

ЗАХВАТ ОБЪЕКТОВ РАЗЛИЧНОЙ ФОРМЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИСТЕМЫ ТАКТИЛЬНОГО ОЧУВСТВЛЕНИЯ

К.В. Бажинова

c8.df.mgtu@gmail.com

SPIN-код: 5315-4809

Е.В. Селиверстова

feoktistovaev@mail.ru

SPIN-код: 1463-0001

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

В настоящее время очень актуальны задачи манипулирования различными объектами. Простейшей манипуляционной задачей является захват объекта. Очевидный способ решения такой задачи — приложение силы сжатия, во много раз превышающей силу тяжести объекта. Однако такой подход применим не ко всем объектам, поскольку приложение такой силы может привести к их значительной деформации. В работе рассмотрена задача деликатного захвата объекта произвольной формы с контролем по значению силы сжатия. Предложен закон управления движением шарниров захватного устройства, особенность которого — определение скоростей шарниров на следующем шаге с учетом как силы сжатия, так и скорости шарнира.

Ключевые слова

Деликатный захват, захватное устройство, контроль по силе сжатия, податливость, автоматический захват, тактильное ощущение

Поступила в редакцию 01.02.2018

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018

Введение. В настоящее время прослеживается устойчивая тенденция перехода к роботизированным технологиям. Главное достоинство робототехнических систем — возможность выполнения задач манипулирования объектами при достаточном удалении человека от операционной зоны. Особенно актуальными являются вопросы роботизации операций при работе с взрывоопасными объектами, представляющими угрозу для жизни и здоровья человека.

К простейшим манипуляционным задачам относится захват объекта [1, 2], который является начальным этапом большинства операций. Цель захвата объекта манипулирования (ОМ) — иммобилизация ОМ внутри захватного устройства манипулятора (ЗУМ) в присутствии внешних возмущений. Очевидным способом решения задачи захвата ОМ является приложение к его поверхности со стороны ЗУМ силы, во много раз превышающей силу тяжести ОМ. Однако такой подход неприменим, например, к взрывоопасным ОМ, поскольку приложение такой силы может привести к детонации. Альтернативный подход — деликатный захват ОМ с контролем по значению силы сжатия [3], для которого создано множество ЗУМ [4, 5]. К ним можно отнести трехпальное ЗУМ SDH2 производства немецкой компании Schunk [6].

Описание Schunk SDH2. Захватное устройство манипулятора SDH2 (рис. 1, *a*) оснащено тремя пальцами. Каждый палец i ($i = 1, 2, 3$) имеет две степени свободы — в дистальном шарнире с осью Z_{i1} и в проксимальном шарнире с осью Z_{i2} . Первый и третий пальцы могут одновременно вращаться вокруг своих вертикальных осей Z_{10} и Z_{30} . Обе фаланги каждого пальца снабжены тактильными сенсорами — «искусственной кожей». Сенсоры представляют собой матрицу тензодатчиков (рис. 1, *б*).

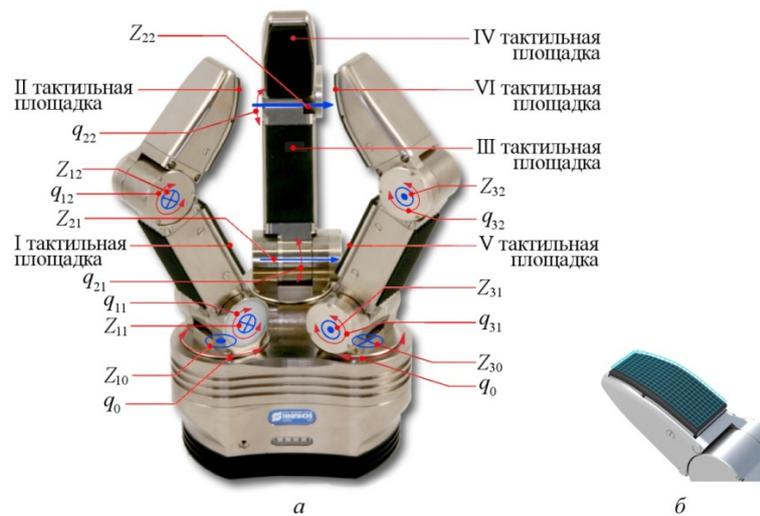


Рис. 1. Общий вид ЗУМ Schunk SDH2:

