

АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ И РОБОТОТЕХНИКА

AUTOMATIC CONTROL AND ROBOTICS

doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-5-889-895

УДК 681.5.015

Формирование траектории цифрового двойника многосвязного механизма с использованием адаптивного алгоритма оценки параметров нелинейного движения**Алексей Викторович Мешков¹**, **Владислав Сергеевич Громов²**^{1,2} Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация¹ avmeshkov@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9981-8299>² gromov@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2416-3766>**Аннотация**

Предмет исследования. Системы контроля автоматизированных линий требуют высокой точности и скорости обработки получаемой информации. В последние годы быстро развиваются технологии цифрового двойника, цифровой модели системы, повторяющей параметры реального объекта. Цифровой двойник используется в задачах удаленного контроля состояния реальных систем, испытаний реакций воздействия внешних факторов, без прямого влияния на реальную систему. Цифровой двойник применяется во многих сферах, таких как здравоохранение, промышленность, образование, городская инфраструктура и многих других. Несмотря на популярность исследований данной тематики, не выделено единого подхода к формированию цифрового двойника. Зачастую в современных работах освещается задача синтеза двойника с известными параметрами рассматриваемой системы. В данной работе предложен метод формирования цифрового двойника многосвязного механизма с неизвестными параметрами движения рассматриваемой системы, основанный на адаптивной оценке параметров траектории движения многосвязных механизмов, который способен облегчить задачу удаленного контроля состояния производства и расширить применимость технологии цифрового двойника на новый класс задач. **Метод.** В работе представлено описание синтеза адаптивного регулятора, основанного на внутренней модели, приведено теоретическое обоснование представленного алгоритма, а также описано его применение в задаче слежения за траекторией движения многосвязного механизма. **Основные результаты.** Выполнена экспериментальная апробация формирования цифрового двойника робота-манипулятора Kuka youBot в реальном времени с использованием адаптивного оценщика, основанного на внутренней модели. Адаптивная оценка параметров движения проведена для двух звеньев манипулятора с целью подтверждения возможности формирования цифрового двойника многосвязного механизма в условиях неизвестных параметров. Параметры движения звеньев робота-манипулятора задавались вручную посредством хаотических генераторов и не были известны адаптивному регулятору. Такой подход к формированию траектории движения звеньев манипулятора использован для оценки точности работы алгоритма путем вычисления ошибки слежения адаптивного алгоритма. Ошибка слежения определена как разность между эталонным воздействием, обеспечивающим движения манипулятора, и выходным сигналом адаптивного оценщика, который использован для описания траектории на модели робота-манипулятора в трехмерном пространстве. Проведены испытания, целью которых стала оценка ошибки слежения описываемого алгоритма. Положительными результатами принято считать сходимость ошибки слежения в области $[-0,005, 0,005]$ рад. По результатам испытаний построены графики оценки, которые показали положительный результат. Существуют колебания ошибки слежения вокруг нуля, что обусловлено шумами измерений и задержками при симуляции режима работы реального времени в выбранной среде моделирования. По итогам испытаний приведены дальнейшие шаги по увеличению точности и производительности описываемого подхода к формированию цифрового двойника. **Практическая значимость.** Результаты представленной работы могут быть использованы при дальнейших исследованиях технологий цифрового двойника, в условиях неизвестных параметров системы. Представленный метод формирования может применяться в задачах телеуправления манипуляторами, в системах контроля технического состояния роботов на производственной линии, а также в общих задачах слежения за траекторией движения многосвязных механизмов.

Ключевые слова

цифровой двойник, адаптивная оценка, многосвязные механизмы, нелинейная траектория движения

© Мешков А.В., Громов В.С., 2022

Благодарности

Работа поддержана грантом Президента Российской Федерации № МД-3574.2022.4.

