

МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КАЧЕСТВА ЗАХВАТА ОБЪЕКТА

А.Г. Лесков¹

agleskov@rambler.ru

К.В. Бажинова^{1,2}

c8.df.mgtu@gmail.com

Е.В. Селиверстова^{1,2}

¹ Дмитровский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, пос. Орево,
Московская обл., Российская Федерация

² МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Рассмотрен вопрос выбора наиболее подходящего способа захвата объекта. Поскольку захват должен иметь такие свойства, как сопротивление возмущениям, ловкость, равновесие и устойчивость, выбор осуществляется на основании сравнения количественной оценки показателей качества захвата — параметров, связанных с этими свойствами. Приведены классификация показателей качества, а также обзор наиболее часто применяемых критериев качества захвата и способы их вычислений. Разработан и программно реализован алгоритм вычисления показателей качества для захвата. Приведены результаты расчета рассмотренных критериев и выполнен их анализ

Ключевые слова

Автоматический захват, свойства захвата, качество захвата, показатель качества, аналитическая оценка захвата, захватное устройство манипулятора

Поступила в редакцию 09.09.2016
© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017

Одной из главных задач ловкого манипулирования является определение способа захвата неизвестного объекта. Целью захвата объекта манипулирования (ОМ) является иммобилизация ОМ внутри захватного устройства манипулятора (ЗУМ) в присутствии внешних возмущений. Решают эту задачу путем планирования (синтеза) захвата — определения положения и ориентации ЗУМ относительно ОМ, а также конфигурации захватного устройства (значений углов шарниров ЗУМ) и соответствующих контактных регионов между поверхностями пальцев и объекта.

Поскольку целью захвата является удержание ОМ с учетом его массы и наличия внешних возмущений, а ловкие манипуляции включают в себя изменение положения ОМ относительно кисти без внешней поддержки, захват должен иметь следующие основные свойства.

1. *Сопротивление возмущениям*: захват сможет противостоять возмущениям в любом направлении, если неподвижность ОМ обеспечивается либо за счет расположения контактных регионов между поверхностями ОМ и пальцами ЗУМ (*замкнутость по форме*) [1], либо за счет сил, действующих на объект со стороны пальцев ЗУМ (*замкнутость по силе*) [2].

2. *Ловкость*: захват является ловким, если конфигурация ЗУМ позволяет ему переместить объект в любом направлении [3].

3. *Равновесие*: захват находится в равновесии, когда равнодействующая сил и моментов, приложенных к ОМ пальцами и внешними возмущениями, равна нулю [4].

4. *Устойчивость*: захват является устойчивым, если приложенные к ОМ пальцами контактные силы таковы, что они предотвращают как размыкание, так и нежелательное проскальзывание контактов [5].

Поскольку в общем случае существует более чем один имеющий перечисленные свойства способ захватить ОМ, встает вопрос о выборе наиболее подходящего захвата. Выбор осуществляется на основании сравнения количественной оценки *показателей качества* Q — параметров, связанных с перечисленными свойствами.

В настоящей работе рассмотрены основные аналитические показатели качества, которые используются в современных системах планирования захвата, и выполнен анализ результатов их применения для различных способов захвата.

Показатели качества захвата. Применяемые показатели качества захвата можно разделить на две группы в соответствии с основным аспектом, оцениваемым показателем: *расположение контактных регионов на объекте или конфигурация ЗУМ.*

В [6] приведены основные применяемые показатели качества (рис. 1).

А. Показатели, связанные с расположением контактных регионов на объекте. **А.1. Показатели, основанные на алгебраических свойствах матрицы захвата.** При определении значений этих показателей ограничения по силам в точках контакта не учитываются.

Матрица захвата G [7] связывает контактные силы, действующие на ОМ со стороны ЗУМ, с общим воздействием пальцев на объект, приложенным к ОМ:

$$w = Gf, \quad (1)$$

где w — вектор общего воздействия, составленный из сил и вызванных ими моментов, действующих на ОМ; f — вектор контактных сил, с которыми пальцы ЗУМ действуют на ОМ, заданный в системе координат ОМ.

А.1.1. Наименьшее сингулярное значение матрицы захвата. Матрица G имеет набор сингулярных чисел, которые определяются как квадратные корни положительных собственных значений матрицы GG^T . Когда захват находится в сингулярной конфигурации, т. е. когда он теряет способность противостоять внешним возмущениям по крайней мере в одном из направлений, хотя бы одно из сингулярных чисел матрицы G стремится к нулю. Наименьшее сингулярное число матрицы G является показателем качества, который отражает, насколько далека эта конфигурация захвата от попадания в сингулярную конфигурацию [8]:

