

Вестник Евразийской науки / The Eurasian Scientific Journal <https://esj.today>

2019, №6, Том 11 / 2019, No 6, Vol 11 <https://esj.today/issue-6-2019.html>

URL статьи: <https://esj.today/PDF/118SAVN619.pdf>

Ссылка для цитирования этой статьи:

Кульгильдинов М.С., Кочетков А.В., Кадыров Ж.Н., Каукаров А.К., Оралбеков Р.О., Камзанов Н.С.
Методическое и математическое описание взаимодействия захватного устройства землеройной машины и
каменных объектов // Вестник Евразийской науки, 2019 №6, <https://esj.today/PDF/118SAVN619.pdf> (доступ
свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.

For citation:

Kulgildinov M.S., Kochetkov A.V., Kadyrov Zh.N., Kaukarov A.K., Oralbekov R.O., Kamsanov N.S. (2019).
Methodological and mathematical description of the interaction of the earthmoving machine gripper and stone objects.
The Eurasian Scientific Journal, [online] 6(11). Available at: <https://esj.today/PDF/118SAVN619.pdf> (in Russian)

УДК 531.53

Кульгильдинов Мурат Сапарбекович

АО «Казахская академия транспорта и коммуникаций имени М. Тынышпаева», Алма-Ата, Республика Казахстан
Заведующий кафедрой
Доктор технических наук, профессор
E-mail: mursap@mail.ru

Кочетков Андрей Викторович

ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», Пермь, Россия
Профессор
Доктор технических наук, профессор
E-mail: soni.81@mail.ru

Кадыров Жаннат Нургалиевич

ТОО «Контора патентного поверенного «Кадыров и партнеры», Алма-Ата, Республика Казахстан
Директор
Доктор технических наук, профессор
E-mail: kadyrov.1954@mail.ru

Каукаров Алтынбек Кубашевич

АО «Казахская академия транспорта и коммуникаций имени М. Тынышпаева», Алма-Ата, Республика Казахстан
Докторант
E-mail: altynbek-79@mail.ru

Оралбеков Рахат Оралбекович

РГП на ПВХ «Восточно-Казахстанский государственный технический университет имени Д. Серикбаева»
Министерства образования и науки Республики Казахстан, Усть-Каменогорск, Республика Казахстан
Докторант
E-mail: roralbekov@mail.ru

Камзанов Нурбол Садыканович

АО «Казахская академия транспорта и коммуникаций имени М. Тынышпаева», Алма-Ата, Республика Казахстан
Докторант
E-mail: mursap@mail.ru

**Методическое и математическое описание
взаимодействия захватного устройства землеройной
машины и каменных объектов**

Аннотация. Применительно к теме исследования из задач исследования геометрии захватывания рабочим органом экскаватора выберем задачу захватывания из бесформенной груды камней или блоков.

Многообразие форм поверхностей захватываемых объектов разумно ограничить классом односвязных везде выпуклых поверхностей. Первым этапом исследования на математических моделях задач захватывания объектов разнообразных форм является аналитическое или иное представление их поверхностей.

В принципе могут быть использованы универсальные представления замкнутых поверхностей, например, в виде разложения по сферическим гармоникам, как это делается, например, для построения точных геометрических моделей поверхностей Земли и различных небесных тел. Однако такое представление громоздко и его применение для рассматриваемых задач нельзя считать оправданным.

Применительно к реальным природным объектам, таким, как валуны, важнейшим является разделение представления поверхностей на составляющие: глобальные и совокупности локальных. Глобальные можно рассматривать, как упрощенные аппроксимирующие, а локальные – как относительно мелкомасштабные отклонения от них. При глобальном представлении задается вся поверхность тела, при совокупности локальных – раздельно участки (применительно к задачам захватывания) – те, на которых могут быть точки контакта с рабочими элементами схвата. Для решения некоторых задач бывает достаточно только глобального представления, для других – только локального.

Применительно к задачам захватывания при неопределенности формы основным и вполне оправданным применительно к решению практических задач является предположение, что контакт с рабочими элементами происходит в дискретных точках.

Для рассматриваемых задач, имеющих практический смысл, целесообразно ограничиться везде выпуклыми многогранными поверхностями, поскольку только на выпуклых участках возможно расположение точек контакта объекта с поверхностями рабочих элементов захватного устройства.

В зависимости от математической модели поверхностей объекта и рабочих элементов схватов землеройных машин геометрические условия контакта задаются или ориентацией касательных (для трехмерной задачи – касательных плоскостей), или также и радиусами кривизны.

Ключевые слова: схват; экскаватор; рабочий орган; землеройная машина; геометрия; каменные объекты; точки контакта; перемещение; перенос

Введение

Применительно к теме исследования из задач исследования геометрии захватывания рабочим органом экскаватора выберем задачу захватывания из бесформенной груды камней или блоков.

