УДК 681.513.6

АДАПТИВНОЕ РОБАСТНОЕ УПРАВЛЕНИЕ МНОГОСТЕПЕННЫМ МЕХАНИЧЕСКИМ ОБЪЕКТОМ С ПРИМЕНЕНИЕМ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

В.Н. Шелудько
СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
Россия, 197022, Санкт-Петербург, Профессора Попова ул., 5 лит. Ф
E-mail: vvputov@mail.ru

В.В. Путов
СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
Россия, 197022, Санкт-Петербург, Профессора Попова ул., 5 лит. Ф
E-mail: vvputov@mail.ru

А.А. Кузнецов
СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
Россия, 197022, Санкт-Петербург, Профессора Попова ул., 5 лит. Ф
E-mail: smith_spb@mail.ru

Зуи Хань Нгуен
СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
Россия, 197022, Санкт-Петербург, Профессора Попова ул., 5 лит. Ф
E-mail: khanhnguyen.mta@gmail.com

Ключевые слова: многостепенной механический объект с неизвестными параметрами; метод адаптивного обхода интегратора (бэкстеппинг) с функциями настройки; RBF-сети

Аннотация: В докладе рассматривается задача синтеза управления многостепенным нелинейным механическим объектом с неизвестными параметрами. Разрабатывается и исследуется адаптивная робастная система управления, синтезированная на основе метода адаптивного обхода интегратора с функциями настройки. Для аппроксимации неизвестных параметров применяется сеть радиальных базисных функций (RBF-сеть).

1. Введение

Роботы-манипуляторы представляют собой системы с существенной нелинейностью и параметрической неопределенностью модели. Существует несколько подходов к решению проблемы управления движением роботов-манипуляторов в условиях неопределенности: адаптивное управление, робастное управление, управление с помощью скользящих режимов [1-9]. В тоже время, решение проблемы управления такими сложными нелинейными динамическими объектами в условиях их параметрической и функциональной неопределенности и действия неизвестных возмущений потребовало от современной теории адаптивных и нелинейных систем создания отвечающих указанным вызовам новых методов, таких как пошаговые (итеративные) процедуры построения нелинейного управления основного контура методом так называемого обхода интегратора, объединенных с синтезом адаптивных алгоритмов настройки их параметров [10-16]. В тоже время приведение нелинейного объекта к специальному виду с помощью линейной (аффинной) параметризации относительно неизвестных параметров может рассматриваться как отдельная задача.

В последнее время исследователи уделяют большое внимание к построению систем управления с использованием нейронных сетей, например, [17-21]. Для аппроксимации неопределенных параметров используем RBF-сеть, которая может аппроксимировать любые ограниченные непрерывные функции с любой желаемой точностью при достаточном количестве скрытых узлов [22-24]. За последние десятилетия было опубликовано ряд статей, в которых обсуждается синтез адаптивного управления с использованием RBF-сетей для роботов-манипуляторов [25-29].

1.1. Структура RBF-сети

Структура RBF-сети включает в себя три слоя: входной, скрытый и выходной слои [30]. Каждый нейрон скрытого слоя рассчитывает значение одномерной функции вида

(1) $$\varphi_j = \exp\left(-\frac{\left\|x-c_j\right\|^2}{2b_j^2}\right); j = 1,2..,m,$$

где x – входной вектор; m – число нейронов скрытого слоя; $c_j = \left(c_{j1},..,c_{jn}\right)^T$ – вектор центра функции; в качестве функции активации для φ_j применяется функция Гаусса; от значения константы b_jзависит ширина функции активации.

Выходные значения RBF-сети определяются как

(2) $$h(x) = W^T\varphi(x) + \varepsilon, \forall x \in \Omega,$$

где ε – ошибка построения RBF-сети; W – матрица весов; *Ω* компактное множество.

1.2. Объект управления и постановка задачи управления

Будем рассматривать многостепенный нелинейный механический объект вида

(3) $$M(q)\ddot{q} + C(q,\dot{q})\dot{q} + D(q) = \tau,$$

где $q \in R^n$, $\dot{q} \in R^n$, $\ddot{q} \in R^n$ – векторы обобщенных координат, скоростей и ускорений; $M(q) \in R^{n\times n}$, $C(q,\dot{q}) \in R^{n\times n}$ – функциональные матрицы инерции, кориолисовых и центробежных сил соответственно; $D(q) \in R^n$– вектор-функция гравитационных сил; $\tau \in R^n$ – вектор управляющих входов.