$$Q = \sigma_{\min}(G).$$

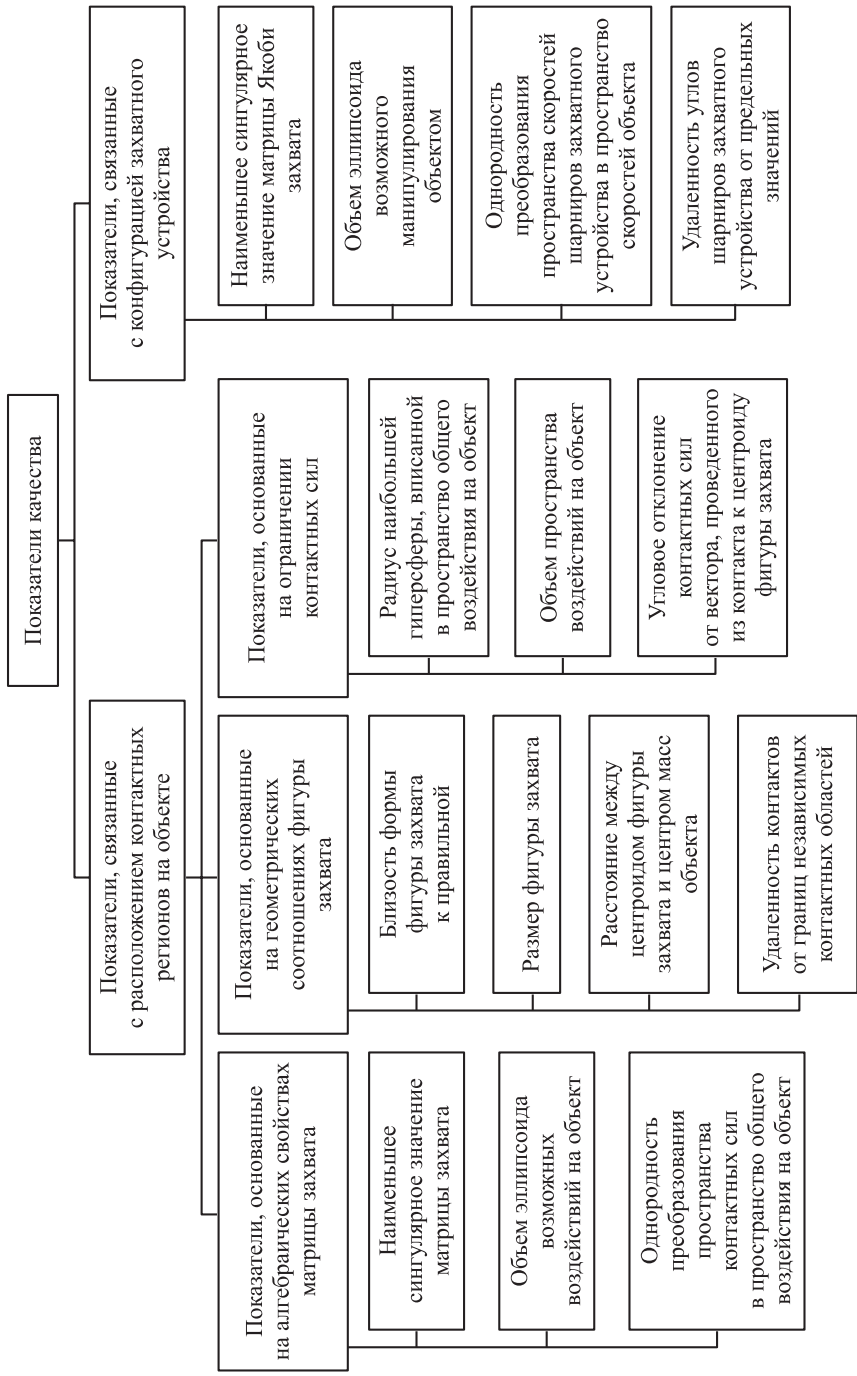


Рис. 1. Основные применяемые показатели качества

Чем больше наименьшее сингулярное число матрицы G , тем дальше конфигурация захвата от сингулярной, а значит, больше его способность к сопротивлению возмущающим воздействиям.

А.1.2. Объем эллипсоида возможных воздействий на объект. В выражении (1) влияние матрицы G на вектор контактных сил можно представить следующим образом: G отображает сферу единичного радиуса из пространства сил, действующих на точки контакта, в эллипсоид в пространстве общих воздействий пальцев ЗУМ на ОМ. Общий вклад всех контактных сил может быть учтен при использовании объема этого эллипсоида как показатель качества [8]:

$$Q = \sqrt{\det(GG^T)} = \sigma_1 \cdot \sigma_2 \cdot \dots \cdot \sigma_d,$$

где $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_d$ — сингулярные числа матрицы захвата G .

Чем больше объем эллипсоида, тем больше вклад сил, действующих на ОМ со стороны ЗУМ, в векторе общего воздействия на объект, а значит, выше способность захвата к сопротивлению возмущающим воздействиям. Объем эллипсоида инвариантен к изменению системы координат и не содержит информации о влиянии контактной силы отдельного пальца ЗУМ на вектор общего воздействия на ОМ.

А.1.3. Однородность преобразования пространства контактных сил в пространство общего воздействия на объект. Этот критерий определяет захват, наиболее близкий к изотропному, в котором контактные силы, приложенные каждым пальцем ЗУМ к ОМ, равным образом влияют на вектор общего воздействия на ОМ. Этот показатель качества определяется как [9]:

$$Q = \frac{\sigma_{\min}(G)}{\sigma_{\max}(G)},$$

где $\sigma_{\max}(G)$ и $\sigma_{\min}(G)$ — максимальное и минимальное сингулярные числа G .

Этот показатель стремится к единице, когда захват изотропный, и падает до нуля, когда захват находится вблизи сингулярной конфигурации. Чем он больше, тем ближе захват к равновесному состоянию, а его способность к сопротивлению возмущающим воздействиям выше.

А.2. Показатели, основанные на геометрических соотношениях фигуры захвата. Под фигурой захвата понимаем многоугольник (многогранник), вершинами которого являются центры контактных регионов.

При определении значений этих показателей предполагается, что все пальцы ЗУМ могут применить силу без ограничения ее величины.

А.2.1. Близость формы фигуры захвата к правильной. При захвате желательнее, чтобы контактные регионы были равномерно распределены по поверхности ОМ. Это способствует повышению устойчивости захвата [10, 11]. Показатель количественной оценки равномерного распределения контактных регионов отражает, как далеко расположены внутренние углы многоугольника захвата (граней многогранника захвата) от тех, которые соответствуют правильной многоуголь-

нику. В [9] предложена формула расчета такого критерия для плоской фигуры захвата. В общем случае этот показатель может быть определен как

$$Q = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{\alpha_{\max i}} \sum_{j=1}^{m_i} |\alpha_j - \bar{\alpha}|, \quad \bar{\alpha} = 180(m_i - 2)/m_i, \quad \alpha_{\max} = (m_i - 2)(180 - \bar{\alpha}) + 2\bar{\alpha},$$

где n — число граней фигуры захвата (если захват — плоский, т. е. центры контактных регионов лежат в одной плоскости, $n = 1$); m_i — число вершин i -й грани фигуры захвата; α_j — внутренний угол j -й вершины i -й грани фигуры контакта; $\bar{\alpha}$ — внутренний угол, соответствующий правильному многоугольнику; α_{\max} — сумма внутренних углов правильного многоугольника.

Этот критерий минимален, когда многоугольник захвата имеет (грани многогранника захвата имеют) правильную форму. Чем меньше значение критерия, тем лучше захват. Например, захват, осуществляемый тремя контактными регионами, является оптимальным, когда контактный многоугольник является равносторонним треугольником [10, 11]. Для такого захвата этот показатель качества равен нулю. Для захвата с двумя контактными регионами этот критерий всегда равен нулю.

А.2.2. Размер фигуры захвата. Чем больше площадь (объем) многоугольника (многогранника) захвата, тем более устойчив захват по сравнению с захватом, обладающим таким же количеством контактных регионов, которым соответствуют такие же силы сжатия, но имеющим меньшую площадь (объем) многоугольника (многогранника) захвата [11, 12].