Ссылка для цитирования: Мешков А.В., Громов В.С. Формирование траектории цифрового двойника многозвенного механизма с использованием адаптивного алгоритма оценки параметров нелинейного движения // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2022. Т. 22, № 5. С. 889–895. doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-5-889-895

Adaptive nonlinear motion parameters estimation algorithm for digital twin of multi-link mechanism motion trajectory synthesis

Alekssei V. Meshkov¹✉, Vladislav S. Gromov²

^{1,2} ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

¹ avmeshkov@itmo.ru✉, <https://orcid.org/0000-0001-9981-8299>

² gromov@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2416-3766>

Abstract

Monitoring systems of automated production lines requires high accuracy and processing speed of acquired data. Nowadays digital twin technologies are rapidly developing as part of Industry 4.0. Digital twin is a virtual representation of a physical system that mimics the behaviour of a real object, and is used in real-time control, monitoring and disturbance prediction, without influence on a real object. Digital twin is being used in many fields of application such as: healthcare, manufacturing, education, city development, etc. Nonetheless, despite the rising popularity of digital twin researches, there is no basic approach to digital twin synthesis. Mostly, in state of the art articles, systems with known parameters are considered. In this paper, approach to development of digital twin, based on internal model for multi-link mechanisms with unknown motion parameters, is presented. Described approach intended to ease the task of production line monitoring and extend digital twin technology application field. In this article adaptive controller design, based on internal model, is presented, theoretical explanations of design process are provided, and application of the control algorithm in the task of multi-link mechanism motion trajectory parameters estimation is described. In this work the experimental synthesis of digital twin for Kuka youBot manipulator based on presented approach in real time is described. Adaptive motion parameters estimation was made for two links of the manipulator for the sake of confirmation of presented approach usage in the task of digital twin for systems with unknown parameters. Motion trajectory parameters of the robot links were defined manually with the use of chaotic generators to estimate the accuracy of the adaptive control system. This approach was used in order to calculate the error of reference tracking by comparing the control signal for digital twin with the reference exogenous input for manipulator links. As the results of the experiment, the graphs of the error reference tracking for both links are presented. As the goal of the experiment, the convergence of reference tracking error to the field $[-0.005, 0.005]$ radian was set, and as can be seen from graphs this goal was achieved. There is a small disturbance of the error convergence on the graphs within the desired field which was caused by noised measurements and delays of the chosen modelling environment real-time simulations. In the conclusion of this paper, further work to reduce the influence of mentioned causes is described. The results of this paper can be used in further digital twin technology researches. Presented approach can be implemented in robots remote control tasks, production lines technical condition monitoring and in general motion trajectory parameters estimation tasks for multi-link mechanisms.

Keywords

digital twin, adaptive estimation, multi-joint mechanisms, nonlinear motion trajectory

Acknowledgments

The work was supported by President of the Russian Federation (grant МД-3574.2022.4).

For citation: Meshkov A.V., Gromov V.S. Adaptive nonlinear motion parameters estimation algorithm for digital twin of multi-link mechanism motion trajectory synthesis. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2022, vol. 22, no. 5, pp. 889–895 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-5-889-895

Введение

В рамках технологий «Индустрия 4.0» введено понятие «Цифровой двойник» (Digital twin) [1]. Это система, повторяющая параметры реального объекта и позволяющая вести удаленное наблюдение за состоянием отслеживаемого объекта в реальном времени. Сферы применения технологии цифрового двойника, как показано в [1], различны и охватывают широкий спектр задач: здравоохранение, промышленность, образование, городская инфраструктура и многие другие. Подробное описание перспектив использования цифрового двойника в различных сферах представлено мно-

гими авторами [2–4]. В работе [5] приведен глубокий анализ современного состояния тематики цифрового двойника в промышленности. Авторами сделан вывод о том, что данная тематика — перспективное и популярное направление разработки, что подтверждено увеличением количества работ и патентов в мире. Однако, несмотря на повышенный интерес, не существует единого подхода к формированию цифрового двойника, что подтверждает актуальность исследований данной тематики на сегодняшний день. В [6] формализованы требования к системам обработки данных, пригодных для использования в цифровом двойнике, а также выделены его основные функциональные части. В работе

[7] показано текущее состояние разработки цифрового двойника города. Одна из основных сложностей данной разработки — обработка большого массива данных, в том числе и данных о положении и траектории движения объектов. В [8] приведено описание разработки системы безопасности промышленного робота, при использовании технологий машинного обучения и цифрового двойника. Сделано предположение, что системе безопасности известна траектория движения робота-манипулятора в подконтрольной зоне. Данная идея справедлива для разработки систем безопасности на производстве, однако, в то же время оно ограничивает варианты применения сформированного двойника.

