

АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ РОБОТОМ-МАНИПУЛЯТОРОМ С ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ СХЕМОЙ

Д. ДОБРИБОРЩ, С. А. КОЛЮБИН

*Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: dmitrii.dobriborsci@corp.ifmo.ru*

Представлены результаты разработки и экспериментальной апробации робота-манипулятора параллельной кинематики, предназначенного для решения задач динамического манипулирования. Подобные системы широко используются в авиа- и автосимуляторах, при автоматизации производства, например в задачах быстрой сортировки. Преимущества использования роботов-манипуляторов с параллельной кинематической схемой объясняется их высокой скоростью и точностью позиционирования при работе в ограниченном рабочем пространстве. По результатам работы построена робототехническая платформа Стюарта с двумя степенями свободы, оснащенная системой технического зрения. Интеграция системы выполнена в среде разработки MatLab/Simulink. Представлена математическая модель системы, апробированы два алгоритма адаптивного управления по выходу, расширенные на класс дискретных систем, и проведен их сравнительный анализ.

Ключевые слова: *адаптивное управление, робототехника, манипулятор, последовательный компенсатор, дискретные системы, техническое зрение*

Введение. В настоящее время разработка алгоритмов управления роботами-манипуляторами с параллельной кинематической схемой является актуальной проблемой в задачах динамического манипулирования, т.е. без применения устройств схвата. Подобные системы обладают рядом преимуществ по сравнению с манипуляторами с последовательной схемой: замкнутость кинематической схемы, робастность, высокая точность позиционирования механизма в целом. Подвижные параллельные части обеспечивают уменьшение нагрузки на приводы, что приводит к улучшению динамики и точности системы. Подобные системы находят применение в автосимуляторах, тренажерах для водителей автомобилей и в задачах быстрой сортировки на производстве.

Разработанный в рамках данного исследования робототехнический комплекс в общем случае представляет собой параллельный робот-манипулятор, одна из основных задач которого заключается в перемещении с места на место какого-либо объекта. Общим решением данной задачи является оснащение манипулятора устройством, позволяющим осуществлять схват предмета. При проектировании захватного устройства учитываются все силы, которые могут действовать на объект во время движения, а также процесс схвата и его траектория. Однако при больших массогабаритных параметрах объекта такой подход может оказаться неприменим. В задачах динамического манипулирования целесообразно использование таких приемов, как толкание, бросок, удар, наклоны, что в результате позволяет расширить области применения роботов-манипуляторов в промышленном мире [1].

В ходе исследований проанализированы существующие решения в данной области. Например, в работе [2] представлена разработка лабораторного стенда наклонной платформы с двумя степенями свободы, реализующего управление движением объекта на прямоугольной платформе с использованием системы технического зрения на базе программируемой логической интегральной схемы. Расчет закона управления выполняется на цифровом контроллере. Приведены результаты экспериментальной апробации пропорционально-интегрально-

дифференциального регулятора (ПИД-регулятора) с наблюдателем состояний в цепи обратной связи.

В работе [3] для аналогичной платформы при решении задач стабилизации объекта в заданных координатах и перемещения объекта из точки в точку предлагается использовать алгоритмы управления на основе нечеткой логики. Управление платформой, реализованное на базе прогнозирующей модели, описывается в работе [4]: в первую очередь авторами произведено моделирование в математическом пакете MatLab/Simulink и по его итогам проведен эксперимент.

В настоящей статье представлены результаты разработки параллельного робота-манипулятора с двумя степенями свободы и апробированы алгоритмы адаптивного управления по выходу, в отличие от известных решений. Ранее, в работе [5], представлены результаты моделирования адаптивной системы управления по выходной переменной в непрерывном времени. В ходе исследования, описываемого в настоящей статье, апробирован метод последовательного компенсатора и проведен сравнительный анализ этого метода и адаптивного алгоритма по выходной переменной.

