



УДК: 62.529

MSC 2010: 93B18, 93B52

Дискретный алгоритм управления по отклонению мобильным роботом с омниколесами

Ю. Л. Караваев, С. А. Трефилов

В статье представлен алгоритм управления мобильным омниколесным роботом по отклонению для движения по траектории. Рассматривается кинематическая модель, а также динамика приводов мобильного робота.

Ключевые слова: мобильный омниколесный робот, дискретный алгоритм, управление по отклонению, линеаризация, обратная связь

В настоящее время производители и исследователи транспортных систем проявляют интерес к мобильным роботам, обладающим повышенной маневренностью, что позволяет расширить области их применения, но в то же время ведет к существенному усложнению конструкции робота. Примером таких мобильных роботов являются платформы с различными вариациями колес Mecapim, называемые также омниколесами [1]. Большое количество работ зарубежных и российских исследователей посвящено исследованию кинематики [2] и динамики движения мобильных роботов с омниколесами [3], в том числе в неголономной постановке [4], а также движению роботов под управлением оператора [2]. Однако не во всех работах обозначена проблема автономного движения мобильного робота с омниколесами по заданной траектории, а именно эта проблема, по мнению авторов, и является наиболее актуальной. Предварительные натурные эксперименты с мобильным омниколесным роботом, при которых робот выполнял движение по заданным траекториям (синусоида, отрезки прямых под углом 45° , «восьмерка» и т. д.) на плоских поверхностях из различных материалов (линолеум, бетонное покрытие, гранит), показали существенные

Получено 11 марта 2013 года

После доработки 1 апреля 2013 года

Работа выполнена в лаборатории нелинейного анализа и конструирования новых средств передвижения ФГБОУ ВПО «Удмуртский государственный университет».

Караваев Юрий Леонидович

karavaev_yury@istu.ru

Трефилов Сергей Александрович

tsa@istu.ru

Ижевский государственный технический университет им. М. Т. Калашникова

426069, Россия, г. Ижевск, ул. Студенческая, д. 71



отклонения действительной траектории от заданной. Величина отклонений зависит от материала поверхности, его гладкости и чистоты. Данные характеристики даже для одного относительно однородного материала существенно различаются и имеют случайный характер. С другой стороны, конструктивная особенность омниколес не обеспечивает наличие постоянного и равномерного зацепления с поверхностью.

Целью данной работы является разработка информационно-измерительной системы и алгоритма управления мобильным омниколесным роботом для обеспечения его перемещения по заданной траектории.

Рассмотрим модель четырехколесного омниколесного мобильного робота, схема которого представлена на рисунке 1. Наклонными отрезками показаны направления расположения роликов каждого омниколеса. Ось каждого ролика закреплена под углом 45° к плоскости колеса. Для управления движением омниробота по траектории в неподвижной системе координат xOy используем переменные состояния, связанные с геометрическим центром платформы: Vx — проекция скорости движения робота по траектории на ось Ox , Vy — проекция скорости движения робота по траектории на ось Oy , Ω — угловая скорость вращения робота относительно оси, перпендикулярной плоскости.

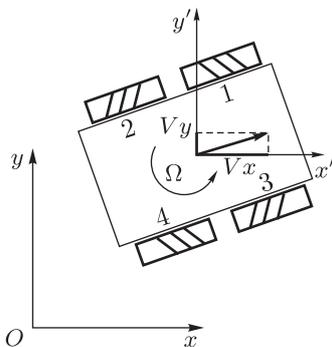


Рис. 1. Схема расположения омниколес мобильного робота.

