

СИНТЕЗ ГЕНЕРАТОРА ЗАДАЮЩИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ ДЛЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МОБИЛЬНЫМ РОБОТОМ

Кокунько Ю. Г.¹

(ФГБУН Институт проблем управления
им. В.А. Трапезникова РАН, Москва)

При планировании пути следования автономного колесного робота возникают такие проблемы, как обеспечение безопасности движения, гладкости и ограниченности кривизны пути и скорости ее изменения с учетом проектных ограничений робота как механического объекта управления. Совместное решение этих проблем может привести к громоздким аналитическим расчетам, нереализуемым в реальном времени. В данной работе предлагается упростить и автоматизировать генерацию плоских путей для колесного робота, совмещающую решение указанных проблем. На первом этапе строится примитивный путь в виде плоской ломаной, отрезки которой соединяют опорные точки маршрута и обеспечивают безопасное выполнение рабочего сценария. На втором этапе решается проблема сглаживания сочленений ломаной без использования геометрических расчетов. Для этого предлагается использовать динамический генератор с использованием уравнений движения центра масс колесной платформы. При синтезе корректирующих воздействий генератора, имитирующих управляющие воздействия робота, используется метод декомпозиции и S-образные гладкие и ограниченные нелинейные обратные связи, что позволяет выполнить проектные ограничения робота на скорость, ускорение и управляющие моменты. Поэтому выходные переменные генератора, имитирующие координаты центра масс робота, будут порождать сглаженный естественным образом путь с допустимой кривизной при отслеживании координат опорного негладкого маршрута. Разработанные алгоритмы сглаживания не требуют сложных геометрических построений и специальных вычислительных ресурсов, их можно использовать и на этапе планирования, и в реальном времени на бортовом компьютере.

Ключевые слова: колесный робот, реализуемая траектория, динамический генератор, проектные ограничения, сигма-функция.

1. Введение

На современных производствах, как в гражданских, так и военных отраслях, все активней используются беспилотные

¹ Юлия Георгиевна Кокунько, м.н.с. (juliakokunko@gmail.com).

транспортные средства. Базовой задачей при интегрировании мобильного робота в конкретный процесс является планирование пути следования. Факторы, влияющие на выбор тех или иных математических методов для планирования движения, обусловлены миссией робота или группы роботов и особенностями решаемых прикладных задач. К наиболее распространенным факторам относятся: подход к построению пути (локальный или глобальный); геометрическое представление перемещаемого объекта (твердое тело или кинематическая конструкция); свойства окружения (статические или динамические); свойства конфигурационного пространства (равномерное распределение допустимых состояний или наличие узких областей); характер запросов планирования (однократный или многократный); комплектность и возможности сенсорной системы, мощность вычислительных ресурсов бортовой информационно-управляющей системы, используемые методы автоматического управления движением и др. [7, 21].

В данной работе объектом исследования является беспилотная колесная платформа, которая рассматривается как механический объект автоматического управления. Для проектирования законов управления мобильным роботом, как правило, требуется полное аналитическое описание задающих воздействий (т.е. кривой движения в связанной с роботом системе координат) для того, чтобы можно было найти их производные старших порядков, в частности первую и вторую производные, знание которых в большинстве случаев необходимо для синтеза обратной связи [2, 5–6, 8–10, 13, 19]. Учитывая, что мобильный механизм не может изменять скорость и направление движения мгновенно, также требуется обеспечить гладкость и допустимую кривизну заданного пути следования на этапе планирования: маршрут должен быть не только безопасным, но и реализуемым.

Для аналитического описания пути следования используют различные интерполяционные алгоритмы, в частности, кубические *B*-сплайны, которые позволяют формировать гладкие кривые различной формы [2, 8–9, 11–13, 15–16, 18]. Однако формирование сложных составных маршрутов с обеспечением всех

ограничений, продиктованных механической природой объекта управления, требует большого объема вычислений, не всегда выполнимых в реальном времени.

Цель данной работы состоит в том, чтобы упростить и автоматизировать сглаживание опорного примитивного маршрута, который представляет собой набор контрольных точек полигона, соединенных отрезками, и отвечает требованиям безопасности [17]. Координаты этой ломаной рассматриваются как задающие воздействия для виртуального робота. Виртуальный робот – это динамический генератор, который построен в виде уравнений движения центра масс колесной платформы с обратной связью. Использование блочного подхода и S -образных гладких и ограниченных корректирующих воздействий позволит автоматически учитывать проектные ограничения механической системы на скорости и ускорения [1, 14]. Поэтому при отслеживании опорной ломаной переменные генератора на выходе будут порождать гладкие кривые, которые, в свою очередь, будут являться реализуемыми задающими воздействиями для реального мобильного робота.