В настоящей работе предложено решение для формирования цифрового двойника при условии неизвестной траектории движения многозвенного механизма. Такое решение позволит расширить сферу применения цифрового двойника робота-манипулятора, например, на системы отслеживания контроля технического состояния производственных линий для оценки износа компонентов робота в случае отклонения от заданной траектории движения.

Для формирования цифрового двойника в условиях неизвестной траектории движения робота-манипулятора необходимо решить задачу слежения за объектом. В последние годы решения задачи отслеживания объектов часто основаны на структурах нейронных сетей из-за широкой распространенности и общей приемлемой производительности в конкретных приложениях. Отметим, что технология отслеживания движения распространяется на новые области применения, к которым предъявляются такие требования, как связанность сигналов системы управления и доказательство стабильности [9]. Но в ряде случаев системы, основанные на использовании нейронных сетей, выполнение перечисленных требований не могут гарантировать. Чтобы удовлетворить эти требования, например можно использовать подходы нелинейного управления выходом, основанные на внутренней модели.

Проблема регулирования выхода нелинейных систем изучена в нескольких работах, ее подробное справочное описание можно найти в [10]. Успешное регулирование выхода достигнуто для класса одноканальных систем, которые совмещаются с внутренней моделью специальной формы в работе [11]. Этот подход распространен на класс многоканальных систем, имеющих одинаковое количество входов и выходов [12]. В [13] представлены результаты проектирования адаптивного регулятора по выходу для линейных систем. Доказано, что результаты верны в случае наличия дополнительных измерений, кроме непосредственно измерений регулируемого выхода и управляемого входа. В [14] полученные результаты доказаны применительно к случаю нелинейных систем, аффинных по управляемому входу. В качестве расширения прикладного исследования в настоящей работе предложено проектирование регулятора, основанное на работе [14], для нового случая нелинейных траекторий с новой внутренней моделью. Представлен пример применения отслеживания движения и оценки параметров траектории.

Постановка задачи

Рассмотрим синтез адаптивной системы управления на примере задачи слежения за объектом с нелинейной траекторией движения. Предположим, что объект находится под действием ограниченного внешнего задающего воздействия вида:

$$\begin{aligned} dx(t)/dt &= f(x, w) + g(x, w)u(t), \\ e(t) &= h(x, w), \\ dw/dt &= S(w, \rho), \end{aligned}$$

где $x(t) \in R^n$ — вектор состояний; $u(t) \in R^m$ — сигнал слежения; $e(t) \in R^m$ — ошибка слежения; $f(x, w)$, $g(x, w)$, $h(x, w)$ — векторные функции $x(t)$ и $w(t)$, $w(t) \in R$ — эталонный вектор состояний, вызванный задающим воздействием; $\rho \in R$ — вектор неизвестных параметров задающего воздействия; $S(w, \rho)$ — векторная функция $w(t)$ и ρ .

Для задачи слежения за объектом неизвестной траектории предположим, что внешнее нелинейное задающее воздействие может быть описано нелинейной хаотической моделью [15]:

$$dw_1/dt = \theta_2[-\theta_3 f(w_2)]w_2 + \frac{d}{dt}([\theta_1 - \theta_3 f(w_2)]w_2), \quad (1)$$

$$dw_2/dt = \frac{1}{\theta_2}(w_1 - [\theta_1 - \theta_3 f(w_2)]w_2), \quad (2)$$

где w_1, w_2 — переменные состояния; $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ — неизвестные параметры; $f(w_2)$ — известная функция. Данная модель нелинейного сигнала в зависимости от параметров и начальных условий покрывает большой объем различных траекторий.

Цель синтеза адаптивного алгоритма — отслеживание задающего воздействия путем применения алгоритма управления $u = u(\hat{w}, \hat{\rho})$, который соответствует условию ограниченности всех сигналов и сходимости ошибки $\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = 0$.