Z_{i1} — ось дистального шарнира i -го пальца; Z_{i2} — ось проксимального шарнира i -го пальца; Z_{10} и Z_{30} — вертикальные оси первого и третьего пальцев соответственно; q_{i1} — угол вращения дистального шарнира i -го пальца; q_{i2} — угол вращения проксимального шарнира i -го пальца; q_0 — угол вращения шарнира, соответствующего повороту вокруг вертикальных осей первого и третьего пальцев

Захватное устройство манипулятора SDH2 позволяет производить захват ОМ различной формы. При захвате прямоугольного параллелепипеда в зависимости от двупалого или трехпалого захвата в контакте участвуют дистальные фаланги двух либо трех пальцев (рис. 2, *a*). При захвате шарообразного ОМ в контакте участвуют проксимальные и дистальные фаланги всех пальцев (рис. 2, *б*). При захвате цилиндра сбоку в зависимости от способа захвата в контакте находятся проксимальные и дистальные фаланги двух либо трех пальцев (рис. 2, *в*), а при захвате цилиндра с торца — дистальные фаланги всех трех пальцев (рис. 2, *г*).

Если форма поверхности, положение и ориентация объекта заранее известны, можно подвести фаланги ЗУМ SDH2 к поверхности ОМ, а затем продолжить движение шарниров, которые будут перемещать участвующие в захвате звенья ЗУМ до тех пор, пока контактные силы не достигнут желаемых значений.

Решение проблемы деликатного захвата ОМ с контролем по значению силы сжатия усложняется, когда форма поверхности объекта заранее неизвестна.

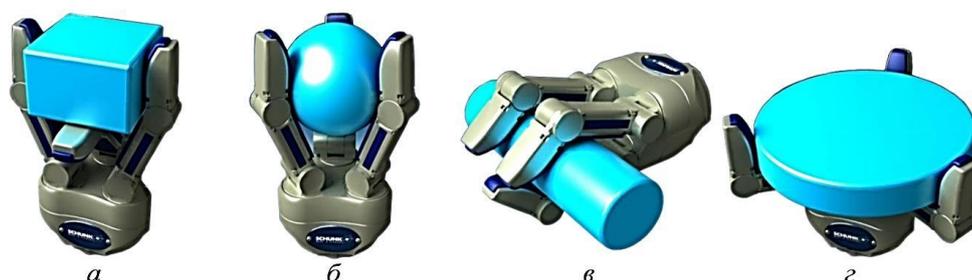


Рис. 2. Захват ОМ различной формы

Постановка задачи. Рассмотрим захват ОМ неизвестной формы с использованием ЗУМ SDH2. Конфигурация ЗУМ и количество фаланг, участвующих в захвате, определяются непосредственно в ходе захвата ОМ. Пусть в начальный момент времени ЗУМ SDH2 находится в раскрытом состоянии — все пальцы отогнуты. Затем фаланги начинают двигаться по направлению к центру ЗУМ. Движение каждой фаланги происходит независимо от движения других фаланг.

Введем для шарниров и тактильных площадок ЗУМ SDH2 нумерацию, как показано на рис. 1, а. Каждому шарниру соответствует тактильная площадка, технологически расположенная над каждым шарниром (кроме нулевого, посредством которого осуществляется поворот первого и третьего пальца вокруг вертикальных осей Z_{10} и Z_{30}).

