

А. Г. Лесков, д-р техн. наук, профессор, директор, agleskov@rambler.ru,

Е. В. Селиверстова, инженер, feoktistovaev@mail.ru,

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана (Дмитровский филиал)

Алгоритм планирования и выбора способа захвата деформируемого объекта многопалым захватным устройством манипуляционного робота

Рассмотрен алгоритм выбора способа захвата деформируемого объекта с учетом минимизации контактных сил. Отличительные особенности алгоритма — учет изменения формы поверхности объекта и смещения его центра масс, вызванных деформацией объекта в процессе захвата и выполнения манипуляционной задачи, и проверка на достижимость желаемого положения объекта на этапе планирования захвата.

Ключевые слова: симулятор захвата, планирование захвата, деформируемый объект, контактные силы, выбор способа захвата, достижимость, устойчивость

Введение. Главное достоинство робототехнических систем — возможность выполнения задач ловкого манипулирования с объектами при достаточном удалении человека от операционной зоны. Особенно актуальными являются вопросы работи-

зации операций при работе с взрывоопасными объектами, представляющими угрозу для жизни и здоровья человека.

На данный момент роботизированные операции с взрывоопасными объектами реализуются за

счет применения методов удаленного управления при постоянном нахождении оператора в контуре управления роботом. Однако такой способ имеет существенные недостатки. Главные из них — не-работоспособность при потере связи между роботом и пультом управления и увеличение сложности управления при наличии задержки сигнала, что может привести к разрушению объекта манипулирования (ОМ) или его выпадению из захватного устройства (ЗУ) и, как следствие, взрыву.

Альтернативой роботам, управление которыми осуществляется удаленно человеком, являются автономные системы, оснащенные элементами искусственного интеллекта. Такие роботы лишены перечисленных недостатков и способны выполнять манипуляционные задачи в автоматическом режиме. Однако к настоящему времени не удается найти примеров полностью автономных систем, способных выполнять сложные операции с любыми ОМ. Поэтому задачу автономизации принято решать поэтапно, включая в рассмотрение отдельные фазы операции.

К простейшим манипуляционным задачам относится захват ОМ, который является начальным этапом большинства операций. Захват ОМ является проблемой его иммобилизации внутри ЗУ робота. Решение этой проблемы дает возможность удерживать ОМ в присутствии внешних возмущений.

В общем случае один и тот же ОМ можно захватить различными способами, по-разному располагая звенья ЗУ относительно поверхности ОМ. От выбора способа захвата зависит возможность реализации манипуляционной задачи и выполнения операции в целом. Выбор способа захвата осуществляется на этапе планирования. Решение задачи планирования захвата и последующего манипулирования требуют анализа результатов моделирования ОМ и ЗУ в процессе выполнения операции.

На данный момент задача автоматического захвата решена для жестких ОМ. Захват жестких ОМ интенсивно изучается уже более 30 лет. Созданы теория, описывающая кинематику и динамику захвата, алгоритмы планирования захвата и способы анализа его свойств. На их основе разработаны симуляторы захвата жестких ОМ — GraspIt! [1] и OpenRAVE [2], которые часто используются в современных робототехнических системах.

Существенным недостатком таких симуляторов захвата является отсутствие рассмотрения этой операции в контексте последующих действий, которые необходимо совершить с ОМ. Так, например, при охватывающем захвате желаемое изменение положения и ориентации ОМ в пространстве возможно только за счет движения всего манипуляционного робота. При этом, если при планировании захвата учесть последующую манипуляционную операцию, то изменения положения ОМ в пространстве можно достичь за счет движения звеньев ЗУ, что является более безопасным с точки зрения избегания столкновений с объектами, находящимися в рабочей зоне манипулятора. Кроме

того, существующие симуляторы захвата не ставят целью минимизацию сил, прилагаемых к ОМ со стороны ЗУ. Минимизация таких сил позволяет избежать чрезмерной деформации или разрушения ОМ, что особенно важно при работе с взрывоопасными объектами.