Рассмотрим классический закон управления движением объекта по траектории [5]. Считаем, что перемещение робота описывается системой линейных дифференциальных уравнений

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u}, \quad (1)$$

где \mathbf{A} и \mathbf{B} — матрицы состояния и управления соответственно, \mathbf{x} — вектор состояний, \mathbf{u} — вектор управления. Представим непрерывную гладкую траекторию в дискретном виде, причем время дискретизации Δt стремится к нулю, а траектория на каждом дискретном участке линейна. Тогда, в соответствии с [6], система линейных уравнений (1) может быть представлена в виде

$$\mathbf{x}^{k+1} = \tilde{\mathbf{A}}\mathbf{x}^k + \tilde{\mathbf{B}}\mathbf{u}, \quad (2)$$

где $\tilde{\mathbf{A}} = \Delta t\mathbf{A} + \mathbf{E}$, $\tilde{\mathbf{B}} = \Delta t\mathbf{B}$. Данное уравнение связывает состояния системы в моменты времени k и $k + 1$. Раскрывая обозначенные матрицы и принимая $\tilde{\mathbf{A}} = \mathbf{E}$ (то есть $\mathbf{A} = 0$ — при отсутствии внешнего воздействия скорость робота сохраняется), запишем уравнение (1) в неподвижной системе координат для конструкции омниколесного робота, представленной

на рисунке 1:

$$\begin{bmatrix} V_x^{k+1} \\ V_y^{k+1} \\ \Omega^{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_x^k \\ V_y^k \\ \Omega^k \end{bmatrix} + 2\pi r \Delta t \mathbf{Q} \begin{bmatrix} \frac{1}{4} & \frac{1}{4} & \frac{1}{4} & \frac{1}{4} \\ -\frac{1}{4} & \frac{1}{4} & \frac{1}{4} & -\frac{1}{4} \\ -\frac{1}{2(c+e)} & \frac{1}{2(c+e)} & -\frac{1}{2(c+e)} & \frac{1}{2(c+e)} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta\omega_1 \\ \Delta\omega_2 \\ \Delta\omega_3 \\ \Delta\omega_4 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Здесь $[V_x^{k+1}, V_y^{k+1}, \Omega^{k+1}]^T$ — состояния системы в момент времени $k + 1$, $[V_x^k, V_y^k, \Omega^k]^T$ — состояния системы в момент времени k , матрица поворота

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} \cos \varphi^k & -\sin \varphi^k & 0 \\ \sin \varphi^k & \cos \varphi^k & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

отражает поворот робота в неподвижной системе координат xOy ; матрица управления

$$\mathbf{B} = 2\pi r \begin{bmatrix} \frac{1}{4} & \frac{1}{4} & \frac{1}{4} & \frac{1}{4} \\ -\frac{1}{4} & \frac{1}{4} & \frac{1}{4} & -\frac{1}{4} \\ -\frac{1}{2(c+e)} & \frac{1}{2(c+e)} & -\frac{1}{2(c+e)} & \frac{1}{2(c+e)} \end{bmatrix}$$

получена из уравнений кинематики омниколесного робота [1], где r — радиус омниколеса, c — ширина платформы робота, e — длина платформы, вектор управления $[\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4]^T$ — изменение угловых скоростей вращения омниколес. Угловая скорость вращения двигателя является (при заданных передаточном отношении редуктора и сопротивлении обмоток двигателя постоянного тока) функцией подаваемого эквивалентного напряжения, которое, в свою очередь, в зависимости от физической реализации драйвера двигателя постоянного тока, является функцией скважности или частоты импульсов сигнала управления.

Аналитическая модель движения омниколесного робота по траектории

Рассмотрим движение омниколесного робота из точки A в точку B по траектории, заданной функцией в параметрическом виде $x = f_x(t)$, $y = f_y(t)$, $\varphi = f_\varphi(t)$. Расстояние, которое необходимо преодолеть роботу за время T , определяется как длина кривой:

$$S = \int_A^B \sqrt{(x'(t))^2 + (y'(t))^2} dt. \quad (4)$$

Если в начальный момент времени (в точке A) мобильный робот находился в состоянии покоя, то есть $V = 0$ и $\Omega = 0$, и в точке B ему необходимо остановиться, то траекторию движения можно представить в виде совокупности трех участков, изображенных на рисунке 2.

