

С в е Л и н Х т у А у н г

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ЗАКОНА УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ МОБИЛЬНОГО РОБОТА В ГОРОДСКИХ УСЛОВИЯХ

Решена задача параметрического синтеза закона управления движением мобильного колесного робота по плоскому рельефу (вдоль тротуара в городских условиях). Рассмотрены уравнения движения, учитывающие динамические характеристики робота, а также двигатели ведущих колес. Проведенная линеаризация позволила получить линейную стационарную модель объекта управления и выбрать на ее основе значение параметра, обеспечивающего аperiodический характер траектории движения. Приведены результаты экспериментов.

E-mail: swelinhtooaung@gmail.com

Ключевые слова: *мобильный робот, управление движением мобильного робота, городские условия, движение вдоль тротуара, параметрический синтез.*

Разработка методов управления автономным движением мобильных роботов (МР), в последнее время привлекает внимание все большего числа исследователей. Управление естественным образом строится на основе информации, поступающей с бортовых сенсорных систем, а также внешних источников информации (GPS, Глонасс). В качестве бортовых систем наиболее часто используются системы зрения, выполненные на базе СТЗ и сканирующих лазерных дальномеров [1, 2]. Хорошим доказательством актуальности проблемы развития методов автономного управления является проведение соревнований МР [3], в которых участвуют ведущие университеты развитых стран. Так, в России в течение ряда лет проходит Девянинский фестиваль, в рамках которого проводятся соревнования автономных МР, выполняющих ряд заданий на специально оборудованном полигоне. В 2010 г. состоялись первые в России соревнования МР, движущихся по трассе, проложенной по пересеченной местности (берег озера Селигер) [4]. Аналогичные соревнования проводились в США в 2004 и 2005 гг. [3], а в 2007 г. там же проходили соревнования роботов в городских условиях. В процессе этих соревнований роботы, сконструированные на базе серийно выпускаемых автомобилей, должны были достичь предварительно указанной на карте точки, соблюдая в процессе движения соответствующие дорожные правила [3, 4].

Круг задач, которые необходимо решать в процессе разработки такого класса систем, чрезвычайно широк и в настоящее время не существует общепринятых подходов для их решения. В настоящей работе приведено решение частной задачи: — управление МР, движущимся

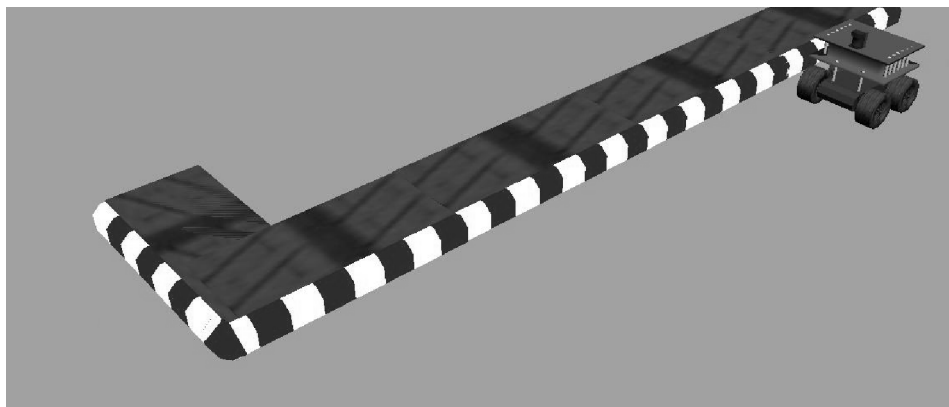


Рис. 1. Движение робота в городских условиях

вдоль прямолинейного тротуара, возможно, терпящего разрывы. Управление строится на основе информации, получаемой от сканирующего 3D лазерного дальномера.