Законы управления Schunk SDH2 при деликатном захвате ОМ. Для деликатного захвата ОМ можно предложить несколько алгоритмов работы. Очевидный алгоритм работы основан на рекомендациях, представленных в РФ [7]. Здесь управление шарнирами ЗУМ осуществляется в податливом режиме: для каждого шарнира задается скорость перемещения, пропорциональная разнице между желаемым и достигнутым значениями силы контактного взаимодействия. Закон управления i -м шарниром ($i = 1, 2, \dots, 6$) имеет вид

$$\dot{q}_{i,j+1} = k_i(F_{\text{ж}} - F_{i,j}),$$

где $\dot{q}_{i,j+1}$ — скорость i -го шарнира на шаге $j+1$, °/с; k_i — весовой коэффициент для i -го шарнира, определяющий степень влияния внешней силы на скорость шарнира; $F_{\text{ж}}$ — желаемая сила контактного взаимодействия ОМ со звеньями ЗУМ; $F_{i,j}$ — сила, действующая на i -й сенсор на шаге j .

При таком законе управления шарнир будет двигаться, пока сила не станет равной желаемому значению. Поскольку в рассматриваемой дискретной системе управления присутствуют задержки, добиться заданного значения контактной силы в общем случае невозможно, поэтому захват будет неустойчивым.

Уменьшению амплитуды колебаний (а значит, увеличению устойчивости захвата) способствует уменьшение коэффициента k_i . Недостатки такого подхода — увеличение времени переходного процесса захвата и наличие всплесков амплитуды силы контактного взаимодействия, что неприемлемо при работе с взрывоопасными ОМ.

Чтобы захват был устойчивым и лишенным перечисленных недостатков, вводят диапазон сил, при котором движение шарнира прекращается [8].

Закон управления i -м шарниром ($i = 1, 2, \dots, 6$) для этого случая принимает вид

$$\begin{cases} \dot{q}_{i,j+1} = k_i(F_{\min} - F_{ij}), & F_{ij} < F_{\min}, \\ \dot{q}_{i,j+1} = 0, & F_{\min} \leq F_{ij} \leq F_{\max}, \\ \dot{q}_{i,j+1} = k_i(F_{\max} - F_{ij}), & F_{\max} < F_{ij}, \end{cases}$$

где F_{\min} и F_{\max} — минимальная и максимальная сила контактного взаимодействия соответственно.

При таком законе управления возможен устойчивый захват ОМ. Недостаток этого подхода — значительный разброс значений силы захвата: сила сжатия находится между минимальным и максимальным заданными значениями.

Ввиду выявленного недостатка целесообразно отказаться от следящих контуров, в которых значение скорости шарнира зависит только от значения силы, и использовать закон управления, позволяющий при расчете скорости помимо силы учитывать также скорость шарнира. Закон управления i -м шарниром ($i = 1, 2, \dots, 6$) здесь имеет вид

$$\begin{cases} \dot{q}_{i,j+1} = k_i(F_{\min} - F_{ij}), & F_{ij} < F_{\min}, \dot{q}_{ij} \geq 0, \\ \dot{q}_{i,j+1} = k'_i(F_{\min} - F_{ij}), & F_{ij} < F_{\min}, \dot{q}_{ij} < 0, \\ \dot{q}_{i,j+1} = 0, & F_{\min} \leq F_{ij} \leq F_{\max}, \\ \dot{q}_{i,j+1} = k_i(F_{\max} - F_{ij}), & F_{\max} < F_{ij}, \dot{q}_{ij} \leq 0, \\ \dot{q}_{i,j+1} = k'_i(F_{\max} - F_{ij}), & F_{\max} < F_{ij}, \dot{q}_{ij} > 0, \end{cases}$$

где k'_i — весовой коэффициент для i -го шарнира, определяющий степень влияния внешней силы на скорость шарнира. Коэффициент k'_i меньше аналогично-го весового коэффициента k_i .

Весовой коэффициент k'_i применяют для расчета скорости на следующем итерационном шаге в двух случаях: 1) при отрицательном направлении движения фаланги (от поверхности ОМ), когда сила сжатия меньше заданного значения; 2) при положительном направлении движения фаланги (к поверхности ОМ), когда сила сжатия больше заданного значения. При таких условиях на следующем шаге можно достичь желаемого диапазона силы сжатия.