Алгоритм планирования захвата. В работе описан оригинальный алгоритм планирования захвата, учитывающий деформацию ОМ в процессе выполнения операции, последующую манипуляционную операцию и минимизацию сил, прилагаемых к ОМ со стороны ЗУ. Алгоритм реализован с использованием метаоперационной системы Robot Operating System [3]. Модель ЗУ формируется в формате Unified Robot Description Format [4]. Такое представление ЗУ облегчает способ моделирования в части решения прямой задачи кинематики при моделировании захвата. Поверхности ОМ и звенья ЗУ представлены в виде полигональных моделей.

Алгоритм планирования захвата включает в себя: алгоритм формирования гипотез захвата; алгоритм планирования траекторий движения звеньев ЗУ для захвата ОМ; алгоритм определения пересечений полигональных моделей ОМ и звеньев ЗУ; алгоритм расчета сил контактного взаимодействия между ОМ и звеньями ЗУ; алгоритм определения центра масс деформированного в процессе захвата ОМ; алгоритм оценки устойчивости захвата; алгоритм проверки достижимости желаемого положения ОМ; алгоритм планирования движения шарниров ЗУ для перемещения ОМ; алгоритм определения способа захвата.

Алгоритм формирования гипотез захвата в GraspIt! и OpenRAVE осуществляется следующим образом. Вокруг полигональной модели ОМ строится ограничивающий объем в виде сферы или параллелепипеда. Затем на ограничивающий объем накладывается сетка с заданным пользователем шагом, в вершинах которой восстанавливаются нормали к поверхности ограничивающего объема. Вдоль нормалей откладывается точка, удаленная от вершины на заданное пользователем расстояние. В эту точку устанавливается модель ЗУ таким образом, чтобы оно было направлено вдоль вектора нормали и пальцами ориентировано в сторону ОМ (рис. 1, а). После этого модель ЗУ переводится в состояние "ЗУ открыто". Моделирование захвата осуществляется путем пошагового изменения положения элементов ЗУ для перевода его в состояние "ЗУ закрыто". На некотором шаге поверхности ОМ и звена ЗУ начинают пересекаться. Когда число контактных областей становится больше двух, захват считается осуществленным. Для такого состояния проводится анализ свойств захвата и его количественная и качественная оценка. На основании результатов оценки происходит выбор наиболее удачного способа захвата.

Недостатком такого формирования гипотез захвата является использование простейших ограничивающих объемов. Для объектов, обладающих сложной формой, это приводит к малому числу ги-

потез, которые чаще всего являются "неудачными" (рис. 1, б), поскольку ЗУ находится на таком удалении от объекта, что при закрытии его звенья не касаются поверхности ОМ.

Ввиду этого в качестве ограничивающего объема в предлагаемом алгоритме планирования захвата используется многогранник, получаемый путем уменьшения числа вершин полигональной модели ОМ. Формирование гипотез осуществляется следующим образом. Рассчитываются геометрические центры полигонов ограничивающего объема, и в них восстанавливаются нормали к соответствующим полигонам. Далее, аналогично выше описанному алгоритму, вдоль нормалей откладываются точки, удаленные от центров полигонов на заданное расстояние, в которые устанавливается модель ЗУ (рис. 1, в). После этого для каждой гипотезы осуществляется моделирование захвата способом, описанным для GraspIt! и OpenRAVE.

Алгоритм планирования траекторий движения звеньев ЗУ для захвата ОМ формирует законы изменения движения следующим образом:

$$q_{ji} = q_{jcl} + \frac{(q_{jop} - q_{jcl})}{n} i, i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, m,$$

где q_{ji} — обобщенная координата j -го шарнира на i -м шаге моделирования; q_{jcl} и q_{jop} — значения обобщенных координат j -го шарнира в положении "ЗУ закрыто" и "ЗУ открыто" соответственно; n — число шагов моделирования.