Постановка задачи. Пусть колесный МР движется по плоской горизонтальной поверхности в городских условиях. При этом целью управления является обеспечение движения МР вдоль тротуара с использованием имеющейся на борту системы оучувствления (рис. 1), в качестве которой выступает сканирующий лазерный 3D дальномер. При помощи лазерного дальномера составляется цифровое описание рельефа рабочей зоны (картография), определяется положение автомобиля на дороге (локализация), осуществляется слежение за соседней полосой, контролируется дистанция от тротуара. В работе [5] для решения 3D SLAM-проблемы был предложен метод, позволяющий постоянно отслеживать координаты положения робота и интерпретировать информацию об окружающей среде по измерениям дальномера.

Рассматриваемая в настоящей работе задача состоит в определении и выборе параметров, входящих в закон управления, обеспечивающих устойчивость и приемлемое качество траектории.

Предположим, что абсолютная система координат расположена так, что ось X_0 параллельна тротуару, а сам тротуар представляет собой (в плане) последовательность отрезков, лежащих на одной прямой, расположенной на оси X_0 . Таким образом, не рассматриваются более сложные движения робота, например повороты.

Такие задачи возникают весьма часто при реализации автоматического управления автономными МР. Учет только кинематических свойств МР в рассматриваемом случае не приводит к успеху, поэтому приходится использовать уравнения движения, построенные на основе динамической модели МР.

Кинематическая и динамическая модели колесного МР. Рассмотрим результаты, полученные в работах [6–8]. На рис. 2 приведена

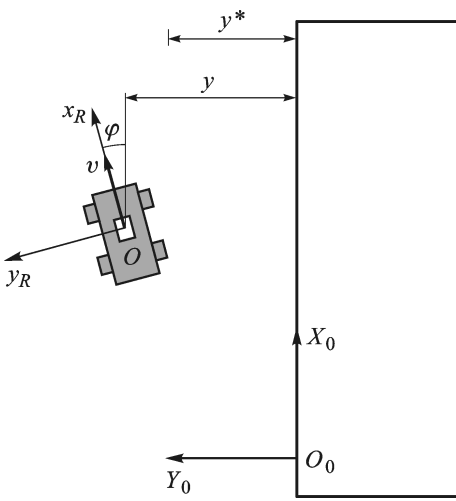


Рис. 2. Схема движения робота вдоль непрерывного тротуара

схема движения колесного МР с соответствующими системами координат. Учитывая динамические свойства робота, а также наличие исполнительской системы [8], получим уравнения движения МР. Считаем, что исполнительская система МР представляет собой два электромеханических привода, выполненных на базе двигателей постоянного тока, каждый из которых приводит в движение ведущие колеса правого и левого бортов шасси транспортного средства МР. Тогда уравнения, связывающие компоненты фазового вектора с управляющими напряжениями, можно записать следующим образом:

$$\begin{aligned}
 \dot{x} &= v \cos \varphi; \\
 \dot{y} &= v \sin \varphi, \\
 \dot{\varphi} &= \omega; \\
 \dot{v} &= -b\omega^2 + \frac{1}{\rho m}(\tau_L + \tau_R); \\
 \dot{\omega} &= \frac{bm\omega v}{i_z} + \frac{W}{2\rho i_z}(\tau_R - \tau_L); \\
 \dot{\tau}_L &= -\frac{R_M}{2L}\tau_L - \frac{i_p^2 k_M k_{TG} k_y}{L\rho} \left(v - \frac{\omega W}{2} \right) + \frac{i_p k_M k_y}{L} U_L; \\
 \dot{\tau}_R &= -\frac{R_M}{2L}\tau_R - \frac{i_p^2 k_M k_{TG} k_y}{L\rho} \left(v + \frac{\omega W}{2} \right) + \frac{i_p k_M k_y}{L} U_R,
 \end{aligned} \tag{1}$$

где b — координата центра масс платформы, лежащего на оси симметрии; m — масса робота; W — расстояние между центрами ведущих колес; i_z — момент инерции платформы относительно вертикальной оси Z_R ; ρ — радиус колеса; R_M — сопротивление обмотки якоря исполнительного двигателя; i_p — передаточное отношение редуктора; k_M — коэффициент, связывающий ток и развиваемый двигателем момент; k_{TG} — коэффициент передачи тахогенератора; k_y — коэффициент усилителя мощности; L — индуктивность обмотки якоря; U_R, U_L — напряжения, подаваемые на обмотку якоря.