В случае плоского захвата показатель качества рассчитывается как площадь многоугольника:

$$Q = \frac{1}{2} \left\| \sum_{i=1}^{n-1} c_i \times c_{i+1} + c_n \times c_1 \right\|,$$

где n — число контактных регионов; c_i — координаты центров контактных регионов в порядке обхода по или против хода часовой стрелки.

Если захват объемный, т. е. центры контактных регионов не лежат в одной плоскости, то показатель качества рассчитывается как объем многогранника:

$$Q = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^m \left\| (c_{i1} - r_c) \times (c_{i2} - r_c) \times (c_{i3} - r_c) \right\|,$$

где m — число треугольных полигонов, ограничивающих фигуру захвата; c_{ij} — j -я вершина i -го полигона; r_c — центроид фигуры захвата.

Если в захвате участвуют два контактных региона, фигура захвата принимает вид отрезка, а этот показатель равен расстоянию между контактными регионами:

$$Q = \|c_1 - c_2\|,$$

где c_1 и c_2 — координаты центров контактных регионов.

А.2.3. Расстояние между центроидом фигуры захвата и центром масс объекта. Влияние сил инерции и гравитации на захват зависит от удаленности центра масс ОМ от центроида контактной фигуры. Чем меньше расстояние между центром массы объекта и центроидом контактной фигуры, тем более устойчив захват. Поэтому такое расстояние так же используется как показатель качества захвата [13, 14]:

$$Q = \|r_{c\text{ОМ}} - r_c\|, \quad r_c = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n c_i,$$

где $r_{c\text{ОМ}}$ — радиус-вектор центра масс ОМ; r_c — радиус-вектор центроида фигуры контакта; n — число контактных регионов; c_i — радиус-векторы вершин фигуры захвата.

А.2.4. Удаленность контактов от границ независимых контактных областей. Под *пространством захвата* понимается пространство, содержащее возможные места контактов пальцев ЗУМ на поверхности ОМ. Его подпространство, включающее вероятное расположение контактных регионов захватов, замкнутых по силе, называется *замкнутым по силе пространством (FCS)*.

Совокупность участков на поверхности объекта, расположенных таким образом, что контакт пальцев в пределах каждого из этих участков приводит к замкнутому по силе захвату независимо от точного положения контактных точек, соответствует множеству *независимых контактных областей* [15]. Для случая плоского захвата объекта n пальцами множество контактных регионов успешных захватов, содержащихся в FCS, является n -мерным параллелепипедом, ребра которого содержат независимые контактные области. Чем больше размеры ребер параллелепипеда, тем больше множество замкнутых по силе конфигураций [16].

Захват, при котором контакты пальцев с поверхностью ОМ включают в себя центры независимых контактных областей, допускает большие по значениям отклонения в позиционировании пальцев ЗУМ без ущерба для замкнутости захвата по силе. Поэтому в качестве критерия качества используется показатель, определяемый как сумма расстояний между центром каждого фактического контакта и центром соответствующей независимой контактной области [9]:

$$Q = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \|c_{i0} - c_i\|,$$

где c_{i0} — радиус-вектор центра соответствующей независимой контактной области; c_i — радиус-вектор центра i -го фактического контакта.

Чем меньше показатель, тем более устойчив захват. Этот показатель достигает оптимального значения (нуль), когда во время захвата все пальцы располагаются в центрах соответствующих независимых контактных областей.

А.3. Показатели, основанные на ограничении контактных сил. Выполнение условия замкнутости по силе не дает информации о величине возмущающих воздействий, которые могут быть скомпенсированы при захвате. Чтобы избежать

случаев, когда малые возмущения приводят к необходимости приложить к ОМ существенные по величине воздействия, необходима количественная оценка захвата с учетом ограничений на величину сил, прикладываемых ЗУМ к ОМ.

Обычно при анализе захватов используется ограничение по модулю силы, прикладываемой пальцем ЗУМ в каждом контактном регионе. Для упрощения формализации принимают значения всех сил нормализованными, т. е. для n контактных регионов

$$\|f_i\| \leq 1, \quad i = 1, \dots, n.$$

Если конус трения в каждой точке контактного региона аппроксимировать пирамидой с m ребрами, то силу f_i можно выразить как линейную комбинацию единичных сил f_{ij} ($j = 1, \dots, m$), направленных вдоль ребер пирамиды, а воздействие w_i , создаваемое силой f_i , — как линейную комбинацию воздействий w_{ij} , создаваемых силами f_{ij} .

Воздействие, создаваемое по всем n контактными регионам, можно представить как сумму воздействий от каждого пальца:

$$w = \sum_{i=1}^n w_i.$$

Множество возможных воздействий пальцев на ОМ называют *пространством воздействий захвата* (GWS) [17]. GWS можно представить как выпуклую оболочку суммы Минковского единичных воздействий w_{ij} :

$$P = \text{Conv} \left(\bigoplus_{i=1}^n \{w_{i1}, \dots, w_{im}\} \right).$$

А.3.1. Радиус наибольшей гиперсферы, вписанной в пространство общего воздействия на объект. Ранее было показано, что при планировании и анализе захвата необходимо знать силы, которые следует приложить к ОМ для успешного парирования внешних возмущений. С этой точки зрения важным критерием качества является значение возмущающего воздействия, которому способен сопротивляться спланированный захват [18]. Геометрически этот критерий эквивалентен радиусу наибольшей гиперсферы с центром в начале координат пространства воздействий, которая целиком содержится в GWS:

$$Q = \min_{w \in \partial P} \|w\|,$$

где ∂P — граница пространства воздействий захвата.

Чем больше этот показатель качества, тем выше способность захвата к сопротивлению возмущающим воздействиям.

А.3.2. Объем пространства воздействий на объект. Величина радиуса наибольшей сферы, принадлежащей пространству воздействий захвата, зависит от выбора системы координат для расчета моментов, создаваемых единичными контактными силами. В качестве альтернативы, не зависящей от выбора СК, был предложен показатель [19], оценивающий объем пространства воздействий захвата:

$$Q = \frac{1}{k!} \det \left| \overline{W_1 W_2} \dots \overline{W_1 W_k} \right|,$$

где W_1, \dots, W_k — вершины фигуры, описывающей возможные воздействия на ОМ; k — число ее вершин.

Чем больше этот показатель качества, тем выше способность захвата к сопротивлению возмущающим воздействиям.