Управление скоростью нулевого шарнира осуществляется на основе анализа положения пятен контактов тактильных площадок первого и третьего пальца с объектом манипулирования. Если контакт приходится на левую половину тактильных матриц для первого пальца и на правую — для второго, то шарнир движется в положительном направлении (пальцы поворачиваются друг к другу). Если пятна контактов для первого пальца располагаются в правой половине тактильных матриц, а для второго — в левой, то поворот происходит в отрицательном направлении. Поворот осуществляется с заданной скоростью и продолжается до тех пор, пока не будет достигнуто соответствие положения пятен контактов для обоих пальцев центральным столбцам тактильных матриц.

Преимущество предложенного закона управления — компромисс между увеличением устойчивости захвата и уменьшением ширины диапазона значений, которые может принимать сила сжатия.

Программная реализация закона управления Schunk SDH2. Выявлен ряд недочетов работы системы управления — высокий шум значений скоростей шарниров, разные данные тактильных датчиков при одинаковых внешних воздействиях и шумы этих сигналов.

Проблема различий в показаниях тактильных датчиков была решена введением коррекционных коэффициентов. Для этого зарегистрированы показания каждого горизонтально ориентированного датчика, на который подано одинаковое воздействие (в виде груза известной массой m), приложенное в центр датчика. Значения коэффициентов вычислены с помощью пропорции, основанной на равенстве показаний датчиков при одинаковых воздействиях, умноженных на соответствующие коррекционные коэффициенты:

$$n_i = \frac{F_i}{mg} \quad (i = 1, 2, \dots, 6),$$

где n_i — коэффициент пропорциональности для i -го тактильного датчика; F_i — значение силы, приходящей с i -го тактильного датчика.

Проблема шумов решена путем использования фильтра Кальмана [9, 10]. При программной реализации приняты следующие упрощения: матрица перехода между состояниями — единичная; матрица управляющего воздействия — нулевая; матрица, определяющая отношение между измерениями и состоянием системы, — единичная.

Экспериментальные исследования. Результат фильтрации сигналов скоростей \dot{q} с использованием фильтра Кальмана с учетом оговоренных упрощений представлен на рис. 3. Степень сглаживания определяют значения матрицы ковариации шума процесса и матрицы ковариации шума измерений фильтра.

Анализ представленных на рис. 3 результатов позволяет сделать следующие выводы. Введение фильтра Кальмана позволило сгладить сигналы угловых скоростей шарниров, уменьшить амплитуду всплесков этих сигналов. Задержку внесенной фильтрацией сигналов скоростей можно считать малой, поскольку

отставание показаний скорости при выбранном алгоритме управления и заданных скоростях вращения шарниров пальцев не приведет к значительным погрешностям в работе ЗУМ в режиме деликатного захвата.