Соотношения (1) представляют собой систему нелинейных дифференциальных уравнений седьмого порядка с фазовым вектором

$(x, y, \varphi, v, \omega, \tau_R, \tau_L)^T$ и вектором управления $(U_R, U_L)^T$. При этом угловые скорости правого (ω_R) и левого (ω_L) колес, угловая ω и линейная v скорости робота связаны следующими соотношениями (линейной скоростью робота мы называем скорость начала связанной системы координат):

$$\omega_R = \frac{1}{\rho} \left(v + \frac{\omega W}{2} \right);$$

$$\omega_L = \frac{1}{\rho} \left(v - \frac{\omega W}{2} \right).$$

Примем следующий способ формирования управляющих напряжений, подаваемых на приводы ведущих колес МР:

$$U_R = U_d + U_\varphi;$$

$$U_L = U_d - U_\varphi, \quad (2)$$

где $U_d = \text{const}$ — напряжение, обеспечивающее заданную линейную скорость движения МР; U_φ — напряжение, управляющее угловой скоростью движения МР.

Запишем следующий закон управления:

$$U_\varphi = -k_1\varphi + k_2(-y + y^*), \quad (3)$$

где k_1, k_2 — некоторые параметры; φ — угол между продольной осью робота и направлением вдоль тротуара; y^* и y — желаемая и текущая координаты тротуара в собственной системе координат. Параметры y и φ определяются по сканам, получаемым от 3D лазерного дальномера.

Сделаем теперь следующие предположения. Считаем, что при движении МР на плоскости вдоль гладкой программной траектории управляющие моменты ведущих колес, развиваемые электродвигателями, изменяются незначительно (это допущение часто используют при исследовании электромеханических систем), т.е. $\dot{\tau}_R = \dot{\tau}_L = 0$. Это допущение позволяет понизить до пятого порядок системы.

С учетом сказанного и соотношений (2) и (3) дифференциальные уравнения для моментов правого (τ_R) и левого (τ_L) ведущих колес МР системы (1) можно записать следующим образом:

$$\dot{\tau}_L = -\frac{R_M}{2L}\tau_L - \frac{i_p^2 k_M k_{\Gamma} k_y}{L\rho} \left(v - \frac{\omega W}{2} \right) + \frac{i_p k_M k_y}{L} (U_d + k_1\varphi + k_2y - k_2y^*) = 0;$$

$$\dot{\tau}_R = -\frac{R_M}{2L}\tau_R - \frac{i_p^2 k_M k_{\Gamma} k_y}{L\rho} \left(v + \frac{\omega W}{2} \right) + \frac{i_p k_M k_y}{L} (U_d - k_1\varphi - k_2y + k_2y^*) = 0.$$

Введем обозначения

$$\mu = \frac{2i_p^2 k_M k_{T\Gamma} k_y}{R_M \rho} \quad (4)$$

и

$$\delta = \frac{2i_p k_M k_y}{R_M}, \quad (5)$$

учитывая которые, получаем выражения

$$\tau_R + \tau_L = -2\mu v + 2\delta U_d;$$

$$\tau_R - \tau_L = -\mu\omega W + 2\delta(-k_1\varphi - k_2y + k_2y^*).$$

Тогда уравнения управляемого объекта примут следующий вид:

$$\dot{x} = v \cos \varphi;$$

$$\dot{y} = v \sin \varphi;$$

$$\dot{\varphi} = \omega; \quad (6)$$

$$\dot{v} = -b\omega^2 - Av + BU_d;$$

$$\dot{\omega} = C\omega v - D\omega - Ek_1\varphi - Ek_2y + Ek_2y^*,$$

где

$$A = \frac{2\mu}{\rho m}, \quad B = \frac{2\delta}{\rho m}, \quad C = \frac{bm}{i_z},$$

$$D = \frac{W^2\mu}{2\rho i_z}, \quad E = \frac{W\delta}{\rho i_z}.$$

Соотношения (6) представляют собой систему нелинейных дифференциальных уравнений пятого порядка, описывающих движение МР на плоскости под действием напряжений U_R, U_L , подаваемых на якорные обмотки двигателей правого и левого бортов и формируемых в соответствии с соотношениями (2) и (3).

