

Нелинейная система управления мобильным роботом для обхода препятствий

А. А. Скляр¹, Г. Е. Веселов²

Южный федеральный университет

¹aasklyarov@sfedu.ru, ²gev@sfedu.ru

Аннотация. В статье демонстрируется подход к нелинейному управлению гусеничной роботизированной платформой. В качестве объекта управления выбран гусеничный мобильный робот, поскольку среди прочих наземных транспортных средств он является наиболее маневренным и предназначен для работы в условиях ограниченного пространства. Для учета нелинейных характеристик объекта управления в статье приводится математическая модель мобильного робота. В работе дается объяснение использования новых нелинейных подходов к управлению мобильными роботами, в частности, синергетической теории управления. Приводится процедура синтеза закона управления, результатом которой являются законы управления, учитывающие нелинейные свойства модели мобильного робота и обеспечивающие перемещение робота в заданную точку рабочей плоскости с осуществлением обхода заранее неизвестных препятствий.

Ключевые слова: синергетический подход; мобильный робот; аттрактор; недетерминированное препятствие; репеллер

I. ВВЕДЕНИЕ

Возможность передвижения по пересеченной местности является несомненным преимуществом для любого автономного наземного транспортного средства, особенно если решается задача маневрирования в труднодоступных районах леса или болотистой местности. К таким транспортным средствам, несомненно, относятся гусеничные платформы. Проблеме создания роботизированных систем посвящено довольно большое количество исследований, проводимых с середины 60-х годов прошлого века. Одним из основных направлений исследований в этой области является планирование маршрутов, обеспечиваемых алгоритмами управления движением, учитывающими динамику мобильного робота и обход препятствий.

Проблема синтеза алгоритмов управления автономными мобильными роботами, работающими в неопределенных условиях во внешней среде, может быть успешно решена путем применения синергетического подхода и разработанного в его рамках метода аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР), основанного на использовании

принципов направленной самоорганизации нелинейных систем [1–3].

В настоящее время большое количество работ посвящено изучению динамики мобильных роботов [4–16]. В частности, рассматриваются преимущества различных типов конструкций, количества и типов колес, а также их кинематические модели [9]. В частности, задачи оптимального планирования траектории были предложены в [10] и [11]. В [12] на основе линейной модели были построены пропорционально-интегрально-дифференцирующие контроллеры (ПИД-регуляторы) для управления движением центра масс и ориентацией платформы робота. В [13] были созданы регуляторы PI и PD для управления скоростью платформы и углом ее поворота. В [15] были построены нелинейные динамические модели робота и разработаны интегрированные элементы управления на основе метода линеаризации системы по заданной траектории.

Однако в большинстве рассматриваемых работ, в частности тех, которые основаны на использовании методов линеаризации системы [12–14], нелинейные свойства системы игнорируются, что делает роботизированную систему управления ограниченной определенным конечным набором параметров. Этот факт объясняется сложностью математических моделей мобильных роботов – нелинейных компонентов и высоким порядком уравнений, описывающих динамику их движения в пространстве. Следовательно, существует необходимость в создании мобильной системы управления роботом на гусеничном ходу, которая бы учитывала нелинейные свойства объекта управления для повышения устойчивости системы в доступных режимах работы.

II. МЕТОД АНАЛИТИЧЕСКОГО КОНСТРУИРОВАНИЯ АГРЕГИРОВАННЫХ РЕГУЛЯТОРОВ

В настоящее время для решения задач синтеза законов нелинейного управления объектами высокой размерности используется синергетическая теория управления (СТУ) [1], разработанная профессором А. А. Колесниковым. Основным методом, в рамках этой теории, является метод аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР), который позволяет синтезировать законы управления для сложных нелинейных систем большой размерности без применения процедур линеаризации или других упрощений. Основная идея СТУ

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект №. 19-07-00645-А.

заключается в том, что управление системой должно быть организовано таким образом, чтобы в пространстве состояний системы формировались подмножества – аттракторы, которые удовлетворяют задачи управления [1]. Синергетический подход основан на таких понятиях, как принцип инвариантности и принцип расширения / сжатия фазового пространства в динамических системах, к числу которых можно отнести робототехнические системы. Поэтому для синтеза нелинейного закона управления предлагается использовать подходы СТУ, в частности, метод АКАР.

III. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ГУСЕНИЧНОГО РОБОТА

Чтобы рассмотреть эффективность закона синергетического управления, возьмем за основу модель мобильного гусеничного робота. Когда мобильный гусеничный робот вращается с проскальзыванием гусениц, сила тяги на одной из них увеличивается, а на другом – уменьшается. В результате этого действия создается поворотный момент, чтобы преодолеть момент сопротивления повороту. Режим вращения мобильного гусеничного робота с использованием скольжения зависит от тяговых сил на гусеницах F_0 и F_1 , результирующего сопротивления R_t , момента сопротивления вращению M_r , приложенного к гусенице с землей, и параметров машины (рис. 1).