Функционирование динамического генератора не требует аналитического описания опорного сигнала и позволяет автоматически учитывать ограничения не только на управления, но и на скорости, что выгодно отличает данный подход от существующих аналогов [2, 8–9, 13]. Предлагаемые алгоритмы сводятся к численному интегрированию системы обыкновенных дифференциальных уравнений, не требуют длительного машинного времени, дополнительных геометрических расчетов и могут быть выполнены в реальном времени в информационно-управляющей системе робота.

Статья имеет следующую структуру. Описание кинематической модели колесного робота как основы для построения динамического генератора приводится в разделе 2. Декомпозиционный синтез динамического генератора с учетом проектных ограничений мобильного робота представлен в разделе 3. Результаты имитационного моделирования, подтверждающие эффективность разработанного подхода, представлены в разделе 4.

2. Кинематическая модель колесного робота

В качестве объекта управления рассматривается беспилотная колесная платформа. За основу для построений мы принимаем уравнения движения ее центра масс в неподвижной системе декартовых координат Ox [2, 8, 20]:

$$(1) \quad \begin{aligned} \dot{x} &= v \cos \theta, \\ \dot{y} &= v \sin \theta, \\ \dot{\theta} &= v u_1, \\ \dot{v} &= u_2; \end{aligned}$$

где x , y – координаты центра масс платформы (выходные переменные); v – ее линейная скорость, предполагается, что в режиме работы $v \neq 0$; θ – угол между осью Ox и центральной линией платформы, которая совпадает с направлением вектора скорости (ориентация платформы относительно неподвижной системы координат); $u = (u_1, u_2)^T$ – вектор управления, его элементами являются кривизна траектории движения робота u_1 и линейное ускорение u_2 , которые, в свою очередь, регулируются управляющими моментами, развиваемыми приводами постоянного тока.

Динамика исполнительных устройств в данных построениях не учитывается. Первые три уравнения системы (1) описывают ее кинематику, последнее уравнение добавлено для учета ограничений по линейному ускорению.

Для системы (1) рассматривается задача путевой стабилизации, для решения которой закон управления в форме обратной связи, обеспечивающий вывод базовой точки на целевую (допустимую) траекторию и ее движение вдоль заданной кривой, предполагается синтезированным. Для его реализации необходимо знать значения первой и второй производных задающего воздействия, а именно, скорости и ускорения рассматриваемого объекта управления.

Для получения математической модели, имитирующей движение центра масс колесной платформы и предоставляющей информацию о первых и вторых производных выходных пере-

менных, мы представим систему (1) в каноническом виде «вход – выход» с учетом обозначений $y_1 = (y_{11} := x, y_{12} := y)^T$ [3–4]:

$$(2) \quad \begin{aligned} \dot{y}_1 &= y_2, \\ \dot{y}_2 &= Bu, \end{aligned}$$

где

$$(3) \quad \begin{aligned} y_2 &= (y_{21} := v \cos \theta; \quad y_{22} := v \sin \theta)^T, \\ B &= \begin{pmatrix} -v^2 \sin \theta & \cos \theta \\ v^2 \cos \theta & \sin \theta \end{pmatrix}, \quad \det B = -v^2 \neq 0, \\ B^{-1} &= \begin{pmatrix} -\sin \theta / v^2 & \cos \theta / v^2 \\ \cos \theta & \sin \theta \end{pmatrix}. \end{aligned}$$

В силу механической природы объекта управления (2) вводятся следующие требования: в режиме движения элементы векторов $y_2(t)$, $\dot{y}_2(t)$ и, следовательно, $u(t)$, должны быть гладкими функциями, ограниченными заданными константами:

$$(4) \quad \begin{aligned} |y_{2j}(t)| &\leq Y_2 \leq V / \sqrt{2}, \\ |\dot{y}_{2j}(t)| &\leq Y_3 \leq A / \sqrt{2}, \quad t \geq 0, \quad j = 1, 2, \\ \|y_2(t)\| &= \sqrt{y_{21}^2(t) + y_{22}^2(t)} \leq V, \\ \|\dot{y}_2(t)\| &= \sqrt{\dot{y}_{21}^2(t) + \dot{y}_{22}^2(t)} \leq A, \quad V^2 < A, \end{aligned}$$

где V, A – проектные ограничения конкретного робота на линейную скорость и ускорение, которые обусловлены конструкцией механизма и мощностью исполнительных приводов.

Проектирование динамического генератора, имитирующего движение центра масс колесной платформы (2) с учетом ограничений (4) представлено в следующем разделе.