Задача состоит в том, чтобы определить φ, y и выбрать параметры k_1, k_2 , обеспечивающие приемлемое качество траектории движения МР вдоль тротуара.

Выбор параметров k_1, k_2 , входящих в закон управления. Полученные уравнения движения МР представляют собой систему нелинейных дифференциальных уравнений пятого порядка, что значительно осложняет задачу дальнейшего анализа и выбора необходимых коэффициентов k_1, k_2 для реализации алгоритма управляющего напряжения U_φ . Поэтому для выбора коэффициента k_1, k_2 проведем линеаризацию уравнений движения так, чтобы можно было использовать классические методы анализа линейных стационарных систем.

В качестве программной траектории выберем $x^*(t) = v_c t, y^*(t) = y^*, \varphi^*(t) = 0, v^*(t) = v_c, \omega^*(t) = 0$, т.е. равномерное и прямолинейное движения робота параллельно тротуару.

Тогда уравнения в отклонениях относительно программной траектории будут иметь вид

$$\begin{aligned} \Delta \dot{x} &= \Delta v; \\ \Delta \dot{y} &= v_c \Delta \varphi; \\ \Delta \dot{\varphi} &= \Delta \omega; \\ \Delta \dot{v} &= -A \Delta v; \\ \Delta \dot{\omega} &= -E k_2 \Delta y - E k_1 \Delta \varphi - D \Delta \omega. \end{aligned} \quad (7)$$

Видно, что систему (7) можно разбить на две независимые подсистемы: одна относительно вектора $(\Delta x, \Delta v)^T$, другая — относительно вектора $(\Delta y, \Delta \varphi, \Delta \omega)^T$. Отметим вторую подсистему, в которую входят параметры k_1, k_2 .

Соответствующий характеристический многочлен $f(\lambda)$ имеет следующий вид:

$$f(\lambda) = \lambda^3 + D \lambda^2 + E k_1 \lambda + E k_2 v_c. \quad (8)$$

Проанализируем зависимость расположения корней от коэффициентов k_1, k_2 , воспользовавшись критерием Гурвица, в соответствии с которым необходимым и достаточным условиями расположения корней характеристического уравнения в левой полуплоскости являются положительные значения главных миноров матрицы Гурвица:

$$H = \begin{vmatrix} D & E k_2 v_c & 0 \\ 1 & E k_1 & 0 \\ 0 & D & E k_2 v_c \end{vmatrix}$$

$$\Delta_1 = D > 0;$$

$$\Delta_2 = D E k_1 - E k_2 v_c > 0;$$

$$\Delta_3 = E k_2 v_c (\Delta_2) > 0.$$

Полученные соотношения приводят к неравенству

$$0 < \frac{k_2 v_c}{D} < k_1. \quad (9)$$

Отметим, что для типового мобильного робота [1] со значениями параметров $m = 30$ кг, $i_z = 4,2$ кг·м², $\mu = 56,7$, $\delta = 4,4$, $W = 500$ мм, $\rho = 87$ мм, $b = 0$ имеем $A = 43,4483$; $B = 3,3716$; $C = 0$; $D = 19,3966$; $E = 6,02$.

Исследуем теперь случай, когда переходный процесс имеет аperiодический характер, т.е. корни характеристического уравнения (8) не только лежат в левой полуплоскости, но еще и действительны.