На каждом шаге моделирования выполняется алгоритм определения пересечений полигональных моделей ОМ и звеньев ЗУ [5]. Если пересечение не обнаружено, происходит переход на следующий шаг моделирования, иначе — выполняется алгоритм расчета сил контактного взаимодействия между ОМ и звеньями ЗУ [6], учитывающий контактные ограничения. В результате формируются множество вершин $R = \{r_1, \dots, r_m\}$, входящих в поверхности контактов, и соответствующее им множество сил контактного взаимодействия $F_R = \{f_{R1}, \dots, f_{Rm}\}$. Работу этих алгоритмов для представленного на рис. 2, а способа захвата иллюстрируют рис. 2, б и рис. 2, в.

После обнаружения пересечения и расчета сил контактного взаимодействия выполняется алгоритм определения центра масс деформированного в процессе захвата ОМ.

Вначале определяется поверхность ОМ после деформации. Изменение формы поверхности происходит не только в области контакта, но и в области, примыкающей к кон-

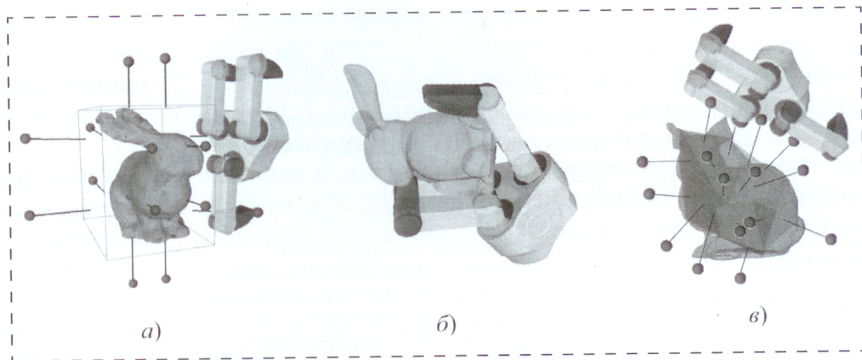


Рис. 1. Формирование гипотез захвата

тактной поверхности. Расчет смещений вершин, входящих в область, примыкающую к контактной поверхности, осуществляется итеративно. Вначале определяются смещения вершин q_i , которые образуют полигоны с вершинами, входящими в поверхность контактов. Затем рассчитываются смещения вершин, которые образуют полигоны с вершинами q_i , и так далее до тех пор, пока смещение не станет меньше малой заданной величины. В итоге формируется множество вершин, входящих в область, примыкающую к контактной поверхности, и испытывающих смещение в процессе деформации объекта — $Q = \{q_1, \dots, q_i\}$.

В основе физической модели деформации лежит приближение Буссинеска [7]. Вектор смещения u_{Qi} для вершины q_i :

$$u_{Qi} = \frac{1-\nu}{2\pi G} \sum_{k=1}^n \frac{f_{Rk}}{l_k}, i = 1, 2, \dots, t,$$

где ν — коэффициент Пуассона; G — модуль сдвига; l_k — расстояние между вершиной q_i и r_i , к которой приложена точечная сила f_{Rk} . Учитывая неизменяемость объема ОМ, определяются смещения вершин, не входящих в область, примыкающей к контактной.