3. Формирование реализуемых путей следования с помощью динамического генератора

Введем динамический генератор, порождающий допустимые для колесного робота кривые движения, как копию уравнений (2) в виде

$$(5) \quad \begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2, \\ \dot{x}_2 &= Bw, \end{aligned}$$

где $x_1, x_2, \dot{x}_2 \in R^2$ – векторы положения, скорости и ускорения центра масс виртуального робота, которые будут использоваться в системе управления реальным роботом в качестве задающих воздействий, $w \in R^2$ – корректирующие воздействия генератора. Цель управления системой (5) состоит в том, чтобы обеспечить выполнение ограничений (4), а именно:

$$(6) \quad \begin{aligned} |x_{2j}(t)| &\leq Y_2, \\ |\dot{x}_{2j}(t)| &\leq Y_3, t \geq 0, j = 1, 2, \end{aligned}$$

в процессе отслеживании выходными переменными генератора $x_1(t) = (x_{11}, x_{12})^T$ задающих воздействий $\chi(t) \in R^2$. Элементами вектора $\chi = (\chi_1, \chi_2)^T$ являются координаты опорного пути в неподвижной системе декартовых координат. Они могут быть заданы в аналитическом виде или в виде непрерывных детерминированных сигналов, поступающих в информационно-управляющую систему из автономного источника. Предполагается, что составленный в первом приближении опорный путь отвечает требованиям безопасности, но не является гладким. В простейшем случае он представляет собой набор контрольных точек полигона, соединенных прямыми линиями. Точки сочленений отрезков ломаной являются особыми, в них элементы вектора $\dot{\chi} = (\dot{\chi}_1, \dot{\chi}_2)^T$ имеют конечные разрывы. В общем случае текущие значения $\dot{\chi}(t)$ могут быть не известны, но являются ограниченными:

$$(7) \quad |\dot{\chi}_j(t)| \leq X_2 < Y_2, t \geq 0, j = 1, 2.$$

Более конкретные требования к ограничениям X_2 , которые надо обеспечить на этапе планирования первичного пути, будут сформулированы по ходу изложения.

Корректирующие воздействия генератора (5) имитируют управляющие воздействия исходной системы (2), которые одновременно являются задающими воздействиями для исполнительных приводов. Поэтому мы должны выбрать $w(t)$ из класса

гладких и ограниченных функций с ограниченными производными. Этим требованиям удовлетворяют S -образные нелинейные функции, такие как арктангенс, гиперболический тангенс, логистическая функция и т.п. Для данной задачи мы выбрали сигма функцию $\sigma(x) = -\text{th}(-x/2)$ [1, 14]. Для масштабирования сигма-функции мы вводим множитель $k = \text{const} > 0$ для ее аргумента, а именно:

$$(8) \quad |\dot{\chi}_j(t)| \leq X_2 < Y_2, t \geq 0, j = 1, 2.$$

В дальнейших вычислениях k играет роль большого коэффициента (коэффициента усиления) в малой окрестности нуля. Сигма функция определена на всей числовой оси, она гладкая, ограниченная $|\sigma(kx)| < 1$ и имеет ограниченную производную $\sigma'(kx) = 0,5k(1 - \sigma^2(kx))$, $0 < \sigma'(kx) \leq 0,5k, x \in R$.

Мы предлагаем использовать сигма функцию (8) не только в корректирующих воздействиях генератора, но и в локальной связи для того чтобы выполнить заданные ограничения по скорости изменения выходных переменных (6).

Введем ошибку слежения $e_1 = x_1 - \chi$, $e_1 = (e_{11}, e_{12})^T$, ее производную $\dot{e}_1 = x_2 - \dot{\chi}$, сигмоидальную локальную связь $x_2 = -m_1\sigma(k_1e_1)$, $\sigma(k_1e_1) = (\sigma(k_1e_{11}), \sigma(k_1e_{12}))^T$, $m_1, k_1 = \text{const} > 0$ и невязку

$$(9) \quad e_2 = x_2 + m_1\sigma(k_1e_1), e_2 = (e_{21}, e_{22})^T.$$

Представим систему (5) в координатном базисе ошибки слежения и невязки (9):

$$(10) \quad \dot{e}_2 = x_2 + m_1\sigma(k_1e_1), e_2 = (e_{21}, e_{22})^T,$$

где

$$(11) \quad A_j = \text{diag}(A_{1j}), A_{1j} = 1 - \sigma^2(k_1e_{1j}), 0 < A_{1j} \leq 1, j = 1, 2.$$

Сформировав в системе (10) сигмоидальные корректирующие воздействия в виде

$$(12) \quad w = -B^{-1}(m_2\sigma(k_2e_2) + 0,5m_1k_1A_1x_2), \\ m_2, k_2 = \text{const} > 0, \sigma(k_2e_2) = (\sigma(k_2e_{21}), \sigma(k_2e_{22}))^T,$$