Робототехнический комплекс. Разработанный робототехнический комплекс, функциональная схема которого приведена на рис. 1, а, содержит платформу прямоугольной формы, положение которой регулируется двумя сервоприводами, установленными на основании. Валы приводов, оснащенные звеньями, с помощью шарнирного соединения прикрепляются к платформе. Для определения координат центра объекта используется система компьютерного зрения (КЗ), где генерируются законы управления (ЗУ) для соответствующих осей X и Y . Пакет данных объемом 2 байта, содержащий значения углов θ_x , θ_y , поворота двигателей $D(x)$ и $D(y)$, отправляется по USB-интерфейсу на управляющую плату (УП), где пакет проверяется на целостность, и сигналы поступают непосредственно на двигатели. Получив команду поворота на необходимый угол, сервоприводы приводят платформу в движение. Кинематическая схема мехатронного модуля (ММ) показана на рис. 1, б.

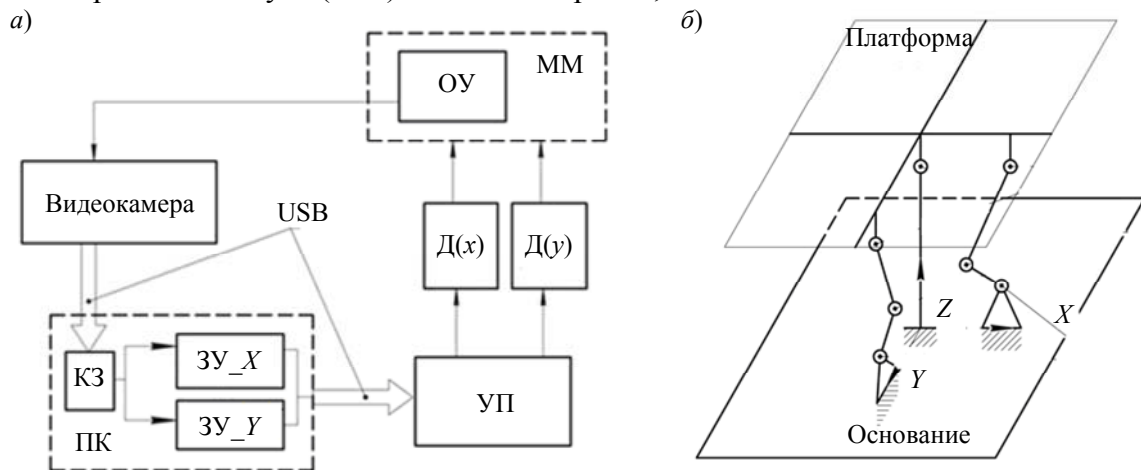


Рис. 1

В качестве исполнительных устройств установлены сервоприводы DFROBOT модели DF05BB с типом разъема JR. Для обработки сигналов, получаемых с рабочей станции по интерфейсу USB, выбран одноплатный компьютер DFRduino RoMeo. Программирование контроллера осуществляется в среде разработки Arduino IDE.

Для определения координат объекта (шара) на платформе выбрана система технического зрения на основе веб-камеры [6, 7]. Камера устанавливается на штатив над платформой (рис. 2) таким образом, чтобы угол обзора охватывал рабочее пространство полностью.

В основе принципа распознавания объекта лежит метод выделения из видеопотока, поступающего с веб-камеры, точек, соответствующих цвету объекта. В отличие от [6], где сигнал поступает в формате цветовой модели RGB, в настоящей работе предметом обработки

является модель в градациях серого. Данный шаг предпринят для увеличения скорости обработки видеопотока. Для исключения влияния шумов применяется медианный фильтр, характерный для обработки изображений в автоматическом режиме. Ширина окна фильтрации выбрана равной 3 пкс. Координаты центра шара определяются на основе выделения прямоугольника, описывающего шар черного цвета на платформе (рис. 3).