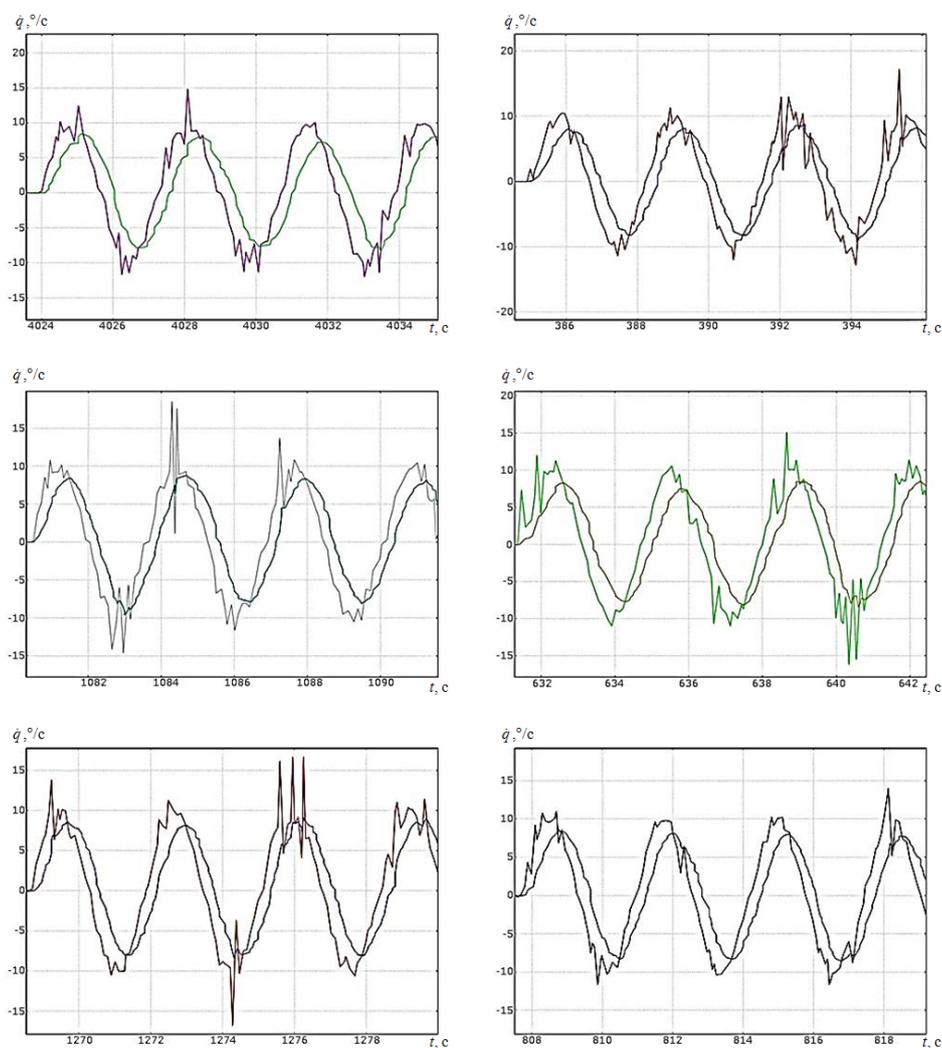


Рис. 3. Результат фильтрации скоростей с помощью фильтра Кальмана

Показания скоростных и тактильных датчиков работы кисти в режиме деликатного захвата упругого объекта цилиндрической формы в графическом виде показаны на рис. 4.

На второй секунде происходит контакт с объектом, скорости перестают увеличиваться. После третьей секунды силы достигают разрешенных значений, скорости стремятся к нулю. На пятой секунде на объект начинает действовать внешняя сила и система выходит из равновесия. После прекращения этого воздействия система снова приходит в устойчивое состояние на восьмой секунде.