получим замкнутую виртуальную систему в терминах ошибок слежения и невязок:

$$(13) \quad \begin{aligned} \dot{e}_1 &= -m_1\sigma(k_1e_1) + e_2 - \dot{\chi}, \\ \dot{e}_2 &= -m_2\sigma(k_2e_2) - 0,5m_1k_1\Lambda_1\dot{\chi}. \end{aligned}$$

В малой окрестности нуля сигма-функция близка к линейной функции, а на бесконечности она стремится к функции знака, поэтому ее можно ограничить снизу кусочно-линейной функцией

$$(14) \quad m_i |\sigma(k_i e_{ij})| \geq \begin{cases} 0,8m_i, & |e_{ij}| > \Delta_i, & i = 1, 2, \quad j = 1, 2, \\ 0,8m_i k_i |e_{ij}| / 2,2, & |e_{ij}| \leq 2,2 / k_i \leq \Delta_i, \end{cases}$$

точка разделения $\sigma(2,2) \approx 0,8$ принята для удобства вычислений из интервала $k_i \Delta_i = 2,2 \in [1,3; 3]$, где $\pm 1,3$ – абсциссы точек перегиба первой производной, ± 3 – абсциссы вершин сигма-функции, в которых ее кривизна достигает максимального значения.

В системе (13) производную задающего воздействия $\dot{\chi}(t)$ будем трактовать как внешнее ограниченное по модулю возмущение (7). Амплитуды m_1 и m_2 сигмоидальных управлений должны выбираться таким образом, чтобы обеспечить инвариантно по отношению к возмущению последовательное попадание невязки (9) и ошибки слежения в некоторые окрестности нуля:

$$(15) \quad \begin{aligned} |e_{2j}(t)| &\leq 2,2 / k_2 \leq \Delta_2, t > t_2 \geq 0; \\ |e_{1j}(t)| &\leq 2,2 / k_1 \leq \Delta_1, t > t_1 \geq t_2, j = 1, 2. \end{aligned}$$

Радиусы областей (14) – это, по сути, точность стабилизации ошибки слежения и невязки, которая зависит от больших коэффициентов k_1 и k_2 . Для анализа достаточных условий устойчивости системы в терминах ошибок слежения и невязок (13) мы используем функцию Ляпунова $V_2 + V_1$, $V_i = 0,5e_i^T e_i$, $i = 1, 2$. Составим ее производную в силу системы (13) и оценим полученные слагаемые с учетом (11), (13) вне областей (14):

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 + \dot{V}_1 &= e_2^T (-m_2 \sigma(k_2 e_2) - 0,5m_1 k_1 \Lambda_1 \dot{\chi}) + \\ &+ e_1^T (-m_1 \sigma(k_1 e_1) + e_2 - \dot{\chi}) \leq \\ &\leq \sum_{j=1}^2 (|e_{2j}| (0,5m_1 k_1 |\dot{\chi}_j| - 0,8m_2) + |e_{1j}| (|e_{2j}| + |\dot{\chi}_j| - 0,8m_1)). \end{aligned}$$

Отсюда следует, что верхнее, а затем и нижнее неравенства (15) будут выполнены при любых начальных значениях переменных системы (13), если

$$(16) \quad 0,5m_1 k_1 X_2 < 0,8m_2, \quad 2,2/k_2 + X_2 < 0,8m_1.$$

Заметим, что в системе управления мобильным роботом динамический генератор будет спроектирован в виде замкнутой системы (5), (12):

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2, \\ (17) \quad \dot{x}_2 &= -m_2 \sigma(k_2(x_2 + m_1 \sigma(k_1(x_1 - \chi)))) - \\ &- 0,5m_1 k_1 \begin{pmatrix} 1 - \sigma^2(k_1(x_{11} - \chi_1)) & 0 \\ 0 & 1 - \sigma^2(k_1(x_{12} - \chi_2)) \end{pmatrix} x_2, \end{aligned}$$

а виртуальная система (13) была введена для анализа устойчивости ошибок слежения. Выбор амплитуд, удовлетворяющих (16), обеспечит выполнение (15) при $t \geq 0$, если $|e_{ij}(0)| \leq 2,2/k_i$, $i = 1, 2, j = 1, 2$. Мы можем обеспечить такие начальные значения в виртуальной системе в терминах ошибок слежения и невязок (13) путем установки подходящих начальных значений в генераторе (17), например:

$$\begin{aligned} x_{1j}(0) = \chi_j(0) &\Rightarrow e_{1j}(0) = 0, \\ (18) \quad |x_{2j}(0)| \leq 2,2/k_2 &\Rightarrow |e_{2j}(0)| \leq 2,2/k_2, \quad j = 1, 2. \end{aligned}$$