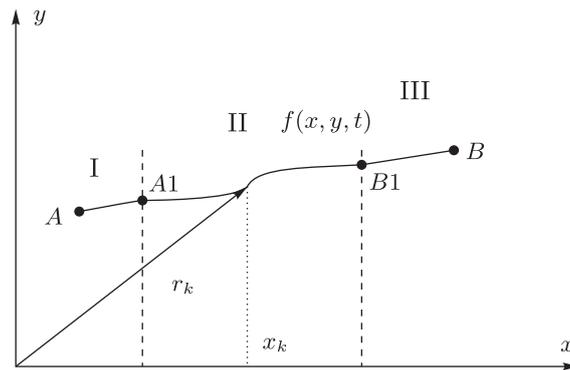


Рис. 2. Пример траектории движения робота (A — начальная точка, $A1$ — точка отхода, $B1$ — точка подхода, B — конечная точка).

На первом участке (от A до $A1$) центр масс робота перемещается с ускорением, на втором — с постоянной скоростью, а на третьем (от $B1$ до B) необходимо обеспечить его замедление. Для обеспечения гладкости сопряжения отрезков траектории необходимо обеспечить выполнение следующих условий (\mathbf{a} — вектор ускорения, \mathbf{a}^τ — тангенциальная составляющая ускорения, \mathbf{V} — вектор скорости мобильного робота):

$$\begin{aligned} \mathbf{V}_A^I &= 0, & \mathbf{V}_B^III &= 0, & \mathbf{V}_{A1}^I &= \mathbf{V}_{A1}^II, & \mathbf{V}_{B1}^II &= \mathbf{V}_{B1}^III, \\ \mathbf{a}_A^I &= 0, & \mathbf{a}_B^III &= 0, & \mathbf{a}_{A1}^{I\tau} &= \mathbf{a}_{A1}^{II\tau} = 0, & \mathbf{a}_{B1}^{II\tau} &= \mathbf{a}_{B1}^{III\tau} = 0. \end{aligned}$$

Продолжительность движения по первому и третьему участкам определяется динамическими характеристиками мобильного робота, приводных двигателей, а также ориентацией робота, заданной функцией $\varphi = f_\varphi(t)$. В первом приближении будем считать движение центра масс робота на втором участке траектории равномерным со скоростью $V^II = S^II/T^II$. Для начала рассмотрим движение именно на этом участке траектории.

В процессе дискретизации разобьем кривую между точками $A1$ и $B1$ на N равных по времени Δt участков. Следовательно, расстояние, проходимое роботом за время Δt , на всех участках будет равным $\Delta S^II = V^II \cdot \Delta t$ (рис. 3).

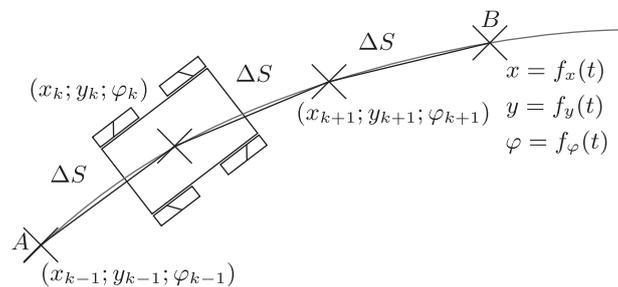


Рис. 3. Движение омниколесного робота по траектории.

Для определения управляющих воздействий на каждом участке необходимо выразить из уравнения (3) вектор $[\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4]^T$.