Преобразуем уравнение (3) к форме Коши. Пусть $x_1 = q$, $x_2 = \dot{q}$, тогда

(4) $$\dot{x}_1 = x_2;$$

(5) $$\dot{x}_2 = M^{-1}(-Cx_2 - D + \tau)$$ или $$\dot{x}_2 = M^{-1}(-Cx_2 - D) + \left(M^{-1} - E\right)\tau + \tau.$$

Для того, чтобы применить адаптивный обход интегратора с функциями настройки [16,17] используем RBF-сеть. Введем следующие обозначения, пусть

(6) $$M^{-1}(-Cx_2 - D) + \left(M^{-1} - E\right)\tau = W^T\varphi + \varepsilon,$$

где $W^T \in R^{n\times m}$; $\varphi(x_1, x_2, \dot{x}_1, \dot{x}_2, \tau) \in R^{m\times 1}$; $\varepsilon \in R^{n\times 1}$, тогда (5) с учетом (6) примет вид

(7) $$\dot{x}_2 = W^T\varphi + \varepsilon + \tau.$$

Поставим следующую задачу построения законов управления и алгоритмов настройки для системы (4) и (5), удовлетворяющих в интервальном классе неопределенности следующему целевому равенству (*цели управления*): $\lim_{t\to\infty}\|\mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_d\| = 0$, где $x_d(t)$ – заданный программный вектор углов вращения звеньев.

2. Адаптивное робастное управление многостепенным механическим объектом

Применим метод обратного обхода интегратора с функциями настройки и RBFсеть.

ШАГ 1. Введем следующие обозначения, где α виртуальное управление

(8) $$z_1 = x_1 - x_d;$$

(9) $$z_2 = x_2 - \alpha,$$

Производная уравнения (8) с учетом (4) и (9) примет следующий вид

(10) $$\dot{z}_1 = z_2 + \alpha - \dot{x}_d.$$

Выберем функцию Ляпунова в виде $V_1 = \frac{1}{2} z_1^T z_1$ и вычислим ее производную

(11) $\dot{V}_1 = z_1^T \dot{z}_1 = z_1^T (z_2 + \alpha - \dot{x}_d)$, тогда выберем виртуальное управление

(12) $$\alpha = -k_1 z_1 + \dot{x}_d,$$

где k_1 – положительно определенная симметричная матрица.

Подставляя уравнение (12) в (11), получим

(13) $$\dot{V}_1 = -z_1^T k_1 z_1 + z_1^T z_2.$$

ШАГ 2. Производная уравнения (9) с учетом (7) примет вид

(14) $$\dot{z}_2 = W^T \varphi + \varepsilon + \tau - \dot{\alpha}.$$

Выберем функцию Ляпунова в виде $V_2 = V_1 + \frac{1}{2} z_2^T z_2$ и вычислим ее производную в силу уравнения (13) и учитывая (9)

(15) $$\dot{V}_2 = \dot{V}_1 + z_2^T \dot{z}_2 = -z_1^T k_1 z_1 + z_1^T z_2 + z_2^T \left(W^T \varphi + \varepsilon + \tau - \dot{\alpha} \right).$$

Выберем финальный закон управления

(16) $$\tau = -k_2 z_2 - z_1 - \widehat{W}^T \varphi + \dot{\alpha}.$$

С учетом (17) и $\widetilde{W} = W - \widehat{W}$, производная $\dot{V}_2$ примет вид

(17) $$\dot{V}_2 = -z_1^T k_1 z_1 - z_2^T k_2 z_2 + z_2^T \left(\widetilde{W}^T \varphi + \varepsilon \right),$$

Введем в рассмотрение следующую функцию Ляпунова $V_{2a} = V_2 + tr\left[\widetilde{W}^T \Gamma^{-1} \widetilde{W} \right]$ и учитывая (17), найдем ее производную

(18) $$\dot{V}_{2a} = -z_1^T k_1 z_1 - z_2^T k_2 z_2 + z_2^T \left(\widetilde{W}^T \varphi + \varepsilon \right) - tr\left[\widetilde{W}^T \Gamma^{-1} \dot{\widehat{W}} \right] =$$
$$= -z_1^T k_1 z_1 - z_2^T k_2 z_2 + z_2^T \varepsilon + tr\left[\widetilde{W}^T \varphi z_2^T - \widetilde{W}^T \Gamma^{-1} \dot{\widehat{W}} \right].$$

Тогда адаптивный робастный алгоритм настройки будет

(19) $$\dot{\widehat{W}} = \Gamma[\varphi z_2^T - n\|\xi\|\widehat{W}],$$

где $\xi = [z_1^T, z_2^T]^T \in R^{2n\times 1}$; $n > 0$ – параметр алгоритма настройки.