Тогда в полученной замкнутой системе в исходных терминах генератора (17) в силу (9) гарантируется ограниченность скорости и ускорения:

$$\begin{aligned} |x_{2j}(t)| &\leq 2,2/k_2 + 0,8m_1, \\ (19) \quad |\dot{x}_{2j}(t)| &\leq m_2 + 0,5m_1 k_1 (2,2/k_2 + 0,8m_1), \quad j = 1, 2, t \geq 0. \end{aligned}$$

Для корректного выбора допустимых параметров сигмоидальной обратной связи проведем совместный анализ получен-

ных нижних оценок (16) и верхних ограничений (6) с учетом неравенств (19):

$$(20) \begin{cases} 2,2/k_2 + X_2 < 0,8\bar{m}_1 \leq Y_2 - 2,2/k_2, \\ 0,625m_1k_1X_2 < m_2 \leq Y_3 - 0,5m_1k_1Y_2, Y_2^2 < Y_3. \end{cases}$$

Пусть \bar{k}_2 – это максимальное допустимое значение большого коэффициента k_2 , определяемое проектными ограничениями на управляющие моменты исполнительных приводов. Для начала принимаем $k_2 = \bar{k}_2$, это значение определяет выбор начальных значений (18), предельную точность стабилизации невязки $|e_{2j}(t)| \leq 2,2/\bar{k}_2, j = 1, 2, t \geq 0$ в рамках используемого подхода и ограничения на скорость изменения опорного задающего воздействия (7) в следующем виде:

$$4,4/k_2 + X_2 < Y_2 \Rightarrow X_2 < Y_2 - 4,4/\bar{k}_2.$$

В предположении, что данные требования выполнены, на основе первого неравенства (20) принимаем конкретное значение амплитуды $m_1 = \bar{m}_1$, которое определяет максимально возможное значение большого коэффициента $0 < k_1 \leq \bar{k}_1 = 0,9Y_3 / (Y_2\bar{m}_1)$ и предельную точность стабилизации ошибки слежения $|e_{1j}(t)| \leq 2,475Y_2\bar{m}_1 / Y_3, j = 1, 2, t \geq 0$. При конкретных значениях m_1, k_1 на основе второго неравенства (20) принимаем конкретное значение амплитуды m_2 .

Таким образом, изображающая точка (x_{11}, x_{12}) динамического генератора (17)–(18) с параметрами, выбранными на основе полученных неравенств (20), порождает сглаженную опорную кривую с непрерывной ограниченной кривизной, допустимую для данного мобильного робота. Переменные генератора $x_1(t), x_2(t), \dot{x}_2(t) \in R^2$ поступают в качестве задающих воздействий в информационно-управляющую систему для формирования закона управления движением.

4. Моделирование

Для верификации разработанных алгоритмов было проведено численное моделирование на примере колесной платформы, развивающей максимальную скорость в 2,4 м/с и ускорение 6 м/с².

Динамический генератор (17) был смоделирован в системе MATLAB-Simulink, для численного интегрирования был использован метод Эйлера с шагом 0,01.

Задающее воздействие, которое представляет собой желаемую траекторию движения робота, в первом приближении задавалось в виде непрерывной, но не гладкой, плоской кривой

$$\begin{aligned}
 \chi_1 &= 0, & \chi_2 &= 2t, & t &\in [0;5); \\
 \chi_1 &= 2t - 10, & \chi_2 &= 10, & t &\in [5;10); \\
 (21) \quad \chi_1 &= 10, & \chi_2 &= 30 - 2t, & t &\in [10;15); \\
 \chi_1 &= 40 - 2t, & \chi_2 &= 0, & t &\in [15;20); \\
 \chi_1 &= 0, & \chi_2 &= 2t - 40, & t &\geq 20, & \chi_j [м], t [с].
 \end{aligned}$$

С помощью неравенств (20) были определены следующие параметры сигмоидальных корректирующих воздействий генератора:

$$(22) \quad m_1 = 2,2, \quad m_2 = 5, \quad k_1 = 1, \quad k_2 = 5.$$

На рис. 1 представлены график заданной опорной кривой (21) и точки генератора ($x_{11}(t), x_{12}(t)$) (17), (22), из которого видно, что изображающая точка сходится к заданной траектории и далее движется в малой окрестности данной кривой.