Введем следующее обозначение:

$$\begin{bmatrix} \Delta V_x^{k+1} \\ \Delta V_y^{k+1} \\ \Delta \Omega^{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_x^{k+1} \\ V_y^{k+1} \\ \Omega^{k+1} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} V_x^k \\ V_y^k \\ \Omega^k \end{bmatrix};$$

тогда, согласно [1], получим

$$\begin{bmatrix} \Delta \omega_1 \\ \Delta \omega_2 \\ \Delta \omega_3 \\ \Delta \omega_4 \end{bmatrix} = \frac{1}{2\pi r} \begin{bmatrix} 1 & -1 & -\frac{c+e}{2} \\ 1 & 1 & \frac{c+e}{2} \\ 1 & 1 & -\frac{c+e}{2} \\ 1 & -1 & \frac{c+e}{2} \end{bmatrix} \cdot \mathbf{Q} \cdot \begin{bmatrix} \Delta V_x^{k+1} \\ \Delta V_y^{k+1} \\ \Delta \Omega^{k+1} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Следует отметить, что значения составляющих линейной скорости V_x и V_y , а также угловую скорость Ω на участке можно легко вычислить по заданным функциям траектории (4). Если φ^k — угол ориентации робота в момент времени k относительно неподвижной системы координат, то

$$\Delta \Omega^{k+1} = \frac{\varphi^{k+1} - \varphi^k}{\Delta t} - \frac{\varphi^k - \varphi^{k-1}}{\Delta t}, \quad (6)$$

$$\Delta V_x^{k+1} = \frac{x^{k+1} - x^k}{\Delta t} - \frac{x^k - x^{k-1}}{\Delta t}, \quad (7)$$

$$\Delta V_y^{k+1} = \frac{y^{k+1} - y^k}{\Delta t} - \frac{y^k - y^{k-1}}{\Delta t}. \quad (8)$$

Подставляя значения, полученные из (6), (7), (8), в уравнение (5), найдем для каждого из четырех моторов аналитические управляющие воздействия, обеспечивающие движение омниколесного робота по заданной траектории:

$$\begin{bmatrix} \Delta \omega_1 \\ \Delta \omega_2 \\ \Delta \omega_3 \\ \Delta \omega_4 \end{bmatrix} = \frac{1}{2\pi r} \begin{bmatrix} 1 & -1 & -\frac{c+e}{2} \\ 1 & 1 & \frac{c+e}{2} \\ 1 & 1 & -\frac{c+e}{2} \\ 1 & -1 & \frac{c+e}{2} \end{bmatrix} \cdot \mathbf{Q} \cdot \begin{bmatrix} \frac{x^{k+1} - x^k}{\Delta t} - \frac{x^k - x^{k-1}}{\Delta t} \\ \frac{y^{k+1} - y^k}{\Delta t} - \frac{y^k - y^{k-1}}{\Delta t} \\ \frac{\varphi^{k+1} - \varphi^k}{\Delta t} - \frac{\varphi^k - \varphi^{k-1}}{\Delta t} \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Максимальная скорость робота $V_{\max} = (V_x, V_y)$ определяется максимальной частотой вращения приводных двигателей, а также направлением движения на элементарном участке. Рассмотрим движение робота в различных направлениях при $\varphi(t) = \text{const}$, то есть $\Delta \Omega = 0$. Направление движения определяется соотношением составляющих линейной скорости робота (V_x, V_y) . С максимальной линейной скоростью V_{\max} робот будет двигаться в случае вращения четырех колес в одном направлении с максимальной угловой скоростью $\omega_1 = \omega_2 = \omega_3 = \omega_4 = \omega_{\max}$ (тогда $\mathbf{V}_{\max} = (V_x, 0)$), или при $\omega_1 = \omega_3 = -\omega_{\max}$ и $\omega_2 = \omega_4 = \omega_{\max}$



(тогда $V_{\max} = (0, V_y)$). Значение ω_{\max} — это технически максимально достижимая угловая скорость вращения приводного двигателя. Анализируя выражение (9) с учетом данных условий, получены графические зависимости для $r = 0.16$, $c = e = 1$, представленные на рисунке 4 и отображающие характер соотношения скоростей в зависимости от выбранного направления движения в диапазоне от 0 до 2π .