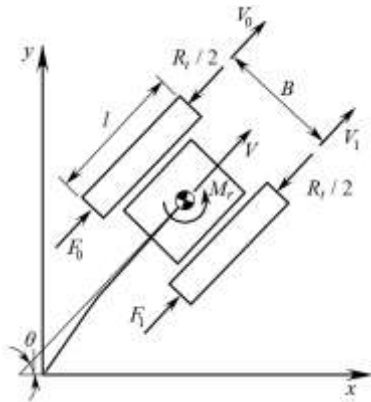


Рис. 1. Схема движения гусеничного робота

Динамическая модель мобильного гусеничного робота будет описываться следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= \cos(\theta)V; & \frac{dy}{dt} &= \sin(\theta)V; \\ m \frac{dV}{dt} &= u_1 - R_t; & \frac{d\theta}{dt} &= \omega; \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} I_z \frac{d\omega}{dt} &= \frac{Bu_2}{2} - M_r, \\ u_1 &= F_0 + F_1; & u_2 &= F_0 - F_1, \end{aligned} \quad (2)$$

где u_1 и u_2 – уравнения связи системы, x , y – координаты центра масс робота; θ – угол поворота платформы робота; V – линейная скорость робота; ω – угловая скорость робота; B – расстояние между осевыми линиями гусениц;

I_z – момент инерции массы робота относительно вертикальной оси, проходящей через его центр масс; m – масса робота.

Зачастую работа мобильного гусеничного робота осуществляется в условиях неопределенности внешней среды, и робот должен выполнять поставленные перед ним технологические задачи. В этом случае одним из основных требований к синтезированным законам управления мобильным гусеничным роботом является обеспечение движения робота по безопасной траектории, построенной из условия технологического задания и избегающей препятствий. Таким образом, задача синтеза состоит в том, чтобы разработать координирующую стратегию для управления силами F_0 и F_1 , обеспечивая асимптотически устойчивое движение мобильного гусеничного робота по безопасной траектории с заданной скоростью.

IV. СИНТЕЗ ЗАКОНА УПРАВЛЕНИЯ

Для реализации управления мобильного робота с гусеничным типом шасси предлагается использовать принципы и методы СТУ [1–3]. В СТУ набор критериев управления обычно выражается в виде соответствующей системы инвариантов [1–3]. Инварианты играют роль цели управления, они обеспечивают выполнение заданной технологической задачи, а процедура синергетического синтеза сводится к поиску законов управления, в соответствии с которыми выполняются данные инварианты.

Для реализации синергетического управления в соответствии с процедурой синтеза с использованием метода АКАР [1–3] необходимо разложить исходную систему (1), для этого введем первую макропеременную с пределом угловой скорости ω_{\max} :

$$\Psi_1 = \omega + \omega_{\max} \tanh(\theta - \theta_0), \quad (3)$$

удовлетворяющих решению функционального уравнения:

$$\dot{\Psi}_1(t) + \lambda_1 \Psi_1 = 0, \quad (4)$$

Решение функционального уравнения (4) является законом управления $u_2 = u_2(x, y, \theta, V, \omega)$ обеспечение перевода точки отображения замкнутой системы в окрестность многообразия, что приводит к декомпозиции исходной системы (1). В результате поведение мобильного робота вблизи многообразия будет описано как:

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= \cos(\theta_0)V; & \frac{dy}{dt} &= \sin(\theta_0)V; \\ m \frac{dV}{dt} &= u_1 - R_t. \end{aligned} \quad (5)$$

Далее для решения задачи перемещения робота в пространстве необходимо рассмотреть вторую макропеременную

$$\Psi_2 = V - V_{\max} \tanh(\varphi), \quad (6)$$

где φ – «внутренний» закон управления, V_{\max} – максимально допустимая скорость движения мобильного робота. Решением функционального уравнения

$$\dot{\Psi}_2 + \lambda_2 \Psi_2 = 0, \quad (7)$$

будет «внешний» закон управления u_1 . Таким образом, декомпозированная система будет иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \varphi \cdot \cos \theta_0; \\ \dot{y} &= \varphi \cdot \sin \theta_0, \end{aligned} \quad (8)$$

Так как желаемая траектория, согласно СТУ [1–3], является аттрактором или притягивающим многообразием в фазовом пространстве объекта управления, то для эффективного обхода препятствий их необходимо представить в виде отталкивающих многообразий фазового пространства мобильного робота, для этого запишем совокупность макропеременных следующим образом:

$$\begin{aligned} \Psi_3 &= x \cos(F_r) + y \sin(F_r) - x^*; \\ \Psi_4 &= -x \sin(F_r) + y \cos(F_r) - y^*, \end{aligned} \quad (9)$$