На рис. 2 соответственно представлены графики выходных переменных генератора $x_{1i}(t)$ и задающих воздействий $\chi_i(t)$ (внизу) и ошибки отслеживания $e_{1i}(t) = x_{1i}(t) - \chi_i(t)$, $i = 1,2$ (вверху).

В данном случае оценки $|e_1(t)| \leq 0,65$ [м] справедливы в переходных процессах вокруг особых точек, в то время как оценки $|e_1(t)| \leq 5 \times 10^{-6}$ [м] справедливы для рассматриваемого объекта управления в устойчивом состоянии. На основе данных графиков можно сделать об эффективной работе построенного генератора в рамках первой сформулированной ранее задачи, а именно, задачи сглаживания траектории на стыках, при этом

учитывая заданную нами точность слежения в устойчивом положении.

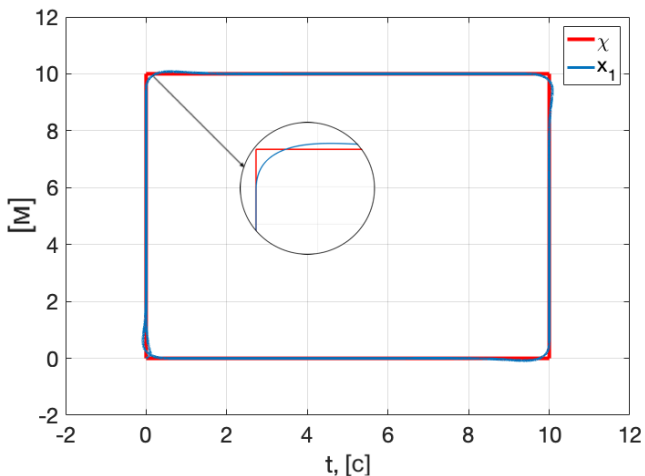


Рис. 1. График опорной кривой $\chi = (\chi_1, \chi_2)$ [м] и точки генератора $x_1(t) = (x_{11}(t), x_{12}(t))$ [м]

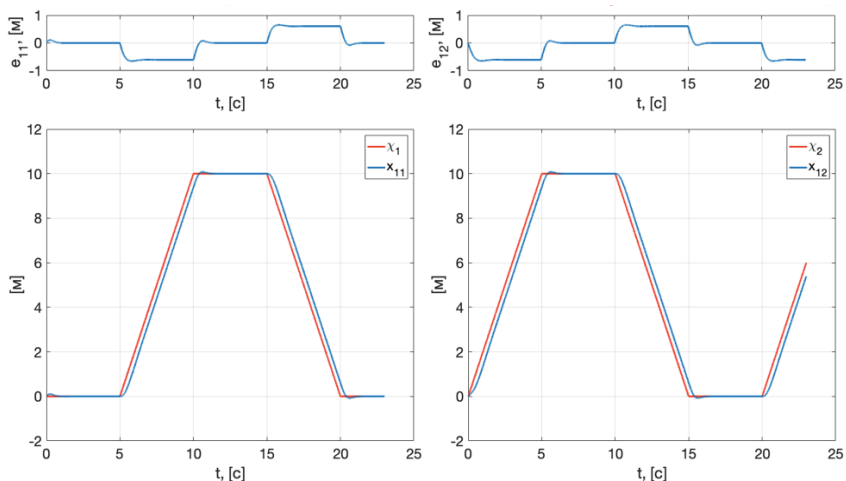


Рис. 2. График задающих воздействий $\chi_i(t)$, переменных генератора $x_{1i}(t)$ и соответствующих им ошибок слежения $e_{1i}(t) = x_{1i}(t) - \chi_i(t)$, $i = 1, 2$

На рис. 3–4 для обеих координат представлены графики переменных генератора $x_2(t)$ и $\dot{x}_2(t)$ соответственно.

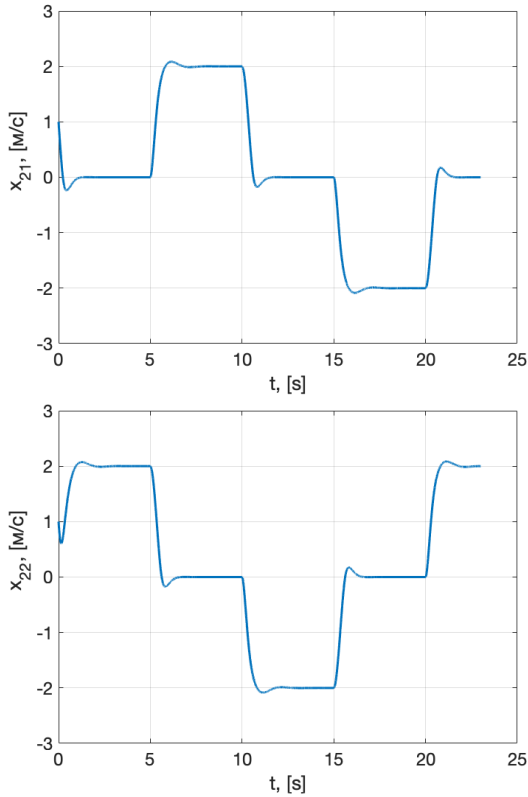


Рис. 3. График $x_2(t)$ [м/с]