Информационный обзор позволил выявить наиболее близкие технические аналоги [1–11].

Многообразие форм поверхностей захватываемых объектов разумно ограничить классом односвязных везде выпуклых поверхностей. Первым этапом исследования на математических моделях задач захватывания объектов разнообразных форм является аналитическое или иное представление их поверхностей.

В принципе могут быть использованы универсальные представления замкнутых поверхностей, например, в виде разложения по сферическим гармоникам, как это делается, например, для построения точных геометрических моделей поверхностей Земли и различных небесных тел. Однако такое представление громоздко и его применение для рассматриваемых задач нельзя считать оправданным.

Применительно к реальным природным объектам, таким, как валуны, важнейшим является разделение представления поверхностей на составляющие: глобальные и совокупности локальных. Глобальные можно рассматривать, как упрощенные аппроксимирующие, а локальные – как относительно мелкомасштабные отклонения от них. При глобальном представлении задается вся поверхность тела, при совокупности локальных – раздельно участки (применительно к задачам захватывания) – те, на которых могут быть точки контакта с рабочими элементами схвата. Для решения некоторых задач бывает достаточно только глобального представления, для других – только локального.

Постановка задачи

Основные варианты способов задания поверхностей в трехмерном пространстве [1–4]:

- глобально, определяющими форму в целом замкнутыми поверхностями в аналитической или цифровой формах;
- локально, только координатами дискретных точек поверхности, в которых предположительно возможны контакты поверхностей объекта и рабочих элементов; указанное множество точек может задаваться из разных соображений, важнейшими для рассматриваемых задач захватывания обычно являются точки, наиболее удаленные от центра;
- комбинированно, как координатами дискретных точек поверхностей объектов, в которых возможен контакт, так и представлениями участков поверхностей вблизи этих точек, – локальными аппроксимациями в различных местных, скорее всего в прямоугольных системах координат, а конкретно – линейными и квадратичными.

Любые конкретные представления поверхностей можно рассматривать, как результат идеализированного представления о реальных формах захватываемых объектов. Это необходимо для того, чтобы на предварительных этапах проектирования при выборе схемных и конструктивных решений можно было просмотреть возможности захватывания объектов различных форм и конфигураций.

Для адекватного представления о возможных реальных ситуациях, следовало бы ввести в рассмотрение представление о множестве (одного или нескольких классов) поверхностей с заданием не этом множестве вероятностной меры.

В качестве способа математического описания целесообразно использовать вероятностные модели, в данном случае функций многих переменных. Однако такой подход не развит, поскольку следовало бы опираться на результаты статистической обработки, которая не представляется возможной.

Многообразие тех и других форм представляется в виде многоаспектной классификации. Глобальное задание всей поверхности тела следует рассматривать, как идеализированное, приспособленное для аналитического представления в виде достаточно простых уравнений.

Решение задачи

Рассмотрим сначала глобальное представление везде замкнутых поверхностей [1].

Поверхность любого реального физического тела должна быть замкнутой, но для рассматриваемых задач взаимодействия с захватным устройством для аналитического представления формы это не обязательно, должны в математической отображаться только те участки поверхности, на которых может быть контакт с рабочими элементами захватного устройства.

В обоих случаях выбор начала системы координат произволен, но для решения рассматриваемых далее задач статики и динамики силового взаимодействия объекта с рабочими элементами захватного устройства удобно выбирать его в центре масс, а при наличии симметрии – в центре симметрии.

Простейшим примером может быть трехмерный объект, поверхность которого представляется эллипсоидом. Уравнение этой поверхности в прямоугольной системе координат, оси которой для фигуры являются центральными и совпадают с осями симметрии, в прямоугольных координатах записывается в виде

$$(x/a)^2 + (y/b)^2 + (z/c)^2.$$

где a, b, c – полуоси эллипсоида. Удобно считать, что это в определенном смысле это объект «идеально округлой симметричной» геометрии.

Для произвольно ориентированной, нецентральной системы координат (когда поверхность повернута относительно осей координат) уравнение поверхности эллипсоида получается приравниванием нулю полной квадратичной формы координат

$$A_{11}x^2 + A_{22}y^2 + A_{33}z^2 + A_{12}xy + A_{12}yz + A_{12}zx + B_1x + B_2y + B_3z + C = 0.$$

При таком задании уравнения поверхности как угодно повернутого эллипсоида его полуоси определяются из решения уравнения 3-ей степени. Для плоской задачи записывается уравнение эллипса, как контура фигуры записывается в прямоугольной центральной системе координат следующим образом

$$(x/a)^2 + (y/b)^2 = d^2.$$

Уравнение повернутого эллипса при этом принимает вид

$$A_{11}x^2 + A_{22}y^2 + A_{12}xy + B_1x + B_2y + C = 0.$$

Применительно к реальным задачам захватывания округлых валунов представление внешней формы в виде эллипсоида, а сечения в виде эллипса заведомо означает грубую идеализацию. Но при взятии за основу именно этих выражений добавлением слагаемых можно варьировать форму в широких пределах.