Запишем соотношение коэффициентов кубического уравнения (8), при выполнении которого все три корня действительны [9]:

$$\frac{p^3}{27} + \frac{q^2}{4} \leq 0, \quad (10)$$

где

$$p = -\frac{b^2}{3a^2} + \frac{c}{a},$$

$$q = \frac{2b^3}{27a^3} - \frac{bc}{3a^2} + \frac{d}{a},$$

$$a = 1, \quad b = D, \quad c = Ek_1, \quad d = Ek_2v_c.$$

Тогда одновременное выполнение условий (9), (10) позволяет выделить область значений параметров k_1, k_2 , обеспечивающих аperiодический переходный процесс.

На рис. 3 показана плоскость параметров k_1, k_2 . В области 1 система (в приращениях) неустойчива, в области 2 — переходный процесс имеет колебательный характер, а в области 3 — аperiодический. Безусловно, полученный результат имеет приближенный характер, поскольку мы рассматривали систему в малых отклонениях от программной траектории.

Определение параметров φ, y , входящих в закон управления.

Как было отмечено ранее, робот, оснащенный лазерным дальнометром, движется по плоской дороге, получая в каждый момент времени

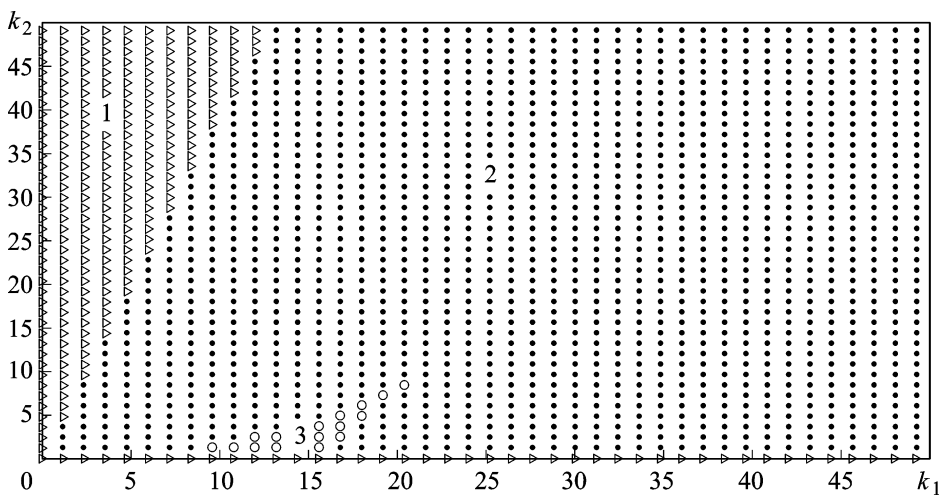


Рис. 3. Области значений параметров k_1, k_2 , при которых траектория движения МР неустойчива (1), имеет колебательный (2) и аperiодический (3) характер

изображения — сечение рельефа в плоскости дороги, тротуара и парапета. Необходимо определить угол φ и расстояние y между роботом и тротуаром по данным лазерного дальномера.

Угол и расстояние между роботом и тротуаром вычисляются в результате определения линии пересечения плоскостей дороги, тротуара и парапета каждым сканом дальномера относительно координат дальномера в процессе движения робота. Приведем уравнения линий пересечения дороги L_{ld} , тротуара L_{lt} и парапета L_{lh} , связанные с функцией сечения дальномера:

$$\begin{aligned} L_{ld} &= \sin \beta X_l - h = 0; \\ L_{lt} &= \sin \beta X_l - h + h_t = 0; \\ L_{lh} &= \sin \varphi \cos \beta X_l + \cos \varphi Y_l + y = 0, \end{aligned} \quad (11)$$

где β — угол отклонения плоскости скана от горизонтальной плоскости; h — расстояние от центра координат робота до дороги; h_t — высота тротуара; φ — угол между продольной осью робота и направлением вдоль тротуара; y — получаемое расстояние между роботом и тротуаром. На рис. 4 показано движение МР вдоль тротуара.