Подставляя (19) в (18), получим

(20) $$\dot{V}_{2a} = -z_1^T k_1 z_1 - z_2^T k_2 z_2 + z_2^T \varepsilon + n\|\xi\| tr\left[\widetilde{W}^T \widehat{W} \right].$$

Перепишем $\dot{V}_{2a}$ в следующем виде

(21) $$\dot{V}_{2a} = -\xi^T K \xi + \xi E + n\|\xi\| tr\left[\widetilde{W}^T \widehat{W} \right],$$

где $K = \begin{bmatrix} k_1 & O_{n\times n} \\ O_{n\times n} & k_2 \end{bmatrix}$; $E = \begin{bmatrix} O_{n\times 1} \\ \varepsilon \end{bmatrix}$; Кроме того, $\|E\| = \|\varepsilon\| < \varepsilon_N$; $\|W\|_F \le W_M$, где ε_N, W_M – неизвестные константы.

$$-\xi^T K \xi \le -\lambda_{\min}(K)\|\xi\|^2; \xi^T E \le \|\xi\| \varepsilon_N;$$

$$tr\left[\widetilde{W}^T\widehat{W}\right] \le \left\|\widetilde{W}\right\|_F \|W\|_F - \left\|\widetilde{W}\right\|_F^2 \le W_M \left\|\widetilde{W}\right\|_F - \left\|\widetilde{W}\right\|_F^2.$$

Учитывая (21), запишем

$$\dot{V}_{2a} = -\lambda_{\min}(K)\|\xi\|^2 + \varepsilon_N\|\xi\| + n\|\xi\|\left[W_M\left\|\widetilde{W}\right\|_F - \left\|\widetilde{W}\right\|_F^2\right]. \quad (22)$$

По неравенству Юнга имеем $W_M\left\|\widetilde{W}\right\|_F \le \frac{1}{2}W_M^2 + \frac{1}{2}\left\|\widetilde{W}\right\|_F^2$,

Тогда учитывая (22) получим

$$\dot{V}_{2a} \le -\|\xi\|\left[\lambda_{\min}(K)\|\xi\| + \frac{n}{2}\left\|\widetilde{W}\right\|_F^2 - \left(\varepsilon_N + \frac{n}{2}W_M^2\right)\right].$$

$\dot{V}_{2a}(\xi, \widetilde{W}) < 0$ вне компактного множества $\left\{(\xi, \widetilde{W}) | \lambda_{\min}(K)\|\xi\| + \frac{n}{2}\left\|\widetilde{W}\right\|_F^2 \le \left(\varepsilon_N + \frac{n}{2}W_M^2\right)\right\}$, в следствие чего все сигналы ограничены и переменные $\xi, \widetilde{W}$ сходятся к инвариантному множеству, радиус которого может быть сделан произвольно малым за счет увеличения коэффициента $\lambda_{\min}(K)$.

3. Заключение

В статье рассмотрена задача построения адаптивной робастной системы управления неопределенным многостепенным нелинейным механическим объектом, синтезированной на основе метода адаптивного обратного обхода интегратора с использованием функций настройки с RBF-сетью. При этом, в отличие от подходов к разработке системы управления в [24] и [31], в предлагаемом подходе параметризация относительно неизвестных параметров с применением RBF-сети производится до синтеза системы управления, что позволяет применить метод адаптивного обратного обхода интегратора с использованием функций настройки.

Список литературы

1. Slotine J.-J.E., Li W. On the Adaptive Control of Robot Manipulators // The International Journal of Robotics Research. 1987. Vol. 6. P. 49-59.
2. Midleton P., Goodwin G.C. Adaptive computed torque control for rigid link manipulations // System and Control Letters. 1988. Vol. 10. P. 9-16.
3. Пятницкий Е.С., Дунская Н.В. Стабилизация управляемых механических и электромеханических систем // Автоматика и телемеханика. 1988. № 12. С. 40-51.
4. Фрадков А.Л. Адаптивное управление в сложных системах: беспоисковые методы. М.: Наука, 1990. 296 с.
5. Cheah C.C., Liu C., Slotine J.-J.E. Adaptive Tracking Control for Robots with Unknown Kinematic and Dynamic Properties // The International Journal of Robotics Research. 2006. Vol. 25. P. 283-296.
6. Herman P., Franelak D. Robust tracking controller with constraints using generalized velocity components for manipulators // Transactions of the Institute of Measurement and Control. 2008. Vol. 30. P. 101-113.
7. Путов В. В., Шелудько В. Н. Новый подход в построении беспоисковых адаптивных систем управления нелинейными динамическими объектами с неопределенным описанием // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2008. Вып. 4. С. 37050.
8. Garcнa-Rodrнguez R., Parra-Vega V. Cartesian sliding PID control schemes for tracking robots with uncertain Jacobian // Transactions of the Institute of Measurement and Control. 2012. Vol. 34. P. 448-462.
9. Путов В.В., Лебедев В.В., Путов А.В. Адаптивные системы управления многостепенными жесткими нелинейными механическими объектами, построенные по их упрощенным моделям с мажорирующими функциями // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2013. № 10. С. 49-55.
10. Мирошник И.В., Никифоров В.О., Фрадков А.Л. Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами. СПб.: Наука, 2000. 549 с.
11. Антонов В.Н., Терехов В.А., Тюкин И.Ю. Адаптивное управления в технических системах. Учеб. пособие. СПб.: Издательство С.-Петербургского университета, 2001. 244 с.
12. Тюкин И.Ю., Терехов В.А. Адаптация в нелинейных динамических системах. М.: Издательство ЛКИ, 2008. 384 с.