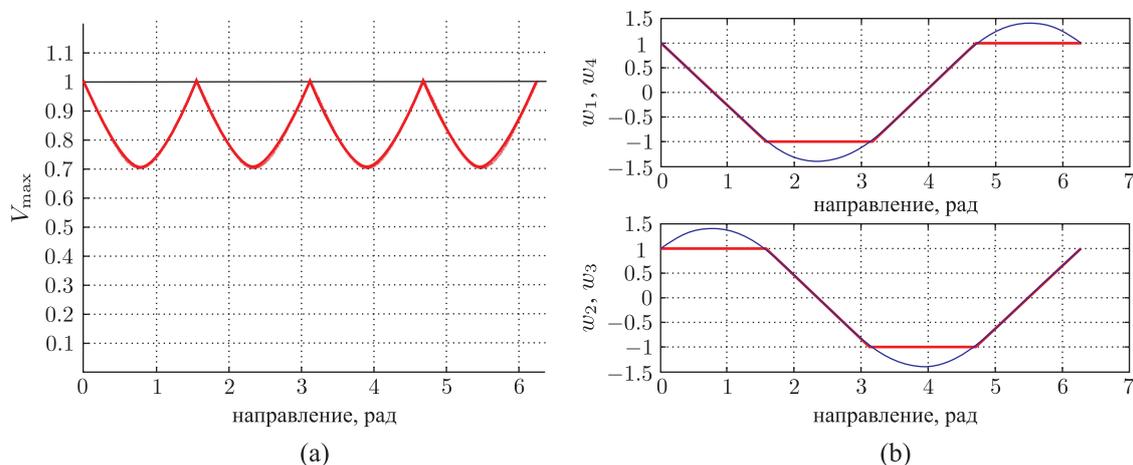


Рис. 4. Зависимости скоростей от направления движения в диапазоне от 0 до 2π : (а) линейная скорость робота, (б) угловые скорости вращения каждого колеса.

На рисунке 4 жирными линиями показаны значения с учетом достижения максимальной угловой скорости вращения приводов. Данный факт необходимо учитывать при планировании траектории омниколесного робота, так как при направлении движения, отличного от $\frac{\pi}{2}n$, линейная скорость робота будет меньше максимальной.

Характерным отличием первого и третьего участков (рис. 2) является состояние мобильного робота в начальной и конечной точках. На первом участке робот из состояния покоя должен с ускорением переместиться в точку А1. Для исследования динамических характеристик, определяющих время разгона и торможения робота, построим передаточную функцию системы. Конструкция рассматриваемого мобильного робота predetermined: четыре двигателя постоянного тока с независимыми магнитами через редуктор с передаточным отношением 1 : 67 приводят в движение четыре омниколеса. Подробные технические характеристики системы, необходимые для построения передаточной функции, представлены в таблице 1. Так как двигатели и колеса абсолютно идентичные, запишем уравнение движения для одного привода, а позднее рассмотрим распределение нагрузки между четырьмя двигателями. Каждый привод состоит из двух элементов: двигателя постоянного тока и редуктора. Омниколесо устанавливается непосредственно на выходной вал редуктора. Тогда передаточная функция системы имеет вид $W = W_M * W_G$, где W_M — передаточная функция двигателя, $W_G = 1/67$ — передаточная функция редуктора. Для построения передаточной функции двигателя рассмотрим основное уравнение вращательного движения [7]:

$$J \frac{dw(t)}{dt} = M(t) - M_H(t), \quad (10)$$

где $M(t) = C_M i(t)$ — электромагнитный момент двигателя постоянного тока, $M_H(t)$ — момент нагрузки, $w(t) = \frac{d\theta}{dt}$ — угловая скорость вращения двигателя, J — приведенный

момент инерции ротора, C_M — постоянная, определяемая конструктивными параметрами мотора, $i(t)$ — ток в обмотке двигателя. Ток в обмотке двигателя определяется из уравнения [7]

$$L \frac{di(t)}{dt} = Ri(t) + e(t) = u(t), \tag{11}$$

где L — индуктивность обмотки двигателя, R — активное сопротивление обмотки, $e(t) = C_E \cdot w(t)$ — электродвижущая сила якоря, $u(t)$ — напряжение, прикладываемое к обмоткам двигателя, C_E — постоянная, определяемая электротехническими параметрами двигателя.