Рис. 2

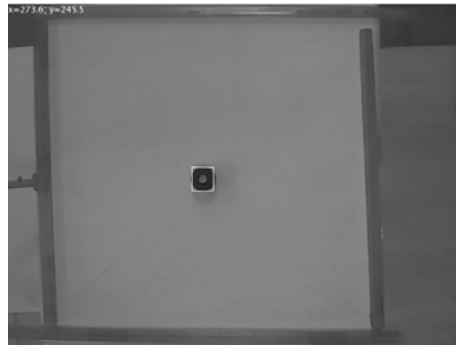
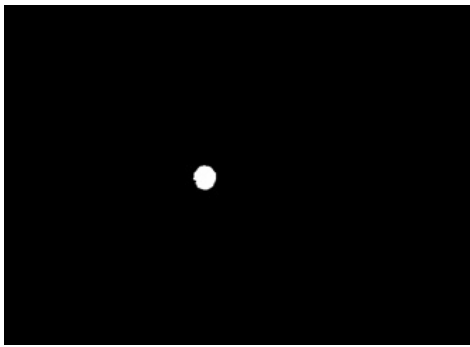


Рис. 3

Математическая модель платформы Стюарта с двумя степенями свободы. Рассмотрим упрощенную модель системы для разработки алгоритмов адаптивного управления по выходу в задаче стабилизации шара в заданных координатах. Примем следующие допущения:

- скольжение шара не учитывается;
- шар однороден;
- не учитываются силы трения;
- шар и поверхность платформы всегда находятся в контакте.

Отметим, что для более сложных экспериментов необходимо рассматривать более подробные модели.

Пусть углы поворота θ_x, θ_y двигателей являются входными параметрами системы, а координаты x, y положения шара — выходными. На основе этих параметров может быть получена передаточная функция. Таким образом, математическая модель системы формируется из нелинейных уравнений

$$\left(m + \frac{I}{r^2}\right)\ddot{x} - m(x\dot{\alpha}^2 + y\dot{\alpha}\dot{\beta}) + mg \sin \alpha = 0;$$

$$\left(m + \frac{I}{r^2}\right)\ddot{y} - m(y\dot{\beta}^2 + x\dot{\alpha}\dot{\beta}) + mg \sin \beta = 0,$$

где m , r , I — масса, радиус и момент инерции шара соответственно; α , β — углы наклона платформы; g — ускорение свободного падения.

Рассмотрим вариант, когда углы наклона платформы достаточно малы, тогда приведенная система уравнений принимает упрощенный вид [8, 9]:

$$\begin{aligned} \left(m + \frac{I}{r^2}\right) \ddot{x} - \frac{2mgd}{l} \theta_x &= 0; \\ \left(m + \frac{I}{r^2}\right) \ddot{y} - \frac{2mgd}{l} \theta_y &= 0, \end{aligned}$$

где l — длина стороны платформы; d — длина соединительных звеньев от вала двигателя к платформе.

Используя преобразование Лапласа, получаем следующие передаточные функции:

$$P_x(s) = \frac{x}{\theta_x} = -\frac{2mgdr^2}{l(mr^2 + I)} \frac{1}{s^2}, \quad P_y(s) = \frac{y}{\theta_y} = -\frac{2mgdr^2}{l(mr^2 + I)} \frac{1}{s^2}.$$

Полученная математическая модель использовалась при синтезе алгоритмов управления.

Алгоритмы адаптивного управления по выходу. Рассмотрим два алгоритма адаптивного управления по выходу: алгоритм λ -слежения, введенный в работе [5], и метод последовательного компенсатора [10—12].

Алгоритм λ -слежения. Разработка алгоритма адаптивного управления состоит из трех этапов. В первую очередь осуществляется синтез наблюдателя, оказывающего информационную поддержку регулятору, разрабатываемому на втором этапе. Настройка регулятора реализуется с помощью параметра, генерируемого алгоритмом адаптации, синтез которого осуществляется на третьем шаге. Многоканальную систему представим как две отдельные одноканальные задачи. Рассмотрим синтез закона управления для канала X (для канала Y будет аналогичным).