Предлагаемое решение

Для достижения поставленной цели используем алгоритм управления, основанный на внутренней модели, представленной в работе [14], вида:

$$d\eta/dt = F\eta + G\left[\frac{1}{k}\gamma(k\eta) + e(t)\right], \quad (3)$$

$$u(t) = \frac{1}{k}\gamma(k\eta) + e(t), \quad (4)$$

где η — вектор состояния внутренней модели; γ — компенсирующая часть сигнала управления; k — подбираемый коэффициент; F — матрица состояний в сопутствующей форме; $G = (0 \ 0 \ \dots \ 0 \ 1)^T$ — матрица управления. F и γ должны быть специально синтезированы для рассматриваемой нелинейной системы.

Сделаем два допущения.

Допущение 1. Существует такой номинальный закон управления $u_0 = u(x, w)$, при котором ошибка управления $e(t)$ сходится к нулю.

Допущение 2. Существует вид внешнего возмущения, представленный в виде:

$$d\sigma/dt = F\sigma + G\gamma(\sigma),$$

$$\gamma(\sigma) = u_0,$$

где σ — вектор состояний.

Для синтеза закона управления при условии существования внешнего воздействия:

$$\sigma = \sigma(w)$$

переменные вектора σ определяются как

$$\sigma_1 = w_2,$$

$$\sigma_2 = d\sigma_1/dt = dw_2/dt = \frac{1}{\theta_2}(w_2 - [\theta_1 - \theta_3 f(w_2)]w_2).$$

Таким образом, модель внешнего возмущения (1) и (2) может быть представлена:

$$w_2 = \sigma_1,$$

$$w_1 = [\theta_1 - \theta_3 f(\sigma_1)]\sigma_1 + \theta_2 \sigma_2.$$

Вектора σ и w взаимовыражаемые, что свидетельствует о существовании системы особого вида, как показано в [14]. Согласно допущениям 1 и 2, существует модель вида:

$$\begin{pmatrix} d\sigma_1/dt \\ d\sigma_2/dt \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ -\theta_1 & -\theta_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \gamma(\sigma),$$

$$\gamma(\sigma) = \theta_1 \sigma_1 + \theta_2 \sigma_2 - \theta_3 f(\sigma_1) \sigma_1.$$

Однако регулятор такого вида не реализуем, так как он основывается на не определяемом векторе w .

Используя (3) и (4) закон управления может быть переписан:

$$\begin{pmatrix} d\eta_1/dt \\ d\eta_2/dt \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ -\theta_1 & -\theta_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \eta_1 \\ \eta_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \left[\frac{1}{k} \gamma(k\eta) + e(t) \right],$$

$$\gamma(k\eta) = \theta_1 k\eta_1 + \theta_2 \eta_2 - \theta_3 f(k\eta_1) k\eta_1,$$

$$u(t) = \frac{1}{k} \gamma(k\eta) + e(t).$$

Получим закон управления в установившемся режиме:

$$d\eta_1/dt = \eta_2,$$

$$d\eta_2/dt = -\theta_3 f(k\eta_1) k\eta_1.$$

Однако до тех пор, пока закон управления включает в себя функцию $\gamma(k\eta)$, которая опирается на неизвестные коэффициенты $\theta_1, \theta_2, \theta_3$, он также физически не реализуем.

Решением этой проблемы служит замена функции на ее оценку

$$\hat{\gamma}(k\eta) = \hat{\theta}_1 k\eta_1 + \hat{\theta}_2 k\eta_2 - \hat{\theta}_3 f(k\eta_1) k\eta_1,$$

или $\hat{\gamma}(k\eta) = \hat{\theta} \beta(k\eta),$

где оценочный вектор

$$\hat{\theta} = [\hat{\theta}_1, \hat{\theta}_2, \hat{\theta}_3], \beta(k\eta)^T = [k\eta_1, k\eta_2, -f(k\eta_1)k\eta_1].$$

Вектор оценки определяется путем выбора закона адаптации, который в данном случае имеет вид:

$$d\hat{\theta}^T/dt = -k_0 e(t) \beta(k\eta),$$

где k_0 — подбираемый коэффициент.

Экспериментальное исследование

Основная цель проведения экспериментальной апробации — необходимость оценки возможности формирования цифрового двойника в реальном времени посредством адаптивного алгоритма оценки траектории нелинейного движения. Для точного и правильного формирования цифрового двойника необходима точность работы алгоритма в реальном времени.