Таблица 1. Характеристики приводного двигателя

Наименование характеристики приводного двигателя	Обозначение	Значение
Приведенный момент инерции	J	0.0002 кгм ²
Индуктивность обмотки двигателя	L	15.7 мГн
Активное сопротивление обмотки	R	1.48 Ом
Номинальное напряжение питания	U_H	12 В
Номинальный момент	M_H	0.11 Нм
Мощность двигателя	P	60 Вт
Номинальная частота вращения	n	10 000 об/мин
Электротехническая постоянная	C_E	0.0053 Вc
Механическая постоянная	C_M	0.012 Нм/А

Считаем, что на рассматриваемых интервалах траектории мобильного робота (участки I и II на рис. 2) момент нагрузки на валу двигателя, то есть момент, который ему необходимо развить, равен максимальному значению M_{max} . Введя оператор дифференцирования по Лапласу $p^k = \frac{d^k}{dt^k}$ [8], уравнения (10) и (11) запишем в виде

$$(T_A \cdot T_E \cdot p^2 + T_E \cdot p + 1) \cdot p \cdot \Theta(p) = k_1 \cdot U(p) - k_2 \cdot (T_A \cdot p + 1) \cdot M_H(p),$$

где $T_E = \frac{J \cdot R}{C_E \cdot C_M}$, $k_2 = \frac{R}{C_E \cdot C_M}$, $k_1 = \frac{1}{C_E}$, $T_A = \frac{L}{R}$, $\Theta(p)$, $U(p)$, $M_H(p)$ — изображения по Лапласу функций $\theta(t)$, $u(t)$, $M_H(t)$. Тогда передаточная функция двигателя по возмущению имеет вид

$$W_M = \frac{k_2 \cdot (T_A \cdot p + 1)}{(T_A \cdot T_E \cdot p^2 + T_E \cdot p + 1) \cdot p}.$$

По полученной передаточной функции в среде Matlab построены переходные характеристики привода омниколесного робота (см. рис. 5). Черным цветом ($M2$) показана переходная характеристика привода при максимальном моменте на выходном валу (рассчитанном по техническим данным привода). В этом случае задержка по времени составляет 6 секунд.

Серым цветом ($M1$) показана переходная характеристика привода при моменте нагрузки в два раза меньше максимального. Время задержки в этом случае составляет 3 секунды. Анализ кинематики мобильного робота по уравнениям (9) (рис. 4) показал, что в зависимости от направления движения нагрузка на приводы при одной и той же массе платформы



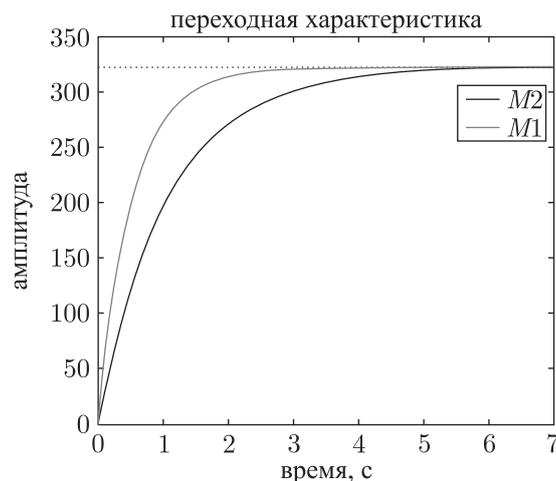


Рис. 5. Переходные характеристики привода мобильного робота $M2 = M_{\max}$, $M1 = 0.5M_{\max}$.