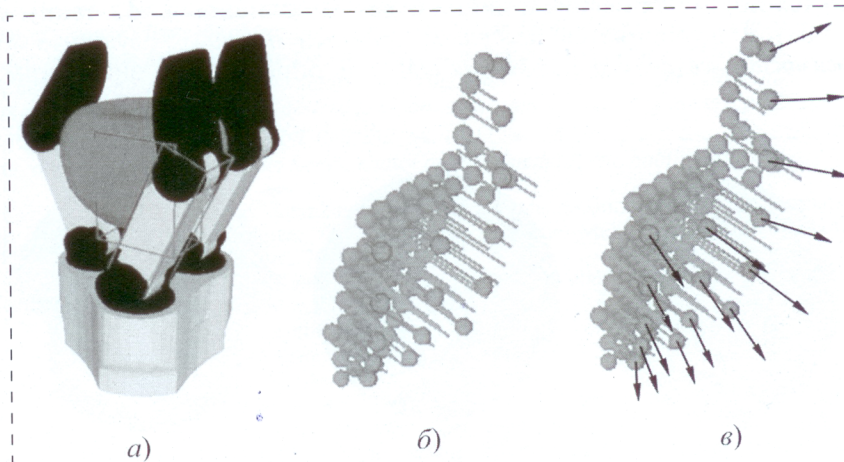


Рис. 2. Определение наличия пересечения и расчет сил контактного взаимодействия

Для определения центра масс деформированного ОМ его полигональная модель разбивается трехмерной сеткой. Определяются ячейки, которые находятся внутри модели деформированного ОМ, и ячейки, внутри которых находятся вершины модели. Каждой такой ячейке назначается весовой коэффициент v_i , эквивалентный объему. В итоге радиус-вектор центра масс C отыскивается из соотношения:

$$C = \frac{\sum_{i=1}^k v_i l_i}{\sum_{i=1}^k v_i},$$

где l_i — радиус-вектор каждой ячейки.

Результат работы алгоритма представлен на рис. 3. На рис. 3, а изображен недеформированный ОМ и положение его центр масс, на рис. 3, б — деформированный ОМ, на рис. 3, в — найденный центр масс деформируемого ОМ.

Далее выполняется алгоритм оценки устойчивости захвата, который основан на проверке выполнения неравенства [8]

$$w_{ext} \leq -G\gamma_{con}, \quad (1)$$

где G — матрица захвата [8], которая рассчитывается на каждом шаге моделирования, поскольку изменяются положение центра масс ОМ и точек приложения равнодействующих сил в каждой кантатной области; w_{ext} и γ_{con} — блочные векторы внешнего воздействия и контактных сил и моментов:

$$w_{ext} = [f \ \mu]^T, \quad \gamma_{con} = [f_1 \ \mu_1 \dots f_i \ \mu_i \dots f_n \ \mu_n]^T,$$

где f и μ — равнодействующие сила и крутящий момент, приложенные к ОМ со стороны внешнего мира; f_i и μ_i — равнодействующие сила и крутящий момент, приложенные к ОМ со стороны ЗУ в i -й контактной области.

Если условие (1) не выполняется, на следующем шаге моделирования продолжается движение всех шарниров модели ЗУМ. Движение осуществляется до тех пор, пока неравенство не будет выполнено.

Затем выполняется алгоритм проверки достижимости желаемого положения ОМ, т. е. определе-

ния возможности выполнения последующей манипуляционной задачи. Для этого отыскивается решение матричного уравнения

$$q = J^{-1} G^T u, \quad (2)$$

где q — вектор, составленный из значений углов шарниров захватного устройства; J — матрица Якоби [8]; u — вектор, описывающий положение и ориентацию ОМ; G — матрица захвата.

Если уравнение (2) не имеет решение, то при таком способе захвата желаемое положение ОМ является недостижимым, и гипотеза захвата исключается из дальнейшего рассмотрения.

Далее выполняется алгоритм планирования движения шарниров ЗУ для перемещения ОМ. Траектория ОМ полагается линейной. Она разбивается на заданное число шагов. Для каждого промежуточного положения ОМ отыскивается положение центра контактной области. Затем путем решения обратной кинематической задачи [9] определяется предварительная конфигурация ЗУ для всех промежуточных положений.

Затем моделируется захват ОМ для каждого промежуточного положения, уточняются силы, с которыми звенья ЗУ действуют на ОМ, положение центра масс ОМ, матрица захвата. После этого рассчитывается блочный вектор контактных сил и моментов, при котором захват является устойчивым. Он определяется из решения матричного уравнения (1):

$$\gamma_{conmin} = G^+ w_{ext} + (I - G^+ G) y_{min},$$

где G^+ — псевдообратная матрица к матрице захвата G ; I — единичная матрица; y_{min} — произвольный вектор, который выбирается таким образом, чтобы вектор γ_{conmin} был минимальным; $(I - G^+ G)$ — базис нуль-пространства матрицы захвата, определяющего подпространство внутренних сил и моментов.