На рис. 1 представлен макет экспериментального стенда. Стенд содержит робот-манипулятор KUKA youBot, выступающий в виде отслеживаемого объекта, и обрабатывающего центра — среды MATLAB Simulink. Цифровой двойник сформирован за счет построения в среде Simulink модели робота, основанной на его физических характеристиках, и данных о положении звеньев, получаемых в реальном времени с датчиков робота-манипулятора. Траектория движения цифрового двойника формировалась за счет работы адаптивного регулятора, основанного на внутренней модели.

В ходе эксперимента рассмотрен пример, в котором данные о положении звеньев манипулятора в реальном времени известны, а задающее воздействие, формирующее траекторию движения звеньев, неизвестно. Поставлена задача — оценить параметры задающей траектории и сформировать управляющий сигнал цифрового двойника для двух звеньев робота-манипулятора.

Сигнал управления роботом-манипулятором в реальном времени получен с помощью хаотических ге-

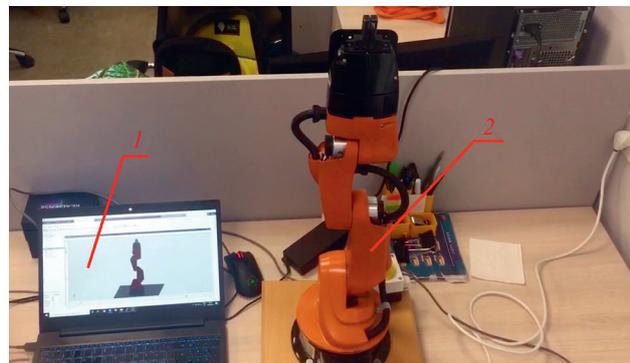


Рис. 1. Макет экспериментального стенда:

1 — обрабатывающий центр в виде среды моделирования MATLAB Simulink, содержащий цифрового двойника системы; 2 — робот-манипулятор KUKA youBot

Fig. 1. Experimental setup: 1 — simulation system in MATLAB Simulink which includes digital twin; 2 — robotic manipulator KUKA youBot

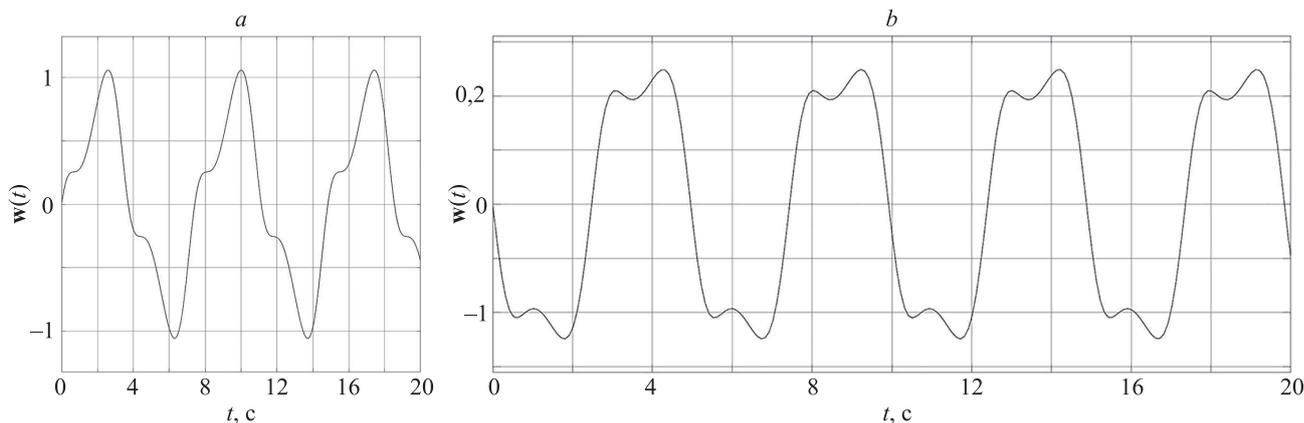


Рис. 2. Задающее воздействие: для первого (а) и третьего (b) звеньев манипулятора
 Fig. 2. External disturbance: for first (a) and third (b) manipulator links