изменяется. Например, при $w_1 = w_2 = w_3 = w_4 = w_{\max}$, тогда $V = V_x = 1$ (рис. 4), $V_y = 0$ — нагрузка распределяется между всеми колесами равномерно, а при $w_1 = w_3 = 0$ и $w_2 = w_4 = w_{\max}$, тогда $V = \frac{\sqrt{2}}{2}$, $V_x = V_y = \frac{1}{2}$ — нагрузка распределяется между двумя колесами (значения $w_1 = w_3 = 0$ означают, что к соответствующим колесам не приложен управляющий момент, они вращаются свободно при движении робота). Следовательно, время разгона до одной и той же скорости в рассматриваемых направлениях будет отличаться в два раза, что показано на рисунке 5.

Полученная передаточная функция и характеристика переходного процесса позволяет спрогнозировать при известном моменте нагрузки длительность интервалов разгона и торможения (рис. 2) омниколесного робота по траектории.

Как показали предварительные эксперименты, при использовании данного теоретического подхода отклонение реальной траектории движения омниколесного робота от заданной сопоставимо с длиной траектории (если заданная траектория отлична от прямой). Причиной отклонения робота от заданной траектории в процессе движения является влияние внешних случайных воздействий (например, неравномерность коэффициента трения роликов о поверхность, неравномерность трения при вращении ролика относительно самого колеса и т. д.).

Движение робота по траектории с датчиками обратной связи

Рассмотрим произвольное отклонение омниколесного робота в момент времени k (см. рис. 6).

Новое положение омниколесного робота отличается от расчетного и определяется координатами $(x_r^k, y_r^k, \varphi_r^k)$. Данные координаты вычисляются с помощью информационно-измерительной системы робота, в состав которой входят трехкомпонентный МЭМС-гироскоп и трехосевой акселерометр. Интегрируя их показания, мы определяем изменение положения и ориентации омниколесного робота относительно его начального состояния (неподвижной системы отчета). Следовательно, все компоненты вектора состояния из уравнения (3) $[V_x^k, V_y^k, \Omega^k]^T$ определяются по показаниям датчиков обратной связи.

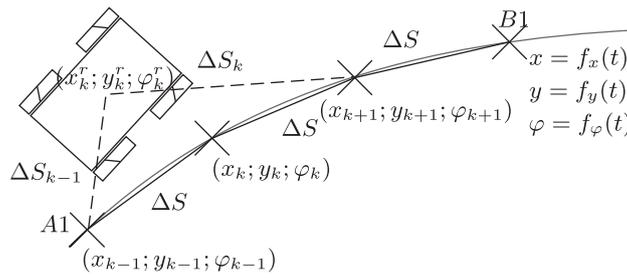


Рис. 6. Схема отклонения омниколесного робота от траектории.

Вне зависимости от величины отклонения (предполагается, что это малая величина ввиду малого значения времени дискретизации) для возврата к заданной траектории выполним пересчет управляющих воздействий таким образом, что возврат осуществляется в точку, соответствующую времени $k + 1$ (рис. 6). Для устранения отставания (или опережения) по времени необходимо на следующем отрезке двигаться с большей (или меньшей) скоростью. Величина этой локальной скорости определяется из уравнения

$$V_r^{k+1} = \frac{\sqrt{(x^{k+1} - x_r^k)^2 + (y^{k+1} - y_r^k)^2}}{\Delta t}. \quad (12)$$

Определение управляющих воздействий для каждого двигателя осуществляем также по формуле (5), но значения $[\Delta V_x^{k+1}, \Delta V_y^{k+1}, \Delta \Omega^{k+1}]^T$ корректируются с учетом уравнения (12) для каждого дискретного участка с учетом реального положения робота:

$$\Delta \Omega^{k+1} = \frac{\varphi^{k+1} - \varphi_r^k}{\Delta t} - \frac{\varphi_r^k - \varphi^{k-1}}{\Delta t}, \quad (13)$$

$$\Delta V_x^{k+1} = \frac{x^{k+1} - x_r^k}{\Delta t} - \frac{x_r^k - x^{k-1}}{\Delta t}, \quad (14)$$

$$\Delta V_y^{k+1} = \frac{y^{k+1} - y_r^k}{\Delta t} - \frac{y_r^k - y^{k-1}}{\Delta t}. \quad (15)$$