А.3.3. Угловое отклонение контактных сил от вектора, проведенного из контакта к центру масс фигуры захвата. Величина, равная среднему арифметическому углов между векторами контактных сил и векторами, соединяющими центры соответствующих контактных регионов с центроидом фигуры захвата, является показателем качества захвата. В [20] предложена формула расчета такого критерия для плоской фигуры захвата. В общем случае этот показатель качества захвата может быть определен как

$$Q = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \arccos \left(\frac{f_i \cdot (r_c - c_i)}{\|f_i\| \cdot \|r_c - c_i\|} \right),$$

где n — число контактных регионов; f_i — контактная сила в i -м контактном регионе; c_i — радиус-векторы вершин фигуры захвата; r_c — радиус-векторы центроида фигуры захвата. Чем меньше этот показатель качества, тем выше способность захвата к сопротивлению возмущающим воздействиям.

Б. Показатели, связанные с конфигурацией захватного устройства. Избежать прохождения манипуляционным роботом, избыточным по степеням свободы, сингулярных положений можно путем максимизации наименьшего сингулярного числа σ_{\min} матрицы Якоби манипулятора. Аналогичный метод применим и при захвате объектов, при этом анализируется матрица Якоби захвата G_J [7], связывающая пространство ЗУМ и пространство ОМ.

Матрица G_J связывает угловые скорости шарниров ЗУМ с линейными и угловыми скоростями центра масс ОМ:

$$v_c = G_J \dot{q}, \tag{2}$$

где v_c — вектор скоростей ОМ; \dot{q} — вектор угловых скоростей шарниров ЗУМ.

Б.1. Наименьшее сингулярное значение матрицы Якоби захвата. В случае, когда захватная конфигурация ЗУМ является сингулярной, т. е. когда теряется способность передавать скорости объекту хотя бы по одной из степеней свободы, матрица G_J имеет по меньшей мере одно сингулярное число, равное нулю. Таким образом, для ограничения ЗУМ от попадания в сингулярное захватное положение необходимо максимизировать показатель качества [21]:

$$Q = \sigma_{\min}(G_J).$$

Чем больше наименьшее сингулярное значение матрицы G_J , тем дальше конфигурация ЗУМ от сингулярной, а значит, захват более ловкий.

Б.2. Объем эллипсоида возможного манипулирования объектом. Аналогично количественной оценке объема эллипсоида возможных воздействий на

объект рассматривается объем эллипсоида возможного манипулирования ОМ [22]. В выражении (2) влияние матрицы G_J на вектор угловых скоростей шарниров ЗУМ можно представить следующим образом: G_J отображает сферу единичного радиуса из пространства скоростей шарниров ЗУМ в эллипсоид возможного манипулирования в пространстве скоростей ОМ. Тогда показатель качества определяется следующим образом:

$$Q = \sqrt{\det(G_J G_J^T)} = \sigma_1 \cdot \sigma_2 \cdot \dots \cdot \sigma_r,$$

где $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_r$ — сингулярные числа матрицы G_J .

Чем больше объем эллипсоида, тем больше влияние скоростей шарниров ЗУМ на формирование вектора скоростей ОМ, а значит, захват более ловкий. Объем эллипсоида инвариантен к изменению системы координат, однако не содержит информации о влиянии скорости отдельного шарнира ЗУМ на вектор скоростей ОМ.

Б.3. Однородность преобразований пространства скоростей шарниров пальцев в пространство скоростей объекта. Преобразование пространства скоростей шарниров ЗУМ в пространство скоростей ОМ однородно, если каждая из скоростей шарниров ЗУМ равным образом влияет на формирование вектора скоростей ОМ. В этом случае показатель качества определяется как [23]

$$Q = \frac{\sigma_{\min}(G_J)}{\sigma_{\max}(G_J)},$$

где $\sigma_{\max}(G_J)$ и $\sigma_{\min}(G_J)$ — максимальный и минимальный сингулярные числа матрицы G_J .

Показатель стремится к единице в случае наиболее удачного захвата и падает до нуля, когда ЗУМ находится в сингулярной конфигурации. Чем больше такой показатель качества, тем захват ближе к равновесному состоянию и более ловкий.

Б.4. Удаленность углов шарниров захватного устройства от предельных значений. При исследовании вопросов управления манипуляционными роботами [24] было выявлено, что предпочтительными являются конфигурации, при которых значения углов в шарнирах ЗУМ находятся как можно дальше от своих конструктивных пределов. Применив аналогичный подход к оценке захвата, определим показатель качества, учитывающий предельные значения углов шарниров:

$$Q = \sum_{i=1}^l \left(\frac{q_i - (q_{\max i} - q_{\min i}) / 2}{q_{\max i} - q_{\min i}} \right)^2,$$

где l — число шарниров ЗУМ; q_i — фактическое значение угла i -го шарнира кисти; $q_{\max i}$ и $q_{\min i}$ — верхний и нижний пределы диапазона значений углов i -го шарнира ЗУМ.

Чем меньше этот показатель качества, тем захват более ловкий.

Анализ количественной оценки показателей качества. На рис. 2 приведены разные возможные способы захвата шарообразного ОМ захватным устройством Schunk SDH. Полагаем, что центр масс ОМ расположен в его геометрическом центре.

В таблице содержатся рассчитанные значения критериев для способов захвата объекта, которые изображены на рис. 2. Ячейки, содержащие количественную оценку наиболее удачных захватов, выделены серым цветом.