Ранее были получены выражения, описывающие линию пересечения плоскости дальномера с видимым рельефом в системе координат, связанной с дальномером, и определены зависимости угла поворота робота и расстояния между ним и тротуаром от вида полученной линии.

На рис. 5 показаны схемы движения робота вдоль непрерывного тротуара. Угол наклона отрезка AB , а также координаты его конечных точек позволяют легко вычислить параметры φ, y , входящие в

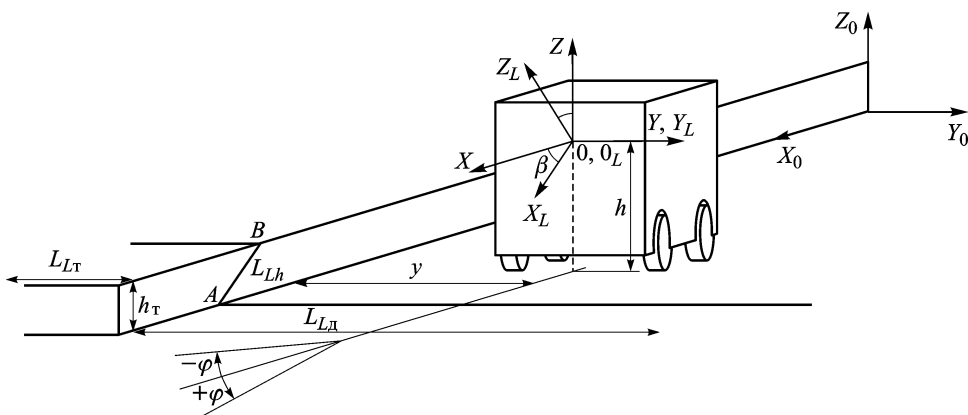


Рис. 4. Схема движения МР вдоль тротуара

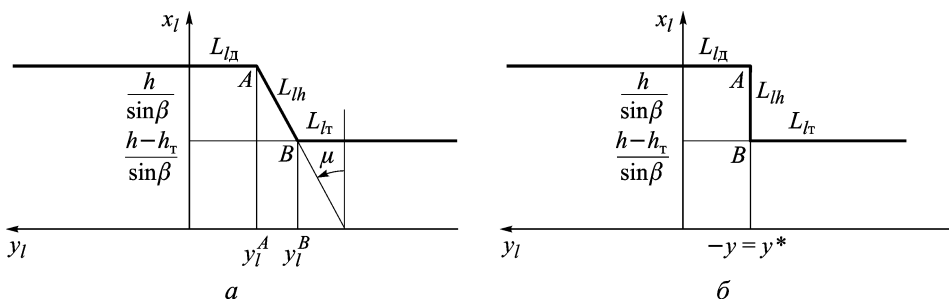


Рис. 5. Движение робота вдоль разрывного тротуара

выражение для закона управления (3):

$$\varphi = -\frac{1}{\cos \beta} \operatorname{tg} \mu; \quad y = \frac{\cos \varphi (k_b Y_l^A - k_a Y_l^B)}{k_a - k_b}, \quad (12)$$

где $k_a = h \operatorname{ctg} \beta$, $k_b = (h - h_t) \operatorname{ctg} \beta$.

Рассмотрим алгоритм управления роботом в случае движения вдоль разрывного тротуара (рис. 6). В каждый момент времени от 3D дальномера на борту получаем набор сканов, имеющих разные углы в вертикальной плоскости и, следовательно, в разных точках пересекающих тротуар. В том случае, когда робот должен миновать разрыв в тротуаре (например, перекресток), необходимо выбрать ближайший скан, которому соответствуют приемлемые значения параметров φ и y из (12).