Далее сравниваются значения сил, полученных в результате моделирования, и сил, полученных в результате расчета. На основе этого сравнения происходит коррекция значений углов шарниров ЗУ таким образом, чтобы силы, полученные в результате моделирования, были близки к расчетным значениям, но не были их меньше.

В конце выполняется алгоритм определения способа захвата, который в качестве входных параметров принимает положение ОМ относительно манипуляционного робота. Результатом работы алгоритма является гипотеза захвата, для достижения предзахватного положения которой траектория манипулятора в обобщенных координатах минимальна и отсутствует столкновение между исполнительным механизмом и объектами внешнего мира на протяжении выполнения всей манипуляционной операции.

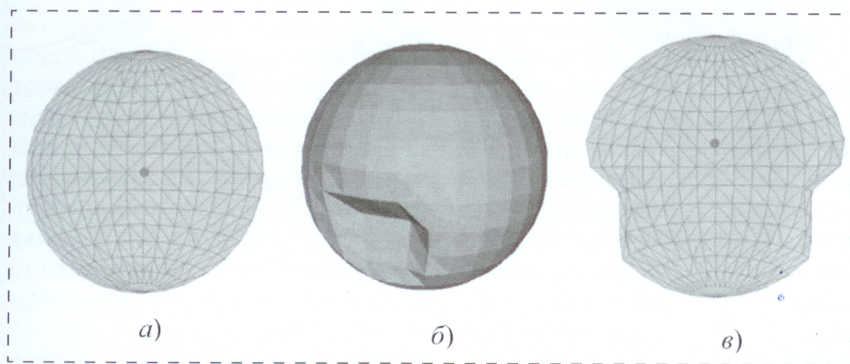


Рис. 3. Определение центра масс деформируемого объекта в процессе захвата

Закключение. Таким образом, в работе описан алгоритм симулятора захвата. Отличительными особенностями рассмотренного симулятора захвата от существующих алгоритмов планирования захвата являются:

- проверка на достижимость желаемого положения ОМ на этапе планирования захвата;
- минимизация сил, прикладываемых к поверхности ОМ со стороны ЗУ;
- учет изменения формы поверхности ОМ и смещения его центра масс, вызванных деформацией ОМ в процессе захвата и выполнения манипуляционной задачи.

В дальнейшем планируется развитие алгоритмов анализа контактных сил в процессе выполнения манипуляционной операции.

Список литературы

1. Miller A., Allen P., Graspit A. Versatile simulator for robotic grasping // IEEE Robot. Autom. Mag. 2004. Vol. 11, N. 4. P. 110—122.
2. Diankov R. Automated construction of robotic manipulation programs. Ph. D. thesis, Carnegie Mellon University, Robotics Institute, 2010.

3. Robot Operating System, available at: <http://www.ros.org/> (дата обращения: 22.05.2017).
4. Unified Robot Description Format, available at: <http://wiki.ros.org/urdf> (дата обращения: 22.05.2017).
5. Лесков А. Г., Селиверстова Е. В. Расчет областей пересечения поверхностей захватных устройств манипуляторов и деформируемых объектов при планировании и моделировании захвата // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана, Сер. Приборостроение, 2016, № 6. С. 97—114.
6. Лесков А. Г., Селиверстова Е. В. Расчет сил контактного взаимодействия между деформируемым объектом и звеньями захватного устройства манипулятора // Труды Международной Научно-Технической Конференции "Экстремальная робототехника", 2016. С. 129—133.
7. Леденев В. В., Однолько В. Г., Нгуен З. Х. Теоретические основы механики деформирования и разрушения, Тамбов; Изд-во ФГБОУ ВПО "ТГТУ", 2013, 312 с.
8. Prattichizzo D., Bicchì A. Consistent task specification for manipulation systems with general kinematics // ASME Journal of Dynamics Systems Measurements and Control. 1997. Vol. 113. P. 760—767.
9. Лесков А. Г., Бажинова К. В., Морешкин С. Д., Феоктистова Е. В. Построение модели кинематики исполнительных механизмов манипуляционных роботов с использованием блочных матриц // Инженерный журнал: наука и инновации. Электронное научно-техническое издание. 2013. № 9 (21). URL: <http://engjournal.ru/articles/954/954.pdf> (дата обращения: 22.05.2017).