Значения показателей качества для различных способов захвата

	A.1.1⁺	A.1.2⁺	A.1.3⁺	A.2.1⁻	A.2.2⁺	A.2.3⁻	A.2.4⁻
а[*]	0,721	9,581	0,263	0,454	18082,200	17,003	0,354
б^{**}	0,315	0,902	0,156	0,000	625,600	26,009	0,753
в^{**}	0,000	0,000	0,000	0,000	1499,400	0,000	0,000
г^{**}	0,000	0,000	0,000	0,042	1156,000	11,222	0,73
д^{**}	0,000	0,000	0,000	0,000	1499,400	0,000	0,000
е^{**}	0,000	0,000	0,000	0,043	2210,200	4,500	0,354
ж^{***}	0,000	0,000	0,000	0,000	68,000	0,000	0,000
з^{***}	0,000	0,000	0,000	0,000	44,000	29,400	0,866
и^{***}	0,000	0,000	0,000	0,000	68,000	0,000	0,000
к^{***}	0,000	0,000	0,000	0,000	58,867	16,981	0,612
л^{**}	0,278	0,696	0,159	0,083	961,000	14,380	0,730
м^{**}	0,284	0,627	0,160	0,084	908,300	14,370	0,816
н[*]	0,251	0,632	0,109	0,062	14377,200	19,434	0,515
о[*]	0,276	2,636	0,123	0,129	14401,600	9,440	0,486
	A.3.1⁺	A.3.2⁺	A.3.3⁻	Б.1⁺	Б.2⁺	Б.3⁺	Б.4⁻
а[*]	0,286	10,842	0,492	0,395	22,566	0,023	0,178
б^{**}	0,043	4,747	0,869	0,971	9,591	0,030	0,859
в^{**}	0,359	5,334	0,000	0,919	148,545	0,051	0,779
г^{**}	0,344	7,426	0,214	16,028	732,928	1,000	0,529
д^{**}	0,341	9,180	0,000	21,189	1,006	0,580	0,385
е^{**}	0,308	7,931	0,488	0,278	6,601	0,007	0,209
ж^{***}	0,001	0,001	0,000	24,042	732,928	1,000	0,123
з^{***}	0,043	0,973	1,046	2,082	20,314	0,060	0,405
и^{***}	0,001	0,001	0,000	24,042	732,926	1,000	0,007
к^{***}	0,355	6,458	0,523	19,007	2,984	1,000	0,156
л^{**}	0,283	8,835	0,400	1,675	0,982	0,085	0,250
м^{**}	0,069	6,747	0,395	9,826	4,495	0,420	1,060
н[*]	0,320	8,703	0,476	0,168	182,512	0,005	1,138
о[*]	0,344	10,817	0,646	0,609	66,356	0,043	1,575

(Фигура захвата: * – многогранник, ** – многоугольник, *** – отрезок,
+ – критерий максимизируют, - – критерий минимизируют)

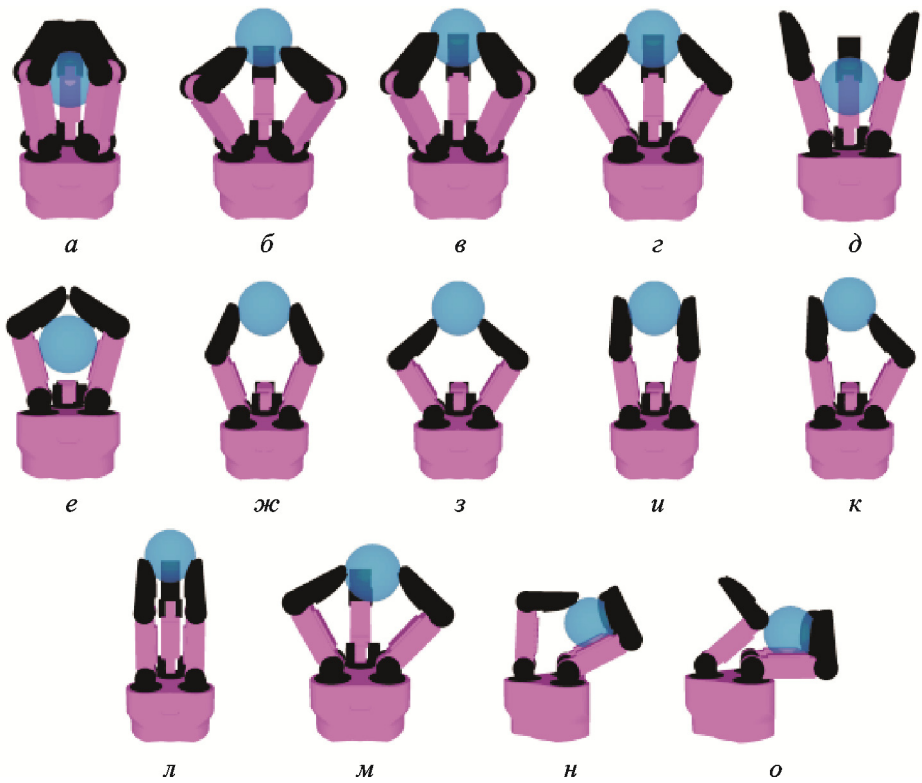


Рис. 2. Способы захвата объекта

Группа показателей А.1 характеризует способность захвата к сопротивлению возмущениям и степень близости к замкнутости по форме. Замкнутость по форме является достаточным, но не необходимым условием наличия у захвата свойства сопротивления возмущениям. Захват может быть замкнутым по силе, что также наделяет его рассматриваемым свойством.

Сравнение способов захватов по критериям А.1.1, А.1.2 и А.1.3 показало, что наиболее удачные объемные захваты. Среди них лучшим является захват *а*, при котором пальцы ЗУМ охватывают ОМ. Наименее удачные, согласно этим критериям, все плоские захваты (рис. 2, *в–к*).

Такой результат можно объяснить тем, что в случае замкнутого по форме захвата неподвижность ОМ обеспечивается за счет расположения контактных регионов между поверхностями ОМ и пальцев ЗУМ, а любой плоский захват не обладает свойством замкнутости по форме — он всегда имеет хотя бы одну степень свободы, по которой пальцы ЗУМ не ограничивают перемещение ОМ. А значит, хотя бы одно сингулярное число матрицы G равно нулю.

Группа показателей А.2 характеризует устойчивость захвата.

Согласно критерию А.2.1, наиболее удачными являются захваты, приведенные на рис. 2, *в, д, ж, з, и, к*. В случае, показанном на рис. 2, *в* и *д*, фигуры захвата — правильные треугольники, способы захвата (см. рис. 2, *ж, з, и, к*) по этому показателю оптимальны в силу того, что их фигуры захвата — отрезки.

Особенность критерия А.2.2 заключается в том, что по этому показателю можно сравнивать между собой только подобные захваты. Наиболее удачным по этому показателю среди объемных захватов является захват, приведенный на рис. 2, а. Среди плоских захватов, содержащих более двух контактных регионов, лучший показан на рис. 2, е. Оптимальными среди захватов, содержащих два контактных региона, являются захваты, приведенные на рис. 2, ж, и. В справедливости результатов анализа по критерию А.2.2 можно убедиться также визуальным сравнением захватов на рис. 2.

Согласно вычисленным значениям критерия А.2.3, расстояние между центроидом фигуры захвата и центром масс ОМ равно нулю для захватов, показанных на рис. 2, в, д, ж, и, а значит такие захваты оптимальны.