Экспериментальные исследования. Для реализации закона управления угловой скоростью движения автономного МР в форме (3) необходимо выбрать значения параметров управления k_1, k_2 , для чего выполним компьютерное моделирование движения МР на динамической модели, описываемой системой линейных дифференциальных уравнений (7). Проверку полученного результата проведем путем мо-

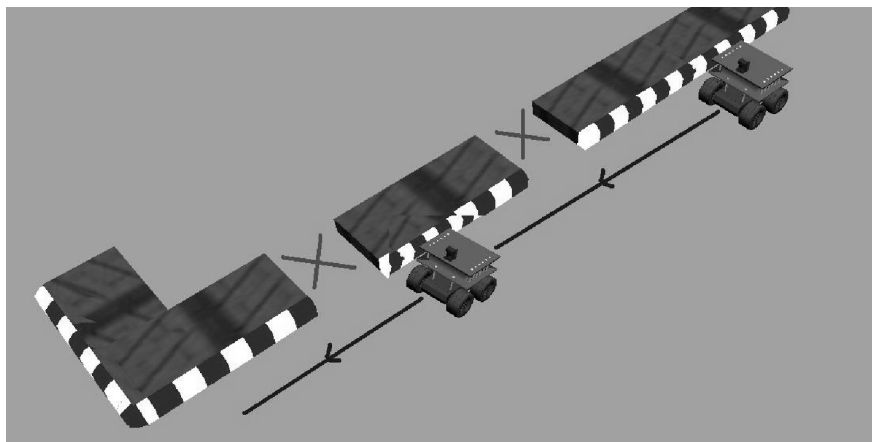


Рис. 6. Движение МР под некоторым углом и параллельно вдоль разрывного тротуара в системе координат дальномера x_l, y_l, z_l

делирования движения МР на нелинейной динамической модели, описываемой системой дифференциальных уравнений (6).

Были выбраны следующие начальные условия: $x(0) = 0$; $y(0) = 1,5$; $\varphi(0) = 0,345$ рад; $\omega(0) = 0$; $v(0) = 0$; $U_L(0) = U_R(0) = 0$, т.е. робот неподвижен, находится на расстоянии 1,5 м от тротуара с ориентацией 20° . В качестве программной траектории запишем

$$x^*(t) = v_c t, y^*(t) = 1, \varphi^*(t) = 0, v^*(t) = v_c, \omega^*(t) = 0.$$

Рассмотрим движение системы при $k_1 = 15$, $k_2 = 2$. Результаты сравнения параметров движения при использовании нелинейной и линеаризованной моделей приведены на рис. 7, из которых следует,