Шаг 1. Наблюдатель. Модель наблюдателя, представляющего собой адаптивную версию наблюдателя с высоким коэффициентом усиления [13], в канонической наблюдаемой форме вход—состояние—выход имеет вид

$$\begin{aligned} \hat{e}(k+1) &= \hat{A}_k \hat{e}(k) + \hat{b}_k e(k); \\ e(k) &= x(k) - x_{\text{ref}}(k), \end{aligned}$$

где $\hat{e} \in R^p$,

$$A_\omega(k) = \begin{vmatrix} -p_{p-1}\omega & 1 & 0 & & \\ -p_{p-2}\omega^2 & 0 & 1 & & \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \\ -p_1\omega^{p-1} & 0 & 0 & \ddots & 1 \\ -p_0\omega^p & 0 & 0 & \ddots & 0 \end{vmatrix}, \quad \hat{b}_\omega(k) = \begin{vmatrix} p_{p-1}\omega \\ p_{p-2}\omega \\ \dots \\ p_1\omega^{p-1} \\ p_0\omega^p \end{vmatrix}.$$

Достоинство данного типа наблюдателя заключается в том, что его проектирование возможно даже в случае, когда относительная степень объекта неизвестна. Коэффициент ω генерируется алгоритмом адаптации, представленным ниже.

Шаг 2. Настраиваемый регулятор. Цель управления состоит в обеспечении слежения выхода объекта за эталонным сигналом, пока ошибка не будет сходиться к окрестности Δ , заданной пользователем.

Выберем регулятор следующего вида:

$$\theta_x = -K^T(\omega) \hat{e},$$

где \hat{e} — оценка ошибки $e = x - \hat{x}$, $K(\omega) = [k_0\omega^p, \dots, k_{p-1}\omega]$, k_i — постоянные коэффициенты гурвицева полинома.

Шаг 3. Алгоритм адаптации. Выбор коэффициентов усиления наблюдателя и регулятора осуществляется таким образом, чтобы их значения увеличивались до тех пор, пока ошибка слежения ε не установится в окрестности Δ , задаваемой техническим заданием:

$$\dot{\omega}(t) = \frac{\gamma}{\omega^p} \begin{cases} |\varepsilon| - \lambda, & \text{если } |\varepsilon| > \Delta; \\ 0, & \text{если } |\varepsilon| \leq \Delta, \end{cases}$$

где λ — постоянная величина, определяющая максимальную ошибку Δ ; γ — параметр настраиваемый вручную.

Последовательный компенсатор. Здесь представлен синтез закона управления для многоканальной системы “Ball and Plate”. Разработка алгоритма осуществляется в два этапа. Необходимо получить входные сигналы управления для каждого канала рассматриваемой системы. Для этого воспользуемся методом „последовательного компенсатора“ [10, 11] с адаптивной настройкой параметров регулятора. Следуя результатам, полученным в работах [10, 11], выберем закон управления в виде

$$\begin{aligned} u_x(k) &= -\tilde{k}_x \varphi_x(p) \zeta_x(k), \\ \left. \begin{aligned} \zeta_{11}(k+1) &= \sigma_x \zeta_{12}(k); \\ \zeta_{12}(k+1) &= \sigma_x \zeta_{13}(k); \\ \dots \\ \zeta_{1;p-1}(k+1) &= \sigma_x (-k_{11}\zeta_{11}(k) - k_{12}\zeta_{12}(k) - \dots - k_{1;p-1}\zeta_{1;p-1}(k) + k_{11}y_x(k)); \end{aligned} \right\} \\ \tilde{k}_x &= \kappa_x + \mu_x, \end{aligned}$$

где $\mu_x > 0$, оператор $\varphi_x(p)$ выбирается таким образом, чтобы передаточная функция была строго вещественно положительной, $\sigma_x > \tilde{k}_x$.

Возможный вариант адаптивного алгоритма настройки параметров регулятора — увеличение их значений, до тех пор пока не будет выполнено условие $|y_x(k)| < \Delta$, где Δ — допустимая окрестность.

Для настройки параметра \tilde{k}_x воспользуемся алгоритмом

$$\tilde{k}_x(t) = \int_{t_0}^t \lambda_x(\tau) d\tau,$$

где функция λ_x выбирается как

$$\lambda_x(t) = \begin{cases} \lambda_{0x}, & |x(t)| > \Delta; \\ 0, & |x(t)| \leq \Delta, \end{cases}$$

а для настройки σ_x будем использовать алгоритм

$$\sigma_x(k) = \sigma_{0x} (\tilde{k}_x)^2, \quad \sigma_{0x} > 0.$$

Очевидно, что найдутся такие моменты времени, начиная с которых условие будет выполняться.