Из полученных графиков (рис. 3–4) видно, что переменные генератора, имитирующие скорость и ускорение колесного робота, достигают максимального значения в $|x_2(t)| \leq 2,09$ [м/с] и $|\dot{x}_2(t)| \leq 5$ [м/с²], что подтверждает выполнение разработанным генератором второй поставленной в данной работе задачи – задачи учета проектных ограничений робота как механического объекта управления.

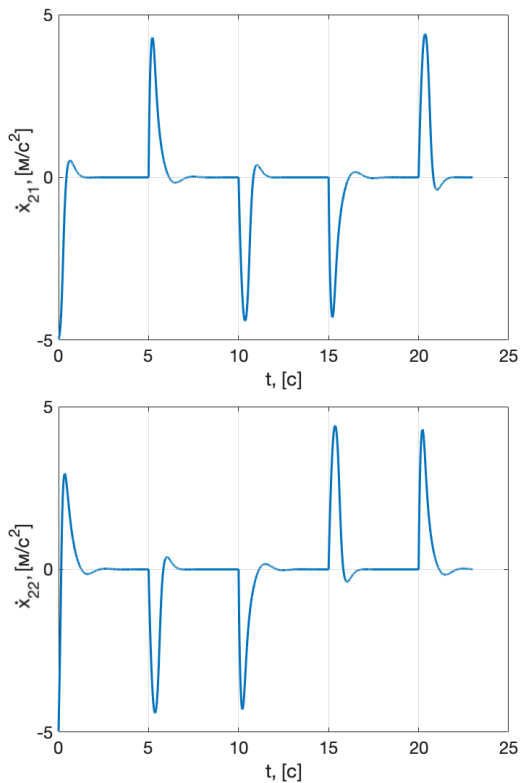


Рис. 4. График $\dot{x}_2(t)$ [м/с²]

5. Заключение

Основной результат работы – метод построения и настройки динамического генератора реализуемых путей следования, который позволяет учитывать проектные ограничения на скорость и ускорение колесной платформы на этапе синтеза и обеспечивает автоматическое сглаживание стыков опорного негладкого маршрута, составленного в первом приближении. Использование простых в реализации операций интегрирования,

избавляет от необходимости выполнять сложные геометрические расчеты на стадии планирования и, как следствие, от больших вычислительных затрат. Переменные генератора в процессе отслеживания первичного негладкого векторного сигнала в режиме реального времени порождают сглаженную траекторию, реализуемую конкретным колесным роботом, и предоставляют ограниченные командные сигналы для скорости и ускорения.

Использование разработанного подхода позволит расширить область применения стандартных методов проектирования обратных связей для решения задач путевой стабилизации и упростит процесс планирования движений. Результаты численного моделирования подтвердили эффективность разработанных алгоритмов, простых в численной реализации.

Литература

1. АНТИПОВ А.С., КРАСНОВА С.А., УТКИН В.А. *Синтез инвариантных нелинейных одноканальных систем слежения с сигмоидальными обратными связями с обеспечением заданной точности слежения* // Автоматика и телемеханика. – 2022. – №1. – С. 40–66.
2. КОЧЕТКОВ С.А., УТКИН В.А. *Метод декомпозиции в задачах управления мобильными роботами* // Автоматика и телемеханика. – 2011. – №10. – С. 86–103.
3. КРАСНОВ Д.В., УТКИН А.В. *Синтез многофункциональной системы слежения в условиях неопределенности* // Управление большими системами. – 2017. – Вып. 69. – С. 29–49.
4. КРАСНОВА С.А., УТКИН А.В. *Анализ и синтез минимально-фазовых нелинейных SISO-систем при действии внешних несогласованных возмущений* // Проблемы управления. – 2014. – №6. – С. 22–30.
5. ПЕСТЕРЕВ А.В. *Синтез стабилизирующего управления в задаче следования колесного робота вдоль заданной кривой* // Автоматика и телемеханика. – 2012. – №7. – С. 25–39.
6. ПЕСТЕРЕВ А.В., РАПОПОРТ Л.Б., ТКАЧЕВ С.Б. *Каноническое представление нестационарной задачи путевой стабилизации* // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2015. – Т. 54, №4. – С. 160–176.