13. Андриевский Б.Р., Бобцов А.А., Фрадков А.Л. Методы анализа и синтеза нелинейных систем управления. М.-Ижевск: Издательство «ИКИ», 2018. 336 с.
14. Kanellakopoulos I., Kokotovic P.V., Morse A.S. Systematic design of adaptive controllers for feedback linearizable systems // IEEE Trans. Automat. Control. 1991. Vol. AC-36, No. 11. P. 1241-1253.
15. Krstic M., Kanellakopoulos I., Kokotovic P.V. Adaptive Nonlinear Control Without Overparametrization // Systems and Control Letters. 1992. Vol. 19. P. 177-185.
16. Krstic M., Kanellakopoulos I., Kokotovic P.V. Nonlinear and Adaptive Control Design. New York: Wiley-Interscience, 1995. 559 p.
17. Lin S., Goldenberg A.A. Neural-network control of mobile manipulators // IEEE Trans. Neural Netw. 2001. Vol. NN-12, No. 5. P. 1121-1133.
18. Wang L., Chai T., Yang C. Neural-network-based contouring control for robotic manipulators in operational space // IEEE Trans. Control Syst. Technol. 2012. Vol. CST-20, No. 4. P. 1073-1080.
19. B. Xu, C. Yang, Z. Shi, Reinforcement learning output feedback NN control using deterministic learning technique // IEEE Trans. Neural Netw. Learn. Syst. 2014. Vol. 25, No. 3, P. 635-641.
20. Liu Y.-J., Tang L., Tong S., Chen C.L.P. Adaptive NN controller design for a class of nonlinear MIMO discrete-time systems // IEEE Trans. Neural Netw. Learn. Syst. 2015. Vol. 26, No. 5, P. 1007-1018.
21. Jin L., Li S., Yu J., He J. Robot manipulator control using neural networks: A survey // Neurocomputing. 2018. Vol. 285, P. 23-34.
22. Park J., Sandberg I.W. Universal Approximation Using Radial-Basis-Function Networks // Neural Computation. 1991, Vol. 3. P. 246–257.
23. K.J. Hunt, R. Haas, R. Murray-Smith. Extending the functional equivalence of radial basis function networks and fuzzy inference systems // IEEE Trans. Neural Netw. 1996. Vol. NN-7. P. 776-781.
24. Haibo Zhao, Chengguang Wang. RBF NN-Based Backstepping Adaptive Control for a Class of Nonlinear Systems // MATEC Web Conf. 2018. Vol 214. P. 1-4.
25. Shuzhi S.G., Hang C.C., Woon L.C. Adaptive neural network control of robot manipulators in task space // IEEE Trans. Ind. Electron. 1997. Vol. IE-44. P. 746-752.
26. Min-Jung L., Young-Kiu C. An adaptive neurocontroller using RBFN for robot manipulators // IEEE Trans. Ind. Electron. 2004. Vol. IE-51. P. 711-717.
27. He W., Chen Y., Yin Z. Adaptive Neural Network control of an Uncertain Robot with Full – State Constraints // IEEE Transactions on Cybernetics. 2016. Vol. C-46, No. 3. P. 620-629.
28. Liu C., Zhao Z., Wen G. Adaptive neural network control with optimal number of hidden nodes for trajectory tracking of robot manipulators // Neurocomputing. 2019. Vol. 350. P. 136-145.
29. Liu Q., Li D., Ge S.S., Ji R., Ouyang Z., Tee K.P. Adaptive bias RBF neural network control for a robotic manipulator // Neurocomputing. 2021. Vol. 447. P. 213-223.
30. Lewis F., Jagannathan S., Yesildirak A. Neural Network Control Of Robot Manipulators And Non-Linear Systems. London: Taylor & Francis, 2001. 430 p.
31. Ле Хонг Куанг, Нгуен Тхань Тиен, Доан Ван Минь, Путов В.В., Шелудько В.Н., Кузнецов А.А., Чернышев М.А. Адаптивное робастное управление многостепенным нелинейным механическим объектом с параметрической и функциональной неопределенностью (точный и приближенный подходы) // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2021. № 9. С. 48-60.