Algorithm for Planning and Selection of Deformable Object Grasp by Multi-Finger Gripper of Robotic Manipulator

A. G. Leskov, agleskov@rambler.ru, E. V. Seliverstova, feoktistovaev@mail.ru,
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation

Corresponding author: Seliverstova Elena V., Engineer,
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation,
e-mail: agleskov@rambler.ru

Accepted on August 07, 2017

Principal advantage of robotic systems is the ability to perform tasks of dexterous manipulation with objects with sufficient removal of the person from the operating area. Particularly relevant are issues of robotics operations when working with explosive objects that pose a threat to human life and health. The simplest manipulation tasks include object grasping, which is the initial stage of most operations. Grasp of object is a problem of its immobilization inside the robot's gripper. Solving this problem makes it possible to hold object in the presence of external perturbations. An algorithm for selection of deformable object grasp is considered, taking into account the minimization of contact forces. Distinctive features of the algorithm — taking into consideration the change in the shape of the object's surface and the displacement of its center of mass, caused by deformation of the object during grasping and execution of the manipulation task, and verification of the object desired position reachability at the grasp planning stage. The algorithm for grasp planning includes: an algorithm for generating grasp hypotheses; algorithm for planning the trajectories of gripper's links for object grasping; algorithm for determining the intersections of object's and gripper's links' polygonal model; algorithm for calculating the forces of contact interaction between object and gripper's links; algorithm for determining the center of mass of the object, deformed during grasping; algorithm for estimating the stability of grasp; algorithm for verifying the reachability of the object desired position; algorithm for planning the gripper's joints movement for moving object during manipulation task; algorithm for determining the grasp method.

Keywords: grasp simulator, grasp planning, deformable object, contact forces, choice of grasp method, reachability, stability

For citation:

Leskov A. G., Seliverstova E. V. Algorithm for Planning and Selection of Deformable Object Grasp by Multi-Finger Gripper of Robotic Manipulator, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no 11, pp. 739—744.

DOI: 10.17587/mau.18.739-744

References

1. Miller A., Allen P., Graspit A. Versatile simulator for robotic grasping, *IEEE Robot. Autom. Mag.*, 2004, vol. 11, no. 4, pp. 110—122.

2. Diankov R. Automated construction of robotic manipulation programs. Ph. D. thesis, Carnegie Mellon University, Robotics Institute, 2010.
3. Robot Operating System, available at: <http://www.ros.org/> (date of access: 22.05.2017).
4. Unified Robot Description Format, available at: <http://wiki.ros.org/urdf> (date of access: 22.05.2017).
5. Leskov A. G., Seliverstova E. V. Raschet oblastey peresecheniya poverkhnostey zakhvatnykh ustroystv manipulyatorov i deformiruyemykh obyektov pri planirovani i modelirovani zakhvata (Computation of surface intersections of gripping devices and deformed objects during planning and modelling of grip), *Vestnik MGTU im. N. E. Baumana. Ser. Priborostroyeniye*, 2016, vol. 6, pp. 97—114 (in Russian).

6. Leskov A. G., Seliverstova E. V. *Raschet sil kontaktного взаимодействия mezhdu deformiruyemym ob'yektom i zven'yami zakhvatnogo ustroystva manipulyatora* (Computation of contact interaction forces between deformed object and units of manipulator gripping device), *Trudy Mezhdunarodnoy Nauchno-Tekhnicheskoy Konferentsii "Ekstremalnaya Robototekhnika"*, 2016, pp. 129–133 (in Russian).

7. Ledenev V. V., Odnolko V. G., Nguyen Z. H. *Teoreticheskiye osnovy mekhaniki deformirovaniya i razrusheniya* (Theoretical Foundations of Deformation and Fracture Mechanics), Tambov, Publishing house of FGBOU VPO "TG TU", 2013, 312 p. (in Russian).