7. BAUTISTA G.D., PEREZ J., MILANÉS V., NASHASHIB F. *A review of motion planning techniques for automated vehicles* // IEEE T-ITS. – 17(4) – P. 1–11.
8. BELINSKAYA Y. *Application of the covering method for trajectories design for car-like robot* // Proc. of the 14th Int. Conf. Management of Large-Scale System Development (MLSD–2021), 27–29 September 2021, Moscow, Russia.
9. BELINSKAYA YU.S., CHETVERIKOV V.N. *Covering method for point-to-point control of constrained flat system* // IFAC-Papers OnLine. – 2015. – Vol. 48(11). – P. 924–929.
10. BUSURIN V.I., YIN NAING WIN *Microoptoelectromechanical ring angular velocity transducer based on the optical tunnel effect for control system of mobile objects* // J Phys: Conf Ser. – 1333:052002.
11. FAROUKI R.T. *Pythagorean Hodograph Curves*. – Springer, 2008.
12. KANO H., FUJIOKA H. *B-Spline trajectory planning with curvature constraint* // Proc. Annual American Control Conference (ACC). – 2018. – P. 1963–1968.
13. KOCHETKOV S.A. *Mobile robot trajectory control under influence of unknown perturbation* // Mathematics in Engineering, Science and Aerospace. – 2019. – No. 10(4). – P. 725–732.
14. KOKUNKO YU., KRASNOVA S. *Synthesis of a tracking system with restrictions on UAV state variables* // Mathematics in Engineering, Science and Aerospace. – 2019. – No. 10(4). – P. 695–705.
15. LAVALLE S.M. *Planning algorithms*. – Cambridge University Press, 2006.
16. MERCY T., VAN PARYS R., PIPELEERS G. *Spline-based motion planning for autonomous guided vehicles in a dynamic environment* // IEEE TCST. – 2017. – Vol. 26(6). – P. 2182–2189.
17. MINGUEZ J., LAMIRAUX F., LAUMOND J.P. *Motion planning and obstacle avoidance* // In: Springer Handbook of Robotics, Springer International Publishing. – 2008. – P. 1177–1202.
18. SAKCSAK B., BASCETTA L., FERRETTI G., PRANDINI M. *Sampling-based optimal kinodynamic planning with motion primitives* // Autonomous Robots. – 2019. – Vol. 43(7). – P. 1715–1732.
19. SAMSON C. *Control of chained systems. Application to path following and time varying point – stabilization of mobile robots* // IEEE Trans Automat Control. – 1995. – Vol. 40(1). – P. 64–77.
20. WEBB D.J., VAN DER BERG J. *Kinodynamic RRT*: asymptotically optimal motion planning for robots with linear* // Proc. of the IEEE Int.

Conf. on Robotics and Automation – 2013 (ICRA–2013), May 6–10, 2013, Karlsruhe, Germany. – P. 5039–5046.

21. ZHOU CH., HUANG B., FRÄNTI P. *A review of motion planning algorithms for intelligent robots* // Journal of Intelligent Manufacturing. – 2022. – No. 33. – P. 387–424.

DESIGN OF A REFERENCE ACTIONS GENERATOR FOR A MOBILE ROBOT CONTROL SYSTEM

Julia Kokunko, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, (juliakokunko@gmail.com).

Abstract: Planning the path of an autonomous wheeled robot can pose problems such as ensuring motion safety, smoothness and bounded curvature of the path and its rate of change, considering the design constraints of the robot as a mechanical control object. The joint solution of these problems can lead to cumbersome analytical calculations that are not realizable in real-time. In this paper, we propose to simplify and automate the generation of planar paths for a wheeled robot, which will solve both of these problems. At the first stage, a primitive path is constructed in the form of a flat polyline. The second stage solves the problem of smoothing the articulation of the polyline. Instead of geometric calculations, a dynamic generator is designed as a copy of the equations of motion of the robot. The synthesis of the generator's correcting actions, which simulate the robot's control actions, is based on the decomposition method and S-shaped smooth and constrained nonlinear feedbacks. This ensures that the design constraints of the robot on velocity, acceleration and control torques are met, and the output variables of the generator will generate a naturally smoothed path with acceptable curvature when tracking the coordinates of the reference nonsmooth trajectory.

Keywords: wheeled robot, realizable trajectory, dynamic oscillator, design constraints, sigma function.

УДК 62.50

ББК 32.817

DOI: 10.25728/ubs.2023.101.7

*Статья представлена к публикации
членом редакционной коллегии В.М. Вишневым.*

Поступила в редакцию 30.11.2022.

Опубликована 31.01.2023.