптивных мобильных роботов с двухуровневой системой управления // «Мехатроника», – 2000. – №6. – С. 26-30.
9. Пшихопов В.Х. Организация репеллеров при движении мобильных роботов в среде с препятствиями // «Мехатроника, автоматизация, управление», – 2008. – №2. – С. 34-41.
10. Пшихопов В.Х. Аттракторы и репеллеры в конструировании систем управления подвижными объектами // Известия ТРТУ. Тематический выпуск. Перспективные системы и задачи управления. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, – 2006. – № 3 (58). – С. 117 – 123.
11. Демидович Б.П. Лекции по математической теории устойчивости. – М.: Наука, 1967. – 472 с.
12. Ляпунов А.М. Общая задача об устойчивости движения. – Череповец: Меркурий-пресс, 2000. – 386 с.
13. Крутько П.Д., Осипов П.А. Кинематические алгоритмы управления движением транспортных систем мобильных роботов // Известия РАН. Теория и системы управления. – 1999. – №3. – С. 153-160.
14. Зимин М.Ф. Об уравнениях, определяющих площади, объемы и их границы // Математическое образование. – 1980. – №1.
15. Бойчук Л.М. Метод структурного синтеза нелинейных систем автоматического управления. – М: Энергия, 1971. – 112 с.
16. Пшихопов В.Х., Медведев М.Ю. Структурный синтез автопилотов подвижных объектов с оцениванием возмущений // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2006. – №1. – С.103-109.
17. Пшихопов В.Х., Сиротенко М.Ю. Структурно-алгоритмическая реализация системы управления автономным мобильным роботом с нейросетевым планировщиком перемещений // Известия ТРТУ. Тематический выпуск «Интеллектуальные САПР». – Таганрог: Изд-во ТРТУ. – 2004. – №3. – С.185-191.