Экспериментальная апробация. Экспериментальная апробация адаптивных алгоритмов по выходу была выполнена на платформе Стюарта с двумя степенями свободы. Цель управления — стабилизация шара на плоскости в заданных координатах. Как было сказано ранее, двухканальная система может быть разделена на две системы с одним входом и одним выходом, что позволяет проектировать регуляторы независимо друг от друга. Параметры сис-

темы не используются для разработки регуляторов, необходима только относительная степень. Период дискретизации определен параметрами видеокамеры, которая является самым „медленным“ компонентом системы, и равен $\Delta T=0,01$ с. Результаты экспериментов представлены на рис. 4—7. Координаты x , y положения шара, полученные системой технического зрения, показаны на рис. 4, *a*, *б* соответственно; графики, демонстрирующие ошибку слежения при использовании метода последовательного компенсатора и алгоритма λ -слежения, — на рис. 5, *a*, *б* соответственно. На рис. 6 показаны функции параметров регулятора (метод последовательного компенсатора), а на рис. 7 приведен график изменения параметров алгоритма адаптации.

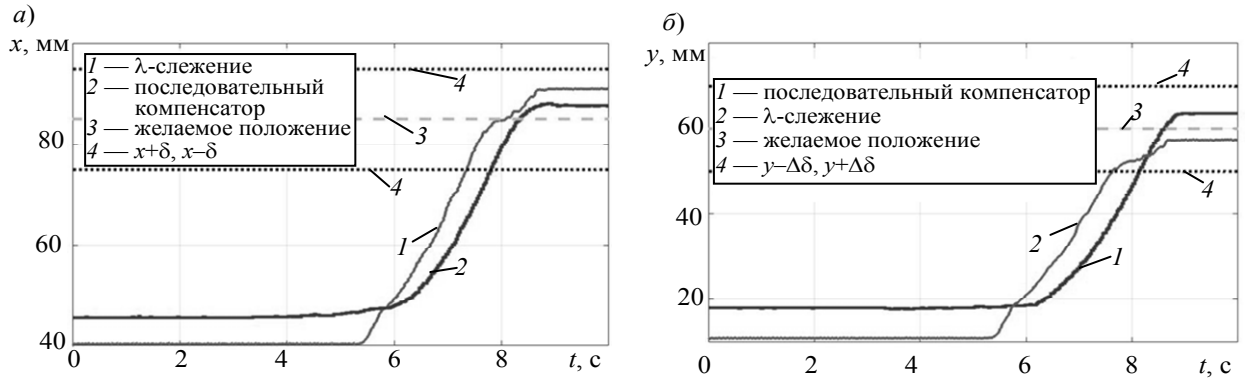


Рис. 4

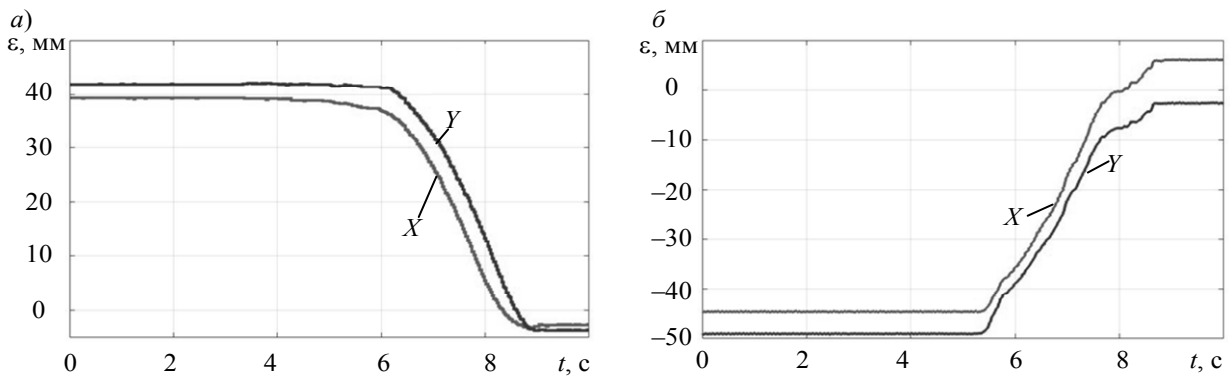


Рис. 5

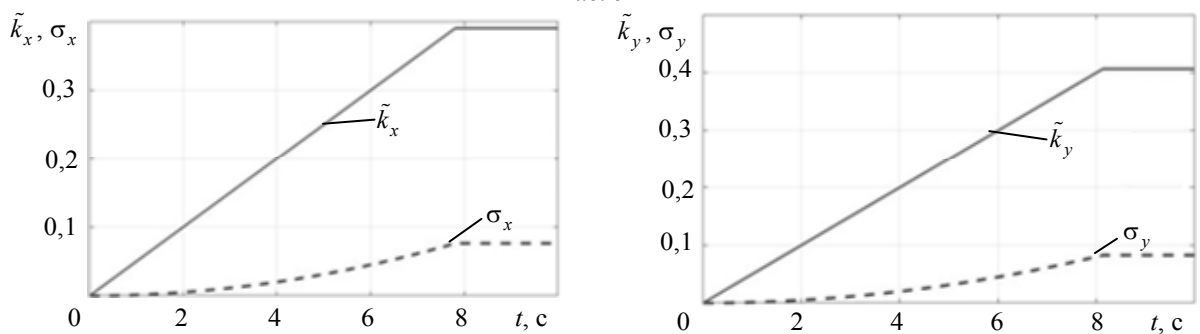


Рис. 6

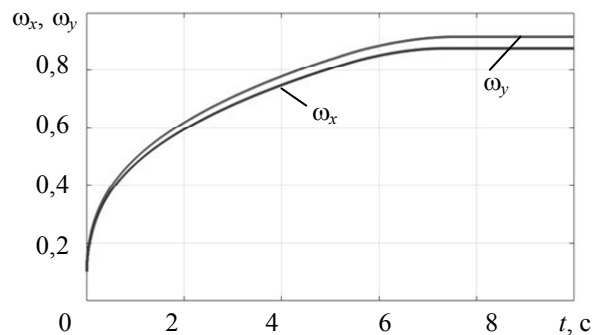


Рис. 7

Заключение. Представлен робот-манипулятор параллельной кинематики — платформа Стюарта с двумя степенями свободы, предназначенный для решения задач динамического манипулирования объектом. Приведены математическая модель многоканальной системы и описание установки. На базе разработанного робототехнического комплекса осуществлена апробация адаптивных алгоритмов управления по выходу в дискретной форме и проведено их сравнение. В будущем планируется заменить систему технического зрения на резистивную сенсорную подложку для сокращения времени определения координат объекта и уменьшения влияния шумов. Направлением перспективных исследований является решение задач траекторного движения, планирования траектории и идентификация модели контакта между объектом и поверхностью платформы.