Матрица \mathbf{Q} корректируется по действительной ориентации робота:

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} \cos \varphi_r^k & -\sin \varphi_r^k & 0 \\ \sin \varphi_r^k & \cos \varphi_r^k & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Таким образом, подстановкой в уравнение (5) решений (13), (14), (15) осуществляется возврат омниколесного робота к заданной траектории по кратчайшему расстоянию. Данные вычисления по корректировке траектории проводятся через каждые Δt секунд, что требует от информационно-измерительной системы и системы управления роботом высокого быстродействия. Если робот за время Δt не успевает обработать заданное перемещение (ввиду ограниченности максимальной скорости движения), то система управления автоматически будет обрабатывать устранение оставшегося отклонения на следующем шаге.

Представленный дискретный алгоритм управления обеспечивает движение омниколесного робота по заданной траектории. В отличие от известных алгоритмов ПИД-управления, недостатком которых является сложность определения необходимых коэффициентов регулирования, рассмотренный алгоритм обеспечивает адаптивное управление на каждом интервале Δt . В случае существенных отклонений возможна корректировка управляющих воздействий таким образом, чтобы возврат осуществлялся в точки, соответствующие моментам времени $k + 2$ или $k + n$, а не моменту $k + 1$. Для этого достаточно по реальному положению рассчитать величины $\Delta S_{k+1}, \Delta S_{k+2}, \dots, \Delta S_{k+n}$ (то есть расстояния до предполагаемых точек возврата) и выбрать наименьшую из них.

Список литературы

- [1] Бройнль Т. Встраиваемые робототехнические системы. Москва–Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2012. 518 с.
- [2] Liu Y., Zhu J., Williams R. L. II, Jianhua Wu. Omni-directional mobile robot controller based on trajectory linearization // *Robot. Auton. Syst.*, 2008, vol. 56, pp. 461–479.
- [3] Purwin O., D'Andrea R. Trajectory generation and control for four wheeled omnidirectional vehicles // *Robot. Auton. Syst.*, 2006, vol. 54, pp. 13–22.
- [4] Борисов А. В., Килин А. А., Мамаев И. С. Тележка с омниколесами на плоскости и сфере // *Нелинейная динамика*, 2011, т. 7, № 4, с. 785–801.
- [5] Сейдж Э. П., Уайт Ч. С. III. Оптимальное управление системами. Москва: Радио и связь, 1982. 392 с.
- [6] Справочник по теории автоматического управления / А. А. Красовский. Москва: Наука, 1987. 712 с.
- [7] Герман-Галкин С. Matlab & Simulink: Проектирование мехатронных систем на ПК. Москва: Корона-век, 2011. 368 с.
- [8] Теория автоматического управления: В 2-х частях: Ч. 1. Теория линейных систем автоматического управления / А. А. Воронов. Москва: Высш. школа, 1986. 387 с.

Deviation based discrete control algorithm for omni-wheeled mobile robot

Yuri L. Karavaev¹, Sergey A. Trefilov²

M. T. Kalashnikov Izhevsk State Technical University
Studencheskaya st. 7, Izhevsk, 426069, Russia

¹karavaev_yury@istu.ru, ²tsa@istu.ru

The paper deals with deviation based control algorithm for trajectory following of omni-wheeled mobile robot. The kinematic model and the dynamics of the robot actuators are described.

MSC 2010: 93B18, 93B52

Keywords: omni-wheeled mobile robot, discrete algorithm, deviation based control, linearization, feedback

Received March 11, 2013, accepted April 1, 2013

Citation: *Rus. J. Nonlin. Dyn.*, 2013, vol. 9, no. 1, pp. 91–100 (Russian)