нераторов нелинейной траектории для двух звеньев манипулятора вида (1) и (2) с умножением результирующего вектора на коэффициент k . Для первого звена параметры генератора заданы вручную: $\theta_1 = \theta_2 = \theta_3 = 1$; $k = -1$ для третьего звена $\theta_1 = 1$; $\theta_2 = \theta_3 = 2$; $k = 0,1$. Результирующая траектория задающего сигнала представлена на рис. 2, а для первого звена и на рис. 2, б — для третьего. Ручной способ формирования траектории задающего воздействия позволил оценить точность работы адаптивного алгоритма оценки путем сравнения выходного сигнала регулятора и задающего воздействия.

Отметим, что существующее ограничение на применяемое количество звеньев, для траектории которых может быть произведена адаптивная оценка, обусловлено ограничениями технической базы. В настоящей работе для доказательства возможности формирования цифрового двойника многосвязного механизма проведена оценка двух звеньев в реальном времени.

В результате получено отклонение данных, получаемых с датчика положения поворота звена, от входного управляющего сигнала, что вызвано задержкой отправки сигнала по протоколу TCP/IP, а также физических сопротивлений при движении звеньев манипулятора.

Адаптивный регулятор, основанный на использовании внутренней модели, предназначен для решения этой проблемы. Получая данные о реальном положении, система выполнила оценку параметров траектории движения и сформировала управляющий сигнал, подаваемый на цифровой двойника. Ошибка слежения вычислена путем сравнения эталонного задающего воздействия и выходного сигнала адаптивного регулятора. На рис. 3 приведены графики ошибки слежения $e(t)$ по первому и третьему звеньям. Была решена задача попасть в область $[-0,005, 0,005]$ рад по ошибке слежения. Колебания в области нуля вызваны шумами измерения.

Из рис. 3 видно перерегулирование выходного сигнала регулятора, что связано с особенностями работы систем реального времени в среде MATLAB, а также шумами измерений. Однако, учитывая поставленную цель, можно сделать вывод, что экспериментальная апробация такого метода формирования цифрового двойника прошла успешно. Цифровой двойник успешно повторил движения робота-манипулятора, форма сигнала слежения совпала с формой задающего воздействия, и ошибка слежения попала в установленную область.

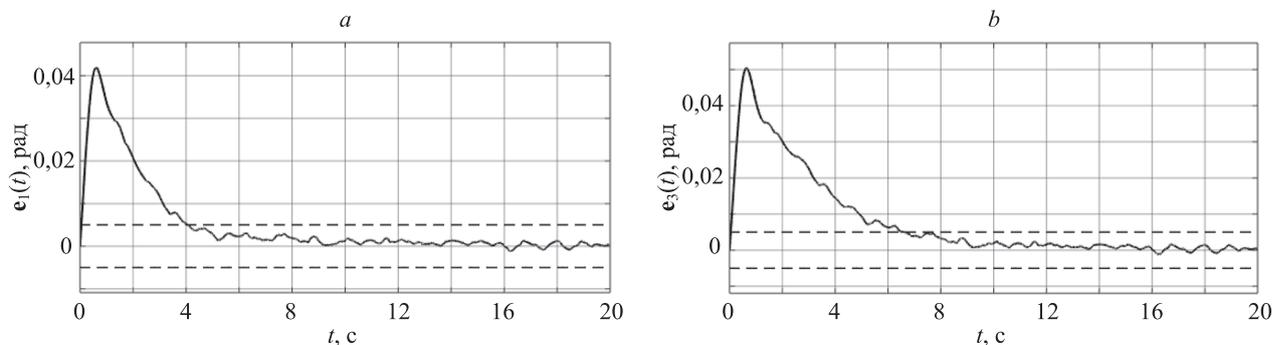


Рис. 3. Графики ошибки слежения траектории движения: первого (а) и третьего (b) звеньев робота-манипулятора. Пунктирными линиями показана заданная область

Fig. 3. Movement tracking error graphs: for first (a) and third (b) manipulator links. Tracking goal shown on graphs between dotted lines

Заключение

В ходе проведения экспериментальной апробации адаптивного алгоритма оценки нелинейной траектории движения установлена возможность использования алгоритма для успешного формирования траектории цифрового двойника. В качестве дальнейшей работы в данной области можно выделить следующие шаги:

получение информации о положении объекта посредством внешнего наблюдателя, настройка параметров адаптивного регулятора для увеличения точности функционирования в реальном времени, проведение экспериментальной апробации на машине, предназначенной для использования в режиме работы реального времени (Real-Time machine), для оценки точности работы алгоритма.