Работа выполнена при государственной финансовой поддержке Российского научного фонда (проект №17-79-20341).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lynch K. M. Nonprehensile Robotic Manipulation: Controllability and Planning. Pittsburgh, PA: The Robotics Inst., 1996. 222 p.
2. Ming-Tzu Ho, Yusie Rizal, Li-Ming Chu. Visual servoing tracking control of a ball and plate system: design, implementation and experimental validation // Intern. Journal of Advanced Robotic Systems. 2013. Vol. 10, art. 287.
3. Cheng C.-C., Chou C.-C. Fuzzy-based visual servo with path planning for a ball-plate system // Proc. of the 1st Intern. Symp. on Intelligent Computing Systems, Merida, Mexico. 2016. Vol. 597. P. 97—107.
4. Oravec M., Jadlovska A. Model predictive control of a ball and plate laboratory model // Proc. of the 13th IEEE Intern. Symp. on Applied Machine Intelligence and Informatics, Herl'any, Slovakia. 2015. P. 165—170.
5. Bullinger E., Allgöwer F. Adaptive X-tracking for linear systems with higher relative degree. The continuous adaptation case // European Control Conf. Karlsruhe, Germany. 1999.
6. Громов В. С., Власов С. М., Борисов О. И., Пыркин А. А. Система технического зрения для робототизированного макета надводного судна // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2016. Т. 16, № 4. С. 749—752.
7. Шаветов С. В., Ведяков А. А., Бобцов А. А. Система технического зрения в архитектуре системы удаленного управления // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2014. № 2(90). С. 164—166.
8. Aphiratsakun N., Otaryan N. Ball on the plate Model based on PID tuning methods // Proc. of the 13th Intern. Conf. on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology, Thailand. 2016.
9. Mochizuki S., Ichibara H. I-PD Controller Design based on Generalized KYP Lemma for Ball and Plate System. Zurich, 2013.
10. Pyrkin A. A., Bobtsov A. A., Kolyubin S. A., Borisov O. I., Gromov V. S. Output controller for quadcopters based on mathematical model decomposition // Proc. of the 22nd Mediterranean Conf. on Control and Automation. 2014. P. 1281—1286.
11. Bobtsov A. A., Pyrkin A. A., Kolyubin S. A. Simple output feedback adaptive control based on passification principle // Intern. Journal of Adaptive Control and Signal Processing. 2014. Vol. 28, iss. 7—8.
12. Borisov O. I., Gromov V. S., Pyrkin A. A., Bobtsov A. A., Nikolaev N. A. Robotic boat setup for control research and education // IFAC-PapersOnLine. 2016. Vol. 49, N 6.
13. Nicosia S., Tornambe A. High-gain observers in the state and parameter estimation of robots having elastic joints // Syst. Control Lett. 1989. N 13(4). P. 331—337.

Сведения об авторах

Дмитрий Добрибориц

— аспирант; Университет ИТМО; кафедра систем управления и информатики; E-mail: dmitrii.dobriborsci@corp.ifmo.ru

Сергей Алексеевич Колюбин

— канд. техн. наук, доцент; Университет ИТМО; кафедра систем управления и информатики; E-mail: s.kolyubin@corp.ifmo.ru

Рекомендована кафедрой
систем управления и информатики

Поступила в редакцию
21.03.17 г.

Ссылка для цитирования: Добриборщ Д., Колюбин С. А. Адаптивное управление роботом-манипулятором с параллельной кинематической схемой // Изв. вузов. Приборостроение. 2017. Т. 60, № 9. С. 850—857.

ADAPTIVE CONTROL OF PARALLEL KINEMATICS ROBOT MANIPULATOR

D. Dobriborsch, S. A. Kolyubin

*ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia
E-mail: dmitrii.dobriborsci@corp.ifmo.ru*

A parallel kinematics robot manipulator for dynamic manipulation tasks is developed and tested experimentally. Such systems are widely used in aviation and driving simulations, control automation, e. g. for quick sorting tasks. Advantages of robotic manipulators with parallel kinematics are their high speed and positioning accuracy when working in a limited workspace. Based on the described results, a Stewart robotic platform with two degrees of freedom equipped with a vision system was built. The system integration is implemented in MatLab/Simulink. A mathematical model of the system is presented. Two algorithms of output adaptive control are extended to the class of discrete systems are tested, comparative analysis of the algorithms is performed.

Keywords: adaptive control, robotics, manipulator, consecutive compensator, discrete systems, technical vision

Data on authors

- Dmitry Dobriborsch** — Post-Graduate Student; ITMO University, Department of Computer Science and Control Systems; E-mail: dmitrii.dobriborsci@corp.ifmo.ru
- Sergey A. Kolyubin** — PhD, Associate Professor; ITMO University, Department of Computer Science and Control Systems; E-mail: s.kolyubin@corp.ifmo.ru

For citation: Dobriborsch D., Kolyubin S. A. Adaptive control of parallel kinematics robot manipulator. *Journal of Instrument Engineering*. 2017. Vol. 60, N 9. P. 850—857 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2017-60-9-850-857