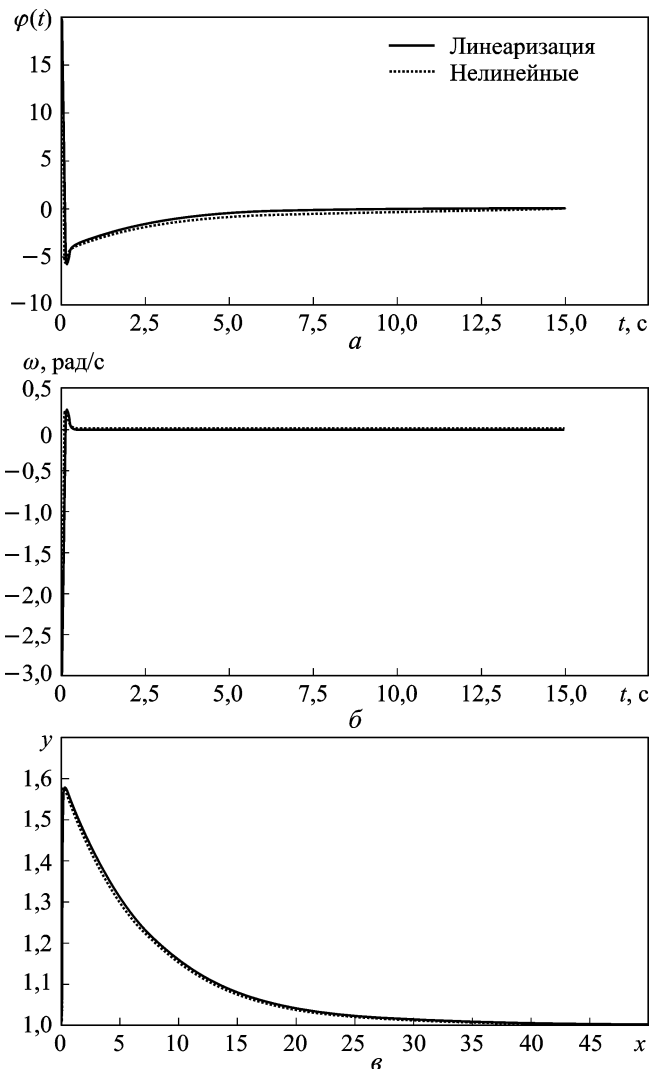


Рис. 7. Изменение угловых параметров движения $\varphi(t)$ (а) и $\omega(t)$ (б), а также координат $x(t)$ и $y(t)$ (в) при использовании линеаризованной (сплошная кривая) и нелинейной (штриховая) моделей МР

что при выбранных значениях параметров k_1, k_2 , лежащих в области 2 (см. рис. 3), переходные процессы имеют аperiodический характер и для нелинейной (штриховая кривая) и линеаризованной (сплошная кривая) моделей отличаются незначительно.

Выводы. Предложен способ управления колесным МР при его движении в городских условиях вдоль прямолинейного тротуара. В качестве сенсорной системы использован 3D лазерный сканирующий дальномер, поставляющий в систему управления робота информацию о дальности до объектов внешней среды, находящихся в передней полусфере. Рассмотрен метод выбора значений параметров закона управления, обеспечивающих аperiodический характер переходного процесса при движении робота вдоль тротуара. Учтены динамические свойства объекта управления, а также параметры приводов. Выделены три области значений параметров, при которых траектория движения вдоль тротуара неустойчива и имеет аperiodический или колебательный характер. Полученные результаты позволяют найти первые приближения значений параметров закона управления. Приведены результаты вычислительного эксперимента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зенкевич С. Л., Космачев П. В. Управление движением мобильного робота в неподвижную точку // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2010. – № 3. – С. 55–60.
2. Носков В. П., Рубцов И. В. Опыт решения задачи автономного управления движением мобильных роботов // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2005. – № 12. – С. 16–24.
3. Официальная страница соревнований «Grand Challenge» [электронный ресурс] <http://www.darpa.mil/GRANDCHALLENGE/>
4. Официальная страница соревнований «Робокросс Селигер-2010» [электронный ресурс] <http://www.robosport.ru>
5. Зенкевич С. Л., Минин А. А., Све Лин Хту Аунг. Еще одно решение задачи построения 3D-карты // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2010. – № 6. – С. 55–61.
6. Девянин Е. А. О движении колесных роботов // Труды конф. “Мобильные роботы и мехатронные системы”. – М., 1998. – С. 169–200.
7. Кобрин А. И., Мартыненко Ю. Г. Неголономная динамика мобильных роботов и ее моделирование в реальном времени // Труды конф. “Мобильные роботы и мехатронные системы”. – М., 1998. – С. 107–123.
8. Зенкевич С. Л., Назарова А. В. Система управления мобильного робота // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. – 2006. – № 3. – С. 31–51.
9. Формула Кардано [электронный ресурс] http://ru.wikipedia.org/wiki/Формула_Кардано

Статья поступила в редакцию 24.09.2010

Све Лин Хту Аунг родился в 1980 г. (Союз Мьянма). Аспирант кафедры “Робототехнические системы” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Степень магистра защитил в МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2007 г. Автор трех научных работ в области систем автоматизированного управления робототехническими системами.

Swe Lin Htoo Aung (b. 1980), Union of Myanmar. Master’s degree was defended in the Bauman Moscow State Technical University in 2007. Post-graduate of “Robotic Systems” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 3 publications in the field of systems of automated control of robotic systems.