Литература

1. Rasheed A., San O., Kvamsdal T. Digital twin: Values, challenges and enablers from a modeling perspective // *IEEE Access*. 2020. V. 8. P. 21980–22012. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2970143>
2. He B., Bai K.J. Digital twin-based sustainable intelligent manufacturing: A review // *Advances in Manufacturing*. 2021. V. 9. N 1. P. 1–21. <https://doi.org/10.1007/s40436-020-00302-5>
3. Cimino C., Negri E., Fumagalli L. Review of digital twin applications in manufacturing // *Computers in Industry*. 2019. V. 113. P. 103130. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2019.103130>
4. Madni A.M., Madni C.C., Lucero S.D. Leveraging digital twin technology in model-based systems engineering // *Systems*. 2019. V. 7. N 1. P. 7. <https://doi.org/10.3390/systems7010007>
5. Tao F., Zhang H., Liu A., Nee A.Y.C. Digital twin in industry: State-of-the-art // *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2019. V. 15. N 4. P. 2405–2415. <https://doi.org/10.1109/TII.2018.2873186>
6. Lu Y., Liu C., Wang K.-K., Huang H., Xu X. Digital Twin-driven smart manufacturing: Connotation, reference model, applications and research issues // *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2020. V. 61. P. 101837. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2019.101837>
7. Shahat E., Hyun C.T., Yeom C. City digital twin potentials: A review and research agenda // *Sustainability*. 2021. V. 13. N 6. P. 3386. <https://doi.org/10.3390/su13063386>
8. Bilberg A., Malik A.A. Digital twin driven human–robot collaborative assembly // *CIRP Annals*. 2019. V. 68. N 1. P. 499–502. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2019.04.011>
9. Gromov V., Borisov O., Vedyakov A., Pyrkin A., Shavetov S., Bobtsov A., Salikhov V., Aranovskiy S. Adaptive multisinusoidal signal tracking system with input delay // *IFAC-PapersOnLine*. 2016. V. 49. N 13. P. 105–110. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.07.935>
10. Huang J. *Nonlinear Output Regulation: Theory and Applications*. SIAM, 2004. 318 p. <https://doi.org/10.1137/1.9780898718683>
11. Isidori A., Marconi L. Shifting the internal model from control input to controlled output in nonlinear output regulation // *Proc. of the 51st IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*. 2012. P. 4900–4905. <https://doi.org/10.1109/CDC.2012.6426464>
12. Astolfi D., Isidori A., Marconi L., Praly L. Nonlinear output regulation by post-processing internal model for multi-input multi-output systems // *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)*. 2013. V. 9. N 1. P. 295–300. <https://doi.org/10.3182/20130904-3-FR-2041.00118>
13. Pyrkin A., Isidori A. Adaptive output regulation of invertible mimo systems // *IFAC-PapersOnLine*. 2017. V. 50. N 1. P. 5498–5503. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.1089>
14. Pyrkin A., Isidori A. Output regulation for robustly minimum-phase multivariable nonlinear systems // *Proc. of the 56th IEEE Annual Conference on Decision and Control (CDC)*. 2017. P. 873–878. <https://doi.org/10.1109/CDC.2017.8263769>
15. Zapateiro M., Vidal Y., Acho L. A secure communication scheme based on chaotic duffing oscillators and frequency estimation for the transmission of binary-coded messages // *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*. 2014. V. 19. N 4. P. 991–1003. <https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2013.07.029>