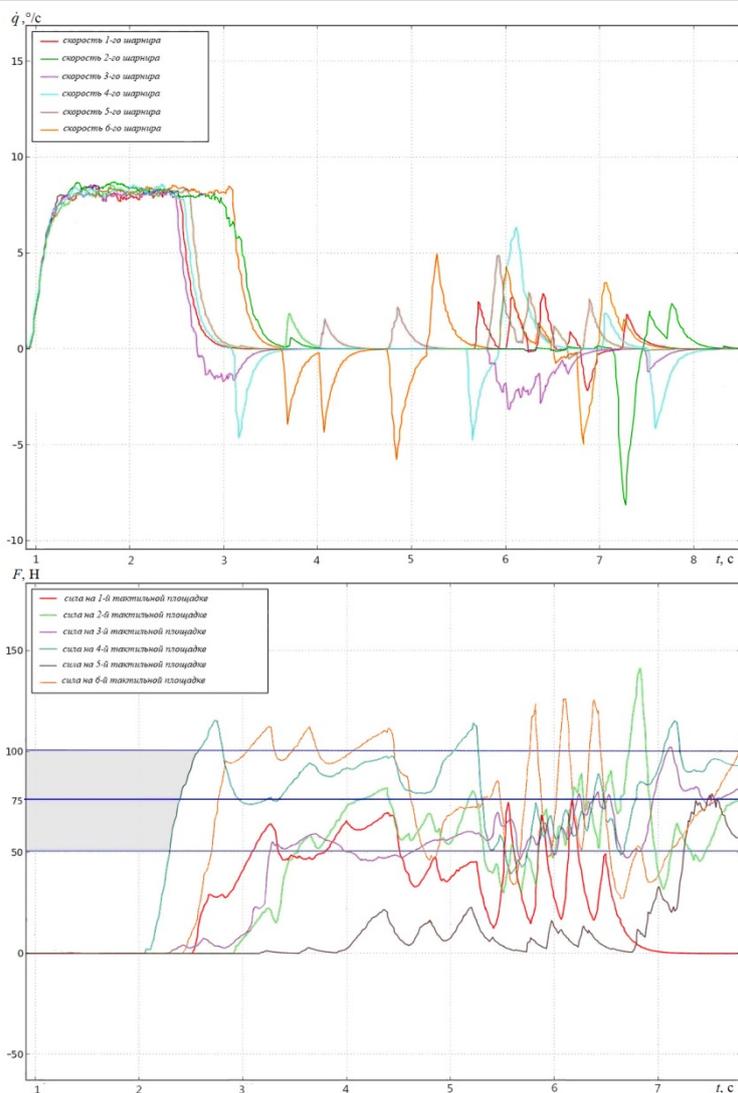


Рис. 4. Изменение скоростей и сил при захвате упругого объекта цилиндрической формы

Заключение. В статье рассмотрена задача деликатного захвата ОМ произвольной формы с контролем по значению силы сжатия. Рассмотрены законы управления движением шарниров ЗУМ Schunk SDH2 для реализации поставленной задачи. Определены их недостатки — неустойчивость и разброс значений силы захвата. Предложен закон управления движением шарниров, особенностью которого является учет как силы сжатия, так и знака скорости шарнира для определения скоростей шарниров ЗУМ на следующем шаге.

Предложенный закон управления программно реализован. Выявлен ряд недочетов работы ЗУМ — высокий шум сигналов угловых скоростей шарниров, разные данные тактильных датчиков при одинаковых внешних воздействиях и шумы этих сигналов. Перечисленные недостатки устранены путем введения

фильтра Кальмана и коррекционных коэффициентов. Результаты экспериментальных исследований показали работоспособность и устойчивость алгоритма деликатного захвата ОМ, в том числе и при внешних возмущающих воздействиях.

Литература

- [1] Лесков А.Г., Илларионов В.В., Калеватых И.А., Морошкин С.Д., Бажинова К.В., Феоктистова Е.В. Аппаратно-программный комплекс для решения задач автоматического захвата объекта манипуляторами. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2015, № 1 (37).
URL: <http://engjournal.ru/catalog/pribor/robot/1361.html> (дата обращения 18.12.2017).
- [2] Saxena A., Driemeyer J., Ng A.Y. Robotic grasping of novel objects using vision. *The International Journal of Robotics Research*, 2008, vol. 27, no. 2, pp. 157–173.
- [3] Romano J.M., Hsiao K., Niemeyer G., Chitta S., Kuchenbecker K.J. Human-inspired robotic grasp control with tactile sensing. *IEEE Transactions on Robotics*, 2011, vol. 27, no. 6, pp. 1067–1079.
- [4] Robotiq 3-finger adaptive robot gripper. URL: <https://robotiq.com/products/3-finger-adaptive-robot-gripper> (дата обращения 15.12.2017).
- [5] BarrettHand overview. URL: <http://barrett.com/products-hand.htm> (дата обращения 15.12.2017).
- [6] SDH. URL: https://schunk.com/de_en/gripping-systems/series/sdh/ (дата обращения 15.12.2017).
- [7] Титов В.В. Алгоритм управления податливым движением манипулятора с упругими элементами в шарнирных сочленениях. *Известия вузов. Приборостроение*, 2012, т. 55, № 11, с. 29–33.
- [8] Егоров И.Н., Кобзев А.А., Мишулин Ю.Е., Немонтов В.А. *Управление мехатронными и робототехническими системами с силомоментным чувствлением*. Владимир, Владимирский государственный университет, 2005, 270 с.
- [9] Welch G., Bishop G. *An introduction to the Kalman filter*. University of North Carolina, 2001, 50 p.
- [10] Перов А.И. *Статистическая теория радиотехнических систем*. Москва, Радиотехника, 2003, 400 с.