Сравнение способов захватов по критерию А.2.4 показало, что наиболее удачными являются захваты, приведенные на рис. 2, в, д, ж, и, поскольку центры независимых контактных областей приходятся на регионы контакта.

Группа показателей А.3 характеризует способность захвата к сопротивлению возмущениям и степень близости к замкнутости по силе.

Согласно критерию А.3.1, наиболее удачными являются захваты, показанные на рис. 2, в и а, поскольку захват тем лучше, чем больше количество направлений, по которым возможна компенсация внешнего возмущения.

Сравнивая способы захватов по критерию А.3.2, выявили, что захват на рис. 2, а является наиболее удачным — он компенсирует внешние воздействия по любому направлению.

По результатам расчета критерия А.3.3 наиболее удачными захватами являются приведенные на рис. 2, в, д, ж, и. В справедливости этого несложно убедиться, поскольку в этих захватах контактные силы направлены по нормали к поверхности ОМ в точке приложения.

Группа показателей Б характеризует ловкость захвата.

Критерий Б.1 оценивает удаленность конфигурации ЗУМ от сингулярного положения. По этому критерию наиболее удачные захваты, представленные на рис. 2, ж, и. Такой критерий качества близок к показателю качества А.1.1, но он помимо модели контактов учитывает конфигурацию ЗУМ.

Согласно критерию Б.2, наиболее удачными являются захваты показаны на рис. 2, г, ж, и. При таких способах захвата ЗУМ имеет возможность перемещения ОМ практически в любом направлении. Наихудшим захватом является захват, приведенный на рис. 2, л, поскольку пальцы ЗУМ вытянуты, а значит, возможность переместить ОМ отсутствует.

Сравнивая способы захватов по критерию Б.3, выявили, что наиболее удачными будут захваты, приведенные на рис. 2, г, ж, и, к. Такие захваты не являются замкнутыми по форме, а значит, имеют большую возможность перемещать ОМ.

По результатам расчета критерия Б.4, наиболее удачным является захват, показанный на рис. 2, и. Этот показатель качества имеет низкую вычислительную сложность и простую физическую интерпретацию, вытекающую из его названия. Но даже в том случае, когда выбранный по этому критерию наилуч-

ший захват позволяет получить удобную конфигурацию ЗУМ с большим диапазоном угловых значений, доступных для движения шарниров пальцев, критерий не гарантирует, что ЗУМ будет способно эффективно прикладывать силы и передавать необходимые скорости объекту.

Показатели качества захвата, связанные со свойствами матрицы G и ограничениями контактных сил, отражают свойства захвата быть замкнутым по силе и форме, что объясняет наличие взаимосвязи между критериями А.1.1, А.1.2, А.1.3, А.3.1, А.3.2 и сходство их оценок. Результаты вычисления показателей качества захватов А.2.1, А.2.3, А.2.4 противоположны этим оценкам.

Взаимосвязь показателя А.2.2 с другими критериями качества неочевидна, поскольку возникает необходимость рассматривать отдельно каждый тип захвата. Результаты вычисления критерия А.3.3 показывают его корреляцию с показателями А.2.1, А.2.3, А.2.4, поскольку при его расчете рассматриваются и фигура захвата, и направление контактных сил. Расчет показателей Б.1, Б.2 и Б.3 основан на вычислении алгебраических свойств матрицы G_j , что обуславливает взаимную корреляцию полученных в соответствии с ними результатов. Сравнивая их со значениями, рассчитанными для показателей А.1.1, А.1.2 и А.1.3, можно видеть, что объемные, охватывающие захваты, накладывающие большое число ограничений на перемещение ОМ, часто не имеют возможности манипулирования объектом, что говорит о возможной отрицательной корреляции критериев Б.1, Б.2 и Б.3 с показателями А.1.1, А.1.2 и А.1.3. Оценка захватов по критерию Б.4 оказалась близка оценке по показателям А.2.1, А.2.2, А.2.4 и А.3.3, что объясняется формой и габаритами выбранного для эксперимента ОМ.

Выводы. Одной из главных задач ловкого манипулирования является определение способа захвата неизвестного объекта. В работе рассмотрены 14 аналитических критериев, которые оценивают качество захвата и связаны с его свойствами. Разработанные алгоритмы и программное обеспечение позволяют выполнить расчет оценки качества захвата в соответствии с каждым из этих показателей.

Приведены результаты расчета оценки качества для различных способов захвата объекта по рассмотренным критериям. Определены способы захвата, обеспечивающие лучшие значения каждого из критериев, и дано физическое обоснование полученного результата.

Основным результатом работы является вывод о невозможности оценки качества захвата только по одному критерию — оценка должна производиться по совокупности параметров, причем каждый из них должен быть включен в общий критерий со своим весовым коэффициентом. Кроме того, остается открытым вопрос о способе сравнения объемного и плоского захватов, поскольку, например, для первого в соответствии с геометрическими критериями рассчитывается объем фигуры захвата, а для второго — площадь или расстояние между контактными регионами. Полученные результаты по остальным рассмотренным в статье критериям качества не позволяют категорически утверждать, что объемный захват всегда лучше плоского.