References

1. Rasheed A., San O., Kvamsdal T. Digital twin: Values, challenges and enablers from a modeling perspective. *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 21980–22012. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2970143>
2. He B., Bai K.J. Digital twin-based sustainable intelligent manufacturing: A review. *Advances in Manufacturing*, 2021, vol. 9, no. 1, pp. 1–21. <https://doi.org/10.1007/s40436-020-00302-5>
3. Cimino C., Negri E., Fumagalli L. Review of digital twin applications in manufacturing. *Computers in Industry*, 2019, vol. 113, pp. 103130. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2019.103130>
4. Madni A.M., Madni C.C., Lucero S.D. Leveraging digital twin technology in model-based systems engineering. *Systems*, 2019, vol. 7, no. 1, pp. 7. <https://doi.org/10.3390/systems7010007>
5. Tao F., Zhang H., Liu A., Nee A.Y.C. Digital twin in industry: State-of-the-art. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2019, vol. 15, no. 4, pp. 2405–2415. <https://doi.org/10.1109/TII.2018.2873186>
6. Lu Y., Liu C., Wang K.-K., Huang H., Xu X. Digital Twin-driven smart manufacturing: Connotation, reference model, applications and research issues. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2020, vol. 61, pp. 101837. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2019.101837>
7. Shahat E., Hyun C.T., Yeom C. City digital twin potentials: A review and research agenda. *Sustainability*, 2021, vol. 13, no. 6, pp. 3386. <https://doi.org/10.3390/su13063386>
8. Bilberg A., Malik A.A. Digital twin driven human–robot collaborative assembly. *CIRP Annals*, 2019, vol. 68, no. 1, pp. 499–502. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2019.04.011>
9. Gromov V., Borisov O., Vedyakov A., Pyrkin A., Shavetov S., Bobtsov A., Salikhov V., Aranovskiy S. Adaptive multisinusoidal signal tracking system with input delay. *IFAC-PapersOnLine*, 2016, vol. 49, no. 13, pp. 105–110. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.07.935>
10. Huang J. *Nonlinear Output Regulation: Theory and Applications*. SIAM, 2004, 318 p. <https://doi.org/10.1137/1.9780898718683>
11. Isidori A., Marconi L. Shifting the internal model from control input to controlled output in nonlinear output regulation. *Proceedings of the 51st IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*, 2012, pp. 4900–4905. <https://doi.org/10.1109/CDC.2012.6426464>
12. Astolfi D., Isidori A., Marconi L., Praly L. Nonlinear output regulation by post-processing internal model for multi-input multi-output systems. *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)*, 2013, vol. 9, no. 1, pp. 295–300. <https://doi.org/10.3182/20130904-3-FR-2041.00118>
13. Pyrkin A., Isidori A. Adaptive output regulation of invertible mimo systems. *IFAC-PapersOnLine*, 2017, vol. 50, no. 1, pp. 5498–5503. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.1089>
14. Pyrkin A., Isidori A. Output regulation for robustly minimum-phase multivariable nonlinear systems. *Proc. of the 56th IEEE Annual Conference on Decision and Control (CDC)*, 2017, pp. 873–878. <https://doi.org/10.1109/CDC.2017.8263769>
15. Zapateiro M., Vidal Y., Acho L. A secure communication scheme based on chaotic duffing oscillators and frequency estimation for the transmission of binary-coded messages. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2014, vol. 19, no. 4, pp. 991–1003. <https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2013.07.029>

Авторы

Мешков Алексей Викторович — аспирант, инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 57222576415](https://orcid.org/0000-0001-9981-8299), <https://orcid.org/0000-0001-9981-8299>, avmeshkov@itmo.ru

Громов Владислав Сергеевич — кандидат технических наук, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 57196959497](https://orcid.org/0000-0002-2416-3766), <https://orcid.org/0000-0002-2416-3766>, gromov@itmo.ru

Authors

Aleksei V. Meshkov — PhD Student, Engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 57222576415](https://orcid.org/0000-0001-9981-8299), <https://orcid.org/0000-0001-9981-8299>, avmeshkov@itmo.ru

Vladislav S. Gromov — PhD, Associate Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 57196959497](https://orcid.org/0000-0002-2416-3766), <https://orcid.org/0000-0002-2416-3766>, gromov@itmo.ru

Статья поступила в редакцию 05.05.2022
Одобрена после рецензирования 14.07.2022
Принята к печати 21.09.2022

Received 05.05.2022
Approved after reviewing 14.07.2022
Accepted 21.09.2022



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»