Бажинова Ксения Владимировна — аспирантка кафедры «Специальная робототехника и мехатроника», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Селиверстова Елена Владимировна — аспирантка кафедры «Специальная робототехника и мехатроника», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

SEIZING THE ITEMS OF VARIOUS FORMS BY UTILIZING THE TACTILE SENSING SYSTEM

K.V. Bazhinova

c8.df.mgtu@gmail.com

SPIN-code: 5315-4809

E.V. Seliverstova

feoktistovaev@mail.ru

SPIN-code: 1463-0001

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The problems of manipulating different objects are currently very important. The simplest manipulative task is seizing the item. The obvious way of solving this task is applying the strength of grip greatly exceeding the item's gravitational force. However, such an approach cannot be applied to all the items because the application of such force can result in their significant deformation. This work considers the problem of delicate seizing the free-form object with the control by value of the strength of grip. We introduce a law of controlling the gripping device joints motion. A special feature of this law is joints speed sensing on the following step with account of both the strength of grip and the joint speed.

Keywords

Delicate seizing, gripping device, control by value of the strength of grip, compliance, automatic seizure, tactile sensing

© Bauman Moscow State Technical University, 2018

References

- [1] Leskov A.G., Illarionov V.V., Kalevtykh I.A., Moroshkin S.D., Bazhinova K.V., Feoktistova E.V. Hardware-software complex for solving the task of automatic capture of the object with manipulators. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering Journal: Science and Innovation], 2015, no. 1 (37). Available at: <http://engjournal.ru/catalog/pribor/robot/1361.html> (accessed 18 December 2017).
- [2] Saxena A., Driemeyer J., Ng A.Y. Robotic grasping of novel objects using vision. *The International Journal of Robotics Research*, 2008, vol. 27, no. 2, pp. 157–173.
- [3] Romano J.M., Hsiao K., Niemeyer G., Chitta S., Kuchenbecker K.J. Human-inspired robotic grasp control with tactile sensing. *IEEE Transactions on Robotics*, 2011, vol. 27, no. 6, pp. 1067–1079.
- [4] Robotiq 3-finger adaptive robot gripper. Available at: <https://robotiq.com/products/3-finger-adaptive-robot-gripper> (accessed 15 December 2017).
- [5] BarrettHand overview. Available at: <http://barrett.com/products-hand.htm> (accessed 15 December 2017).
- [6] SDH. Available at: https://schunk.com/de_en/gripping-systems/series/sdh/ (accessed 15 December 2017).
- [7] Titov V.V. Compliant motion control algorithm for flexible joint manipulator with partial dynamic compensation. *Izvestiya vuzov. Priborostroenie* [Journal of Instrument Engineering], 2012, vol. 55, no. 11, pp. 29–33.
- [8] Egorov I.N., Kobzev A.A., Mishulin Yu.E., Nemontov V.A. Upravlenie mekhatronnymi i robototekhnicheskimi sistemami s silomomentnym ochuvstvleniem. [Control on mecha-

- tronic and robotic systems with force-torque sensing] Vladimir, Vladimir State University publ., 2005, 270 p.
- [9] Welch G., Bishop G. An introduction to the Kalman filter. University of North Carolina, 2001, 50 p.
- [10] Perov A.I. Statisticheskaya teoriya radiotekhnicheskikh system [Statistic theory of radio-technical systems]. Moscow, Radiotekhnika publ., 2003, 400 p.

Bazhinova K.V. — post-graduate student, Department of Robotics and Mechatronics, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Seliverstova E.V. — post-graduate student, Department of Robotics and Mechatronics, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.