В дальнейшем планируется развитие алгоритма аналитической оценки захвата в направлении создания метода оценки качества с использованием байесовских сетей доверия, применимого для оценки различных способов захвата с учетом корреляции критериев качества.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Siciliano B., Khatib O.* Handbook of robotics. Berlin: Springer, 2008. 1611 p.
2. *Rimon E., Burdick J.* On force and form closure for multiple finger grasps // Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation. 1996. Vol. 2. P. 1795–1800.
DOI: 10.1109/ROBOT.1996.506972 URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/506972>
3. *Shimoga K.* Robot grasp synthesis algorithms: a survey // Int. Journal of Robotics Research. 1996. Vol. 15. No. 3. P. 230–266. DOI: 10.1177/027836499601500302
URL: <http://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/027836499601500302>
4. *Liu G., Xu J., Li Z.* On geometric algorithms for real-time grasping force optimization // IEEE Transactions on Control Systems Technology. 2004. Vol. 12. No. 6. P. 843–859.
DOI: 10.1109/TCST.2004.833630 URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1347172>
5. *Bruyninckx H., Demey S., Kumar V.* Generalized stability of compliant grasps // Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation. 1998. Vol. 3. P. 2396–2402.
DOI: 10.1109/ROBOT.1998.680699 URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/680699>
6. *Roa M.A., Suarez R.* Grasp quality measures: review and performance // Auton Robots. 2015. Vol. 38. No. 1. P. 65–88. DOI: 10.1007/s10514-014-9402-3
URL: <http://link.springer.com/article/10.1007/s10514-014-9402-3>
7. *León B., Morales A., Sancho-Bru J.* From robot to human grasping simulation. Springer International Publishing, 2014. 261 p.
8. *Li Z., Sastry S.* Task-oriented optimal grasping by multifingered robotic hands // IEEE Journal of Robotics and Automation. 1987. Vol. 4. P. 389–394.
DOI: 10.1109/ROBOT.1987.1087852 URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1087852>
9. *Kim B., Oh S., Yi B., Suh I.* Optimal grasping based on non-dimensionalized performance indices // Proc. IEEE/RJS Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems. 2001. Vol. 2. P. 949–956.
DOI: 10.1109/IROS.2001.976291 URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/976291>
10. *Park Y.C., Starr G.P.* Grasp synthesis of polygonal objects using a three-fingered robot hand // Int. Journal of Robotics Research. 1992. Vol. 11. No. 3. P. 163–184.
DOI: 10.1177/027836499201100301
URL: <http://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/027836499201100301>
11. *Mirtich B., Canny J.* Easily computable optimum grasps in 2D and 3D // Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation–ICRA. 1994. Vol. 1. P. 739–747.
DOI: 10.1109/ROBOT.1994.351399 URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/351399>
12. *Chinellato E., Fisher R., Morales A., Pobil A.* Ranking planar grasp configurations for a three-finger hand // Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation. 2003. Vol. 1. P. 1133–1138.
DOI: 10.1109/ROBOT.2003.1241745 URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1241745>
13. *Chinellato E., Morales A., Fisher R., Pobil A.* Visual quality measures for characterizing planar robot grasps // IEEE Transactions of Systems, Man and Cybernetics: Part C. 2005. Vol. 35. No. 1. P. 30–41. DOI: 10.1109/TSMCC.2004.840061 URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1386451>

14. *Ding D., Liu Y., Wang S.* Computation of 3-D form-closure grasps // IEEE Transactions on Robotics and Automation. 2001. Vol. 17. No. 4. P. 515–522.
DOI: 10.1109/70.954765 URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/954765>
15. *Nguyen V.* Constructing force-closure grasps // Int. Journal of Robotics Research. 1988. Vol. 7. No. 3. P. 3–16. DOI: 10.1177/027836498800700301
URL: <http://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/027836498800700301>
16. *Ponce J., Faverjon B.* On computing three-finger force-closure grasps of polygonal objects // IEEE Transactions on Robotics and Automation. 1995. Vol. 11. No. 6. P. 868–881.
DOI: 10.1109/70.478433 URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/478433>
17. *Pollard N.* Synthesizing grasps from generalized prototypes // Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation. 1996. Vol. 3. P. 2124–2130.
18. *Ferrari C., Canny J.* Planning optimal grasps // Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation. 1992. P. 2290–2295.
19. *Miller A., Allen P.* Examples of 3D grasp quality computations // In Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation. 1999. P. 1240–1246. DOI: 10.1109/ROBOT.1996.506184
URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/506184>
20. *Chinellato E.* Robust strategies for selecting vision-based planar grasps of unknown objects with a three-finger hand. Master of Science Thesis. University of Edinburgh, Division of Informatics, School of Artificial Intelligence, 2002. 99 p.
21. *Klein C., Blaho B.* Dexterity measures for the design and control of kinematically redundant manipulators // Int. Journal of Robotics Research. 1987. Vol. 6. P. 72–83.
DOI: 10.1177/027836498700600206
URL: <http://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/027836498700600206>
22. *Yoshikawa T.* Manipulability of robotic mechanisms // Int. Journal of Robotics Research. 1985. Vol. 4. No. 2. P. 3–9. DOI: 10.1177/027836498500400201
URL: <http://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/027836498500400201>
23. *Salisbury J., Craig J.* Articulated hands: Force control and kinematic issues // International Journal of Robotics Research. 1982. Vol. 1. No. 1. P. 4–17. DOI: 10.1177/027836498200100102
URL: <http://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/027836498200100102>
24. *Human-guided grasp measures improve grasp robustness on physical robot / R. Balasubramanian, L. Xu, P.D. Brook, J.R. Smith, Y. Matsuoka* // Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation. 2010. P. 2294–2301. DOI: 10.1109/ROBOT.2010.5509855
URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5509855>

Лесков Алексей Григорьевич — д-р техн. наук, профессор, директор Дмитровского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 141801, Московская обл., Дмитровский р-н, пос. Орево).

Бажинова Ксения Владимировна — инженер Дмитровского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 141801, Московская обл., Дмитровский р-н, пос. Орево), аспирантка кафедры «Робототехнические системы и мехатроника» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Селиверстова Елена Владимировна — инженер Дмитровского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 141801, Московская обл., Дмитровский р-н, пос. Орево), аспирантка кафедры «Робототехнические системы и мехатроника» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Пробьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Лесков А.Г., Бажинова К.В., Селиверстова Е.В. Методы определения качества захвата объекта // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2017. № 3. С. 122–139.

DOI: 10.18698/0236-3941-2017-3-122-139

METHODS OF GRASP QUALITY EVALUATION

A.G. Leskov¹

agleskov@rambler.ru

K.V. Bazhinova^{1,2}

c8.df.mgtu@gmail.com

E.V. Seliverstova^{1,2}

¹ Dmitrov Branch of Bauman Moscow State Technical University, Orevo, Moscow Region, Russian Federation

² Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

This paper considers the problem of choosing the suitable method for grasping objects. As the grasp must have such properties as the disturbance resistance, dexterity, equilibrium and stability, the selection of the appropriate grasp method is based on comparison of quantitative evaluation of quality measures, associated with these properties. The paper presents the classification of quality measures, as well as the review of the most common performance criteria and methods of their computation. Moreover, we developed an algorithm to evaluate quality measures for an arbitrary grasp. We give the calculation data of the considered criteria and their analysis

Keywords

Automatic grasping, grasp properties, grasp quality, quality measure, analytical grasp evaluation, robotic gripper