Определенные преимущества дает представление кривых на плоскости и поверхностей в пространстве в параметрической форме. Для задания кривых на плоскости вводится единственный параметр u , координаты выражаются через него: $x(u), y(u)$. Этот параметр u может иметь наглядный смысл. Например, если u представляет собой полярный угол φ , то уравнение эллипса имеет вид

$$x(\varphi) = a \cos \varphi; \quad y = b \sin \varphi.$$

Если в качестве параметра сохраняется тот же полярный угол φ , то большое многообразие форм может быть получено заменой одной гармоники с периодом в один оборот суммой гармоник, например, без фазового сдвига

$$x(\varphi) = \sum [a_k \cos k\varphi];$$
$$y = \sum b_k \sin k\varphi.$$

Однако параметр u , как независимая переменная, может не иметь наглядную интерпретацию.

Поверхности в трехмерном пространстве при их параметрическом задании требуют введения двух независимых параметров u_1 и u_2 и тогда координаты точек поверхностей выражаются как их функции

$$x(u_1, u_2), y(u_1, u_2), z(u_1, u_2).$$

Наиболее простым и исторически самым старым примером является задание координат точек сферической поверхности в виде функции широты и долготы. Параметрические поверхности широко используются в прикладной геометрии и компьютерной графике для представления сложных поверхностей, как правило, не целиком, а по частям. В практике проектирования изделий со сложными поверхностями (например, кузовов легковых автомашин) общая поверхность разделяется на части; каждая из них имеет свое собственное локальное представление.

К числу наиболее распространенных для локальных представлений относятся поверхности Безье. Граница поверхности Безье состоит из кривых Безье, границами определяется представление в локальной зоне.

Точки, определяющие поверхность, определяют также кривые ее границы, включая нормали на них. Это позволяет создавать гладкие составные поверхности, то есть использовать поверхности Безье.

На практике применяется в основном поверхности Безье, например, бикубическая третьего порядка (в этом случае типовым модулем является четырехугольник, задаваемый шестнадцатью точками). Во всех случаях рационально построенная поверхность Безье отличается тем, что каждой точке в ее определении назначен некоторый «вес», определяющий степень ее влияния на форму поверхности.

Используются также B -сплайновые поверхности, обычно бикубические. Как и поверхность Безье, она определяется шестнадцатью точками, однако она в общем случае не проходит через эти точки. Однако B -сплайны удобно использовать в качестве крупных фрагментов, так как они хорошо стыкуются друг с другом при использовании общей сетки вершин, а сами вершины позволяют явным образом задавать нормали и касательные на границах.

При необходимости более гибкого управления формой поверхности применяют рациональные B -сплайны, неоднородные B -сплайны, а также комбинированный вариант – неоднородные рациональные B -сплайны (NURBS).

Использование двухпараметрического представления трехмерных поверхностей позволяет получать и записывать решения ряда важных прикладных задач в компактной форме. Введем символические представления в форме

$$\frac{D(x, y)}{D(u, v)} = \left| \begin{array}{cc} X'_u & X'_v \\ Y'_u & Y'_v \end{array} \right|, \frac{D(y, z)}{D(u, v)} = \left| \begin{array}{cc} Y'_u & Y'_v \\ Z'_u & Z'_v \end{array} \right|, \frac{D(z, x)}{D(u, v)} = \left| \begin{array}{cc} Z'_u & Z'_v \\ X'_u & X'_v \end{array} \right|.$$

Тогда нормаль к поверхности определяется следующим образом

$$\frac{\left(\frac{D(y,z)}{D(u,v)}, \frac{D(z,x)}{D(u,v)}, \frac{D(x,y)}{D(u,v)} \right)}{\sqrt{\left(\frac{D(x,y)}{D(u,v)} \right)^2 + \left(\frac{D(y,z)}{D(u,v)} \right)^2 + \left(\frac{D(z,x)}{D(u,v)} \right)^2}}$$

Применительно к задачам захватывания твердого тела с аналитически заданной поверхностью нормали определяют линии действия нормальных составляющих реакций в точках контакта с рабочими элементами захватных устройств.