8. Prattichizzo D., Biechi A. Consistent task specification for manipulation systems with general kinematics, *ASME Journal of Dynamics Systems Measurements and Control*, 1997, vol. 113, pp. 760–767.

9. Leskov A. G., Bazhinova K. V., Moroshkin S. D., Feoktistova E. V. *Postroyeniye modeley kinematiki ispolnitel'nykh mekhanizmov manipulyatsionnykh robotov s ispol'zovaniyem blochnykh matrits using partition matrices*, *Inzhenernyy Zhurnal: Nauka i Innovatsii. Elektronnoye Nauchno-Tekhnicheskoye Izdaniye*, 2013, no. 9 (21), available at: <http://engjournal.ru/articles/954/954.pdf> (date of access: 22.05.2017). (in Russian).

УДК 001.4:004.2:007.52

DOI: 10.17587/mau.18.744-748

В. Н. Казанцев, канд. техн. наук, зам. нач. сектора, kazantsev@rtc.ru,

В. А. Павлов, канд. техн. наук, стар. науч. сотр., зам. нач. сектора, vapavlov@rtc.ru,
ГНЦ РФ "Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт
робототехники и технической кибернетики", г. Санкт-Петербург

Терминология и подходы к определению модульной структуры роботов¹

Рассмотрен общий подход к интерпретации существующей терминологии и применению классификации модульности компонентов сервисных роботов. Концепции разработки модульной архитектуры роботов рассмотрены с позиций компонентного и функционального подходов. Представлен краткий обзор разрабатываемых в настоящее время методов морфотроники и контактно-канального метода для структурного проектирования роботов.

Ключевые слова: робот, модульность, модуль, модульная архитектура робота

В международном стандарте [1], выпущенном тремя международными организациями ИСО, МЭК и IEEE, дано следующее определение модульности: "Модульность (modularity): качество, при котором система или компьютерная программа состоит из дискретных компонентов таких, что у которых изменения в одном компоненте оказывают минимальное влияние на другие компоненты". Такие компоненты и являются модулями в соответствии с определением из проекта международного стандарта ИСО [2]: "Модуль (module): компонент с особыми свойствами, обеспечивающими удобство проектирования, интероперабельность, легкость реконфигурирования, простоту интеграции и т. д.". Например, при проектировании модуль может рассматриваться в виде "черного ящика", для интеграции модуль должен иметь доступные интерфейсы, а интероперабельность обеспечивается унификацией и стандартизацией интерфейсов. При этом любые изменения, производимые внутри "черного ящика", никак не влияют или оказывают минимальное влияние на работу других модулей системы.

Существуют несколько классификаций модулей. По функциональному признаку модули подразделяются на основные, вспомогательные, специальные и адаптивные [3]. Кроме того, модули могут быть необходимыми и возможными.

Основные модули являются необходимыми для системы и должны обязательно присутствовать в системе, например, манипулятор робота. Они реализуют основные функции системы непосредственно или в комбинации с другими модулями.

Вспомогательные модули реализуют вспомогательные функции системы, поддерживающие выполнение основных функций, которые реализуются основными модулями, например модули, обеспечивающие энергообеспечение или смазку. Вспомогательные модули включаются в систему вместе с обслуживаемыми ими основными модулями. Вспомогательные модули, как правило, являются необходимыми.

Специальные модули создаются для реализации функций, специфичных для конкретных задач, которые не относятся к функциям, присущим системе для всех случаев ее применения, например, захватное устройство манипулятора, предназначенное для работы с конкретным типом объектов. В данной классификации специальные модули являются возможными модулями, так как они являются возможными дополнительными аксессуарами для основных модулей.

Адаптивные модули реализуют функции адаптации к другим системам или ограничивающим условиям. Характеристики адаптивных модулей не полностью фиксируются заранее и, следовательно, позволяют их настраивать в зависимости от конкретных условий применения. Примером могут быть модули, обеспечивающие изменение клиренса

¹ Результаты исследований были получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России № 8.9364.2017/8.9.