REFERENCES

- [1] Siciliano B., Khatib O. Handbook of robotics. Berlin, Springer, 2008. 1611 p.
- [2] Rimon E., Burdick J. On force and form closure for multiple finger grasps. *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*. 1996, vol. 2, pp. 1795–1800. DOI: 10.1109/ROBOT.1996.506972 Available at: <http://ieeexplore.ieee.org/document/506972>
- [3] Shimoga K. Robot grasp synthesis algorithms: a survey. *Int. Journal of Robotics Research*, 1996, vol. 15, no. 3, pp. 230–266. DOI: 10.1177/027836499601500302 Available at: <http://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/027836499601500302>
- [4] Liu G., Xu J., Li Z. On geometric algorithms for real-time grasping force optimization. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2004, vol. 12, no. 6, pp. 843–859. DOI: 10.1109/TCST.2004.833630 Available at: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1347172>
- [5] Bruyninckx H., Demey S., Kumar V. Generalized stability of compliant grasps. *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*. 1998, vol. 3, pp. 2396–2402. DOI: 10.1109/ROBOT.1998.680699 Available at: <http://ieeexplore.ieee.org/document/680699/>
- [6] Roa M.A., Suarez R. Grasp quality measures: review and performance. *Auton Robots*, 2015, vol. 38, no. 1, pp. 65–88. DOI: 10.1007/s10514-014-9402-3 Available at: <http://link.springer.com/article/10.1007/s10514-014-9402-3>

- [7] León B., Morales A., Sancho-Bru J. From robot to human grasping simulation. Springer International Publishing, 2014. 261 p.
- [8] Li Z., Sastry S. Task-oriented optimal grasping by multifingered robotic hands. *IEEE Journal of Robotics and Automation*, 1987, vol. 4, pp. 389–394. DOI: 10.1109/ROBOT.1987.1087852 Available at: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1087852/>
- [9] Kim B., Oh S., Yi B., Suh I. Optimal grasping based on non-dimensionalized performance indices. *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. on Int. Robots and Systems*. 2001, vol. 2, pp. 949–956. DOI: 10.1109/IROS.2001.976291 Available at: <http://ieeexplore.ieee.org/document/976291>
- [10] Park Y.C., Starr G.P. Grasp synthesis of polygonal objects using a three-fingered robot hand. *Int. Journal of Robotics Research*, 1992, vol. 11, no. 3, pp. 163–184. DOI: 10.1177/027836499201100301 Available at: <http://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/027836499201100301>
- [11] Mirtich B., Canny J. Easily computable optimum grasps in 2D and 3D. *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation–ICRA*. 1994, vol. 1, pp. 739–747. DOI: 10.1109/ROBOT.1994.351399 Available at: <http://ieeexplore.ieee.org/document/351399>
- [12] Chinellato E., Fisher R., Morales A., Pobil A. Ranking planar grasp configurations for a three-finger hand. *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, 2003, vol. 1, pp. 1133–1138. DOI: 10.1109/ROBOT.2003.1241745 Available at: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1241745>
- [13] Chinellato E., Morales A., Fisher R., Pobil A. Visual quality measures for characterizing planar robot grasps. *IEEE Transactions of Systems, Man and Cybernetics: Part C*, 2005, vol. 35, no. 1, pp. 30–41. DOI: 10.1109/TSMCC.2004.840061 Available at: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1386451/>
- [14] Ding D., Liu Y., Wang S. Computation of 3-D form-closure grasps. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 2001, vol. 17, no. 4, pp. 515–522. DOI: 10.1109/70.954765 Available at: <http://ieeexplore.ieee.org/document/954765>
- [15] Nguyen V. Constructing force-closure grasps. *Int. Journal of Robotics Research*, 1988, vol. 7, no. 3, pp. 3–16. DOI: 10.1177/027836498800700301 Available at: <http://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/027836498800700301>
- [16] Ponce J., Faverjon B. On computing three-finger force-closure grasps of polygonal objects. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1995, vol. 11, no. 6, pp. 868–881. DOI: 10.1109/70.478433 Available at: <http://ieeexplore.ieee.org/document/478433>
- [17] Pollard N. Synthesizing grasps from generalized prototypes. *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*. 1996, vol. 3, pp. 2124–2130.
- [18] Ferrari C., Canny J. Planning optimal grasps. *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*. 1992, pp. 2290–2295.
- [19] Miller A., Allen P. Examples of 3D grasp quality computations. *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*. 1999, pp. 1240–1246. DOI: 10.1109/ROBOT.1996.506184 Available at: <http://ieeexplore.ieee.org/document/506184>
- [20] Chinellato E. Robust strategies for selecting vision-based planar grasps of unknown objects with a three-finger hand. Master of Science Thesis. University of Edinburgh, Division of Informatics, School of Artificial Intelligence, 2002. 99 p.

[21] Klein C., Blaho B. Dexterity measures for the design and control of kinematically redundant manipulators. *Int. Journal of Robotics Research*, 1987, vol. 6, pp. 72–83.

DOI: 10.1177/027836498700600206

Available at: <http://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/027836498700600206>

[22] Yoshikawa T. Manipulability of robotic mechanisms. *Int. Journal of Robotics Research*, 1985, vol. 4, no. 2, pp. 3–9. DOI: 10.1177/027836498500400201

Available at: <http://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/027836498500400201>

[23] Salisbury J., Craig J. Articulated hands: Force control and kinematic issues. *Int. Journal of Robotics Research*, 1982, vol. 1, no. 1, pp. 4–17. DOI: 10.1177/027836498200100102

Available at: <http://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/027836498200100102>

[24] Balasubramanian R., Xu L., Brook P.D., Smith J.R., Matsuoka Y. Human-guided grasp measures improve grasp robustness on physical robot. *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*. 2010, pp. 2294–2301. DOI: 10.1109/ROBOT.2010.5509855

Available at: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5509855>

Leskov A.G. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Director of Dmitrov Branch of Bauman Moscow State Technical University (Orevo, Moscow Region, 141801 Russian Federation).

Bazhinova K.V. — engineer, Dmitrov Branch of Bauman Moscow State Technical University, (Orevo, Moscow Region, 141801 Russian Federation), post-graduate student of Robotic Systems and Mechatronics Department, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Seliverstova E.V. — engineer, Dmitrov Branch of Bauman Moscow State Technical University (Orevo, Moscow Region, 141801 Russian Federation), post-graduate student of Robotic Systems and Mechatronics Department, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Leskov A.G., Bazhinova K.V., Seliverstova E.V. Methods of Grasp Quality Evaluation. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng.], 2017, no. 3, pp. 122–139. DOI: 10.18698/0236-3941-2017-3-122-139