Уравнение касательной плоскости в заданной точке с координатами x_0, y_0, z_0 тогда записывается следующим образом

$$\frac{D(y,z)}{D(u,v)_{u_0v_0}}(x-x_0) + \frac{D(z,x)}{D(u,v)_{u_0v_0}}(y-y_0) + \frac{D(x,y)}{D(u,v)_{u_0v_0}}(z-z_0) = 0$$

Применительно к той же общей задаче захватываемого твердого тела важность определения касательных плоскостей в точках контакта с поверхностями рабочих элементов определяется тем, что именно в этих плоскостях действуют силы трения. Наряду с этим представляет интерес определение свойств кривизны поверхностей вблизи точек контакта. При этом используются известные соотношения аналитической геометрии поверхностей в трехмерном пространстве. Это важно для решения задач изменения несущей способности захватного устройства, когда в процессе захватывания захватываемый объект поворачивается и точки контакта его поверхности с рабочими элементами изменяют свое положение.

Во всех случаях представление поверхностей захватываемых валунов гладкими поверхностями, в том числе описываемыми достаточно простыми выражениями, физически вполне оправдано.

Можно отметить, что происхождение валунов геологического формообразования в процессе силового их обкатывания в подошвах древних ледников при их медленном движении имеет аналогии с реальными, в том числе современными технологическими процессами получения сферических заготовок при пластическом деформировании при длительном катании между двумя дисками. Поэтому нет смысла искать возможности представления как угодно сложных односвязных поверхностей. Однако целесообразно представить возможности аналитического представления поверхностей по некоторым интуитивно понятным, но неформализованным признакам.

Для постановки и решения задач захватывания необходимо задание в аналитической форме уравнений поверхностей рабочих элементов самих захватных устройств. Они могут быть получены непосредственно из трехмерной модели захватного устройства, которая строилась в процессе компьютерного проектирования.

Использование указанных матричных преобразований виртуальных поворотов для описания положения захватываемого объекта при математическом моделировании необходимо для решения двух задач:

- при захватывании: подвод захватного устройства в такой ориентации, при котором захватывание будет надежно;
- протекание самого процесса захватывания (объект в процессе взаимодействия под действием сил от рабочих элементов может поворачиваться и перемещаться).

Представленные выше формулы преобразования при поворотах систем координат используются при рассмотрении влияния угловой ориентации захватываемого объекта.

Основной является задача захватывания одного жесткого объекта, форма которого достоверно не задана, но относительно свойств форм поверхностей могут предполагаться некоторые универсальные свойства. Применительно к задачам захватывания при неопределенности формы основным и вполне оправданным применительно к решению практических задач является предположение, что контакт с рабочими элементами происходит в дискретных точках.

В действительности это зоны реального и возможного контакта; особенности контактного упругого взаимодействия при учете контактной деформируемости важны для некоторых классов задач, в первую очередь для подшипников качения. Однако применительно к захватыванию объектов природного происхождения ввиду естественной неопределенности формы и размеров захватываемых объектов в предположении, что прочность не очень мала, указанная модель контактов в дискретных точках представляется вполне достаточной.

Рассмотрим общую задачу представления трехмерных поверхностей применительно к описанию геометрии объекта, подлежащего захватыванию. На основе такого описания определяются геометрические условия возможности захватывания и подготавливается база для силового анализа.

Можно представить, что дискретная модель объекта совокупностью точек в пространстве с заданными координатами. Грубая непрерывная (но негладкая) аппроксимация поверхности наглядно может быть представлена в виде неправильного многогранника, причем в общем случае грани могут представлять собой плоские фигуры с различным числом вершин.

Унифицированным, в известной степени универсальным и получившим широкое распространение является представление многогранной поверхности с треугольными гранями, вершины которых представляют собой заданные точки. Аналитическое представление подобных поверхностей задается в виде графов, для которых составляются матрицы смежности и инцидентности. В теории правильных многогранников такими являются тетраэдр, додекаэдр и икосаэдр.

В рамках компьютерных технологий такой подход сводится к нашедшим широкое применение методологии получения и использования TIN-представлений или TIN-файлов произвольных (в том числе и достаточно сложных) поверхностей. Структура данных TIN позволяет приближенно представлять поверхности любых типов в виде многогранников с плоскими треугольными гранями. Сам термин TIN (triangulated irregular network) в переводе означает «нерегулярная триангуляционная сеть».

Слово «триангуляционная» указывает на способ построения оптимизированного набора треугольников по набору точек, положение которых в пространстве задано. Треугольники дают хорошее представление о локальной части поверхности, так как три точки со значениями z однозначно определяют плоскость в трехмерном пространстве. TIN строятся по 3D точкам, то есть точкам, имеющим три координаты (X, Y, Z) .

По этим исходным точкам выполняется триангуляция по набору точек. В TIN треугольники называют гранями (faces), точки становятся узлами (nodes) граней, а линии граней называют ребрами (edges). Каждая треугольная грань TIN является частью плоскости в трехмерном пространстве. Все грани в TIN точно смыкаются с соседними в каждом узле и вдоль каждой грани. Плоские грани не могут пересекать друг друга, точнее, каждая