результат решения функционального уравнения:

$$\begin{aligned} \dot{\Psi}_3 + \lambda_3 \Psi_3 &= 0; \\ \dot{\Psi}_4 + \lambda_4 \Psi_4 &= 0, \end{aligned} \quad (10)$$

который будет выражением для оставшихся неизвестных систем (θ_0 , φ):

$$\theta_0 = \arctan \left(\frac{-x \sin(F_r) + y \cos(F_r) - y^*}{x \cos(F_r) + y \sin(F_r) - x^*} \right); \quad (11)$$

$$\varphi = - \frac{\lambda_3 (-x \sin(F_r) + y \cos(F_r) - y^*)}{\sin(\theta_0)}. \quad (12)$$

В результате, с учетом математической модели мобильного робота (1) – (2), уравнений (3) – (10) и (11) – (12), мы получаем законы синергетического управления мобильным роботом F_0 и F_1 :

$$F_0 = \frac{u_1 + u_2}{2}; \quad F_1 = \frac{u_1 - u_2}{2}.$$

Синтезированный закон управления обеспечивает устойчивое движение мобильного робота в заданную точку пространства с заданным ограничением по скорости и может быть использован для решения проблемы обхода стационарных препятствий.

V. МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАМКНУТОЙ СИСТЕМЫ

Проверка предложенной стратегии управления проводилась путем компьютерного моделирования синтезированной замкнутой системы управления роботом. Предположим, что начальные условия проекций векторов линейной и угловой скорости мобильного робота равны нулю ($V(0)=0$, $\omega(0)=0$). Для общих параметров мобильного гусеничного робота мы берем значения, которые показаны в таблице.

Установим ограничение по скорости МГР $V_0 = 10$ м/с. Координаты цели мобильного робота выберем следующие:

$$x^* = 200 \text{ м}, y^* = 50 \text{ м}.$$

Предположим, что в препятствующий объект расположен в позиции $x = 100$ м, $y = 20$ м имеет радиус 7 метров.

ТАБЛИЦА I КОНСТРУКТИВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ РОБОТА

Параметр	Обознач.	Ед. изм.	Значение
Масса робота	m	kg	20
Расстояние между осевыми линиями гусениц робота	B	m	0.2
Момент инерции мобильного робота	I_z	Hmc ²	0.05
Момент сопротивления повороту	M_r	Nm	0.8
Сопротивление окружающей среде	R_r	N	0.02

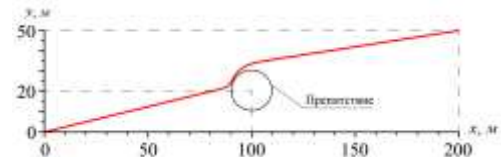


Рис. 2. Траектория движения гусеничного робота

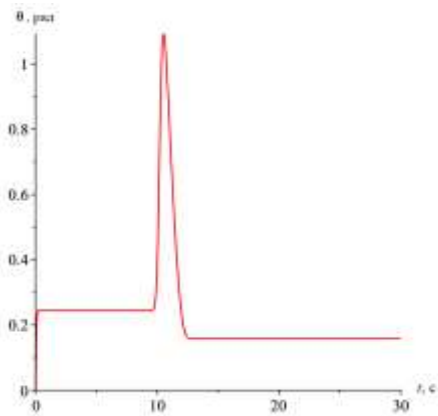


Рис. 3. Изменение угла поворота робота

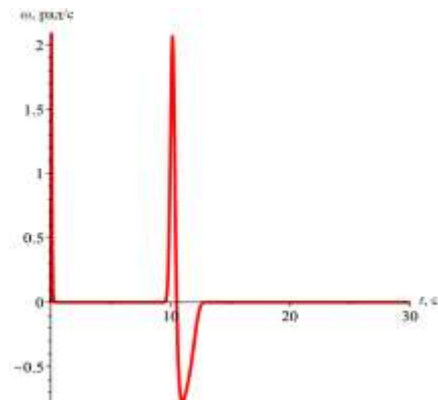


Рис. 4. Изменение угловой скорости мобильного робота

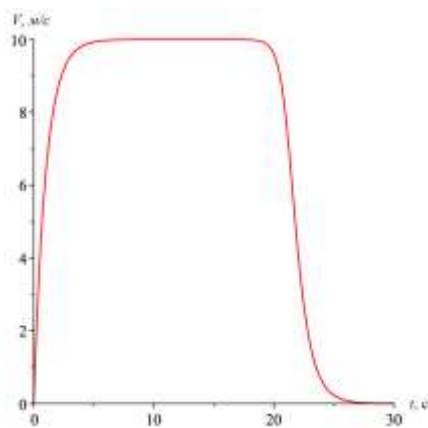


Рис. 5. Изменение линейной скорости мобильного робота

Представленные результаты моделирования подтверждают, что в синтезированной замкнутой системе управления мобильного робота (1)–(12) реализована введенная система инвариантов, а именно перемещение в заданную точку рабочего пространства (рис. 2, рис. 3) с возможностью обхода препятствий (рис. 2) и скоростных ограничений (рис. 4, рис. 5).

VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в статье представлен важный научный результат – разработана методика аналитического синтеза стратегии векторного управления мобильным гусеничным роботом с использованием полной нелинейной модели движения для решения задачи обхода заранее не известных препятствий. Полученная методика управления обеспечивает асимптотическую устойчивость замкнутой системы и точное выполнение указанных инвариантов. Представленный синергетический закон управления не учитывает случайные внешние возмущения, однако наблюдение возмущений возможно с использованием метода синергетического синтеза адаптивных систем управления, но в рамках статьи процедура синтеза не приводится.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Kolesnikov A.A. Synergetic control theory. M.: Energoatomizdat, 1994. 344 p.
 [2] Kolesnikov A.A. Synergetic control theory: concepts, methods, development trends // News of TSURE. 2001. V. 23. № 5. P. 7-27.

[3] Kolesnikov A.A. Synergetic concept of system synthesis: the unity of the processes of self-organization and management // News of TSURE. 2006. V. 61. № 6. P. 10-38.
 [4] Aliceychik A.P. Mechanics and motion control: author. dis. on the competition scholarly step. Cand. Phys.-Mat. Sciences: 01.02.01 / A.P. Aliceychik; Inst. on mat. them. Mv Keldysh Ros. Acad. sciences. M., 2013. 18 p.
 [5] Pavlovsky V.E. Investigation of the dynamics and synthesis of control of wheel apparatuses with excessive mobility / V.E. Pavlovsky, D.V. Shishkanov // Preprint IPM them. M.V. Keldysh RAS. 2006. №12. 28 s.
 [6] Campion G. Structural properties and classification of kinematic and dynamic models of wheeled mobile robots / G. Campion, J. Basten, B. D'Andrea-Novell // Nonlinear Dynamics. 2011. Vol. 7. № 4. C. 733–769.
 [7] Farhi O., M. Scopchanov, E. Draganova, N. Hristoskov, Embedded Fuzzy Control of Two Wheels Mobile Robot, Proceedings of International Conference on Automatics and Informatics, pp. 217–220, 2010.
 [8] Martynenko Yu.G. Motion control of mobile wheeled robots. Fundam. Prikl. Mat., Vol. 11 (2005), No 8, pp. 29-80.
 [9] Wong J.Y. (Jo Yung). Theory of ground vehicles: 3rd ed. John Wiley & Son Inc., 2001.
 [10] Kozłowski K., Pazderski D. Modeling and control of a 4-wheel skid-steering mobile robot. Int. J. Appl. Math Comput. Sci., Vol.14, pp. 477–496, 2004.
 [11] Burdakov SF, Miroshnik I.V., Stelmakov R.E. Motion control systems for wheeled robots / Series "Analysis and synthesis of nonlinear systems." SPb: Science, 2001. 227 p.
 [12] Klilil P.F. Klilil C.P. Kinematic modeling of wheeled mobile robots / P.F. Neinun // J. Robotic Systms. 1987. №4. Pp. 340.
 [13] Velasco-Villa M. Smith-predictor compensated for a delayed omnidirectional mobile robot / M. Velasco-Villa, B. del-Muro-Cuellar, A. Alvarez-Aguirre // Proceedings of the 15th Mediterranean Conference on control & Automation, Athene-Greece, 2007.
 [14] Vazques J.A. Omnidirectional Mobile Robot / J.A. Vazques, M. Velasco-Villa // Proceedings of the 17th World Congress "The International Federation of Automatic Control", 2008. Pp. 5365-5373.
 [15] Huang H.C. Adaptive Trajectory Tracking and Stabilization for Omnidirectional Mobile Robot with Dynamic Effect and Uncertainties / H.C. Huang, C.C. Tsai // Proceedings of the 17th World Congress "The International Federation of Automatic Control", 2008. Pp. 5383-5388.
 [16] Andreev A.S. Synthesis of continuous and piecewise-constant control of the movement of a wheeled mobile robot / A.S. Andreev, E.A. Kudashova, S.Yu. Rakov // Scientific and Technical. Bulletin of the Volga region. 2014. №5. p. 97-100.
 [17] Singh B. Lie detection using image processing / B. Singh, P. Rajiv // International conference on advanced computing and communication system (ICACCS - 2015), Jan. 05-07, 2015.
 [18] Xu Y. An enhanced Viola-Jones vehicle detection method of unmanned aerial vehicles imagery / Y. Xu, G. Yu., X. Wu, Y. Wang, Y. Ma // IEEE Trans. 18, no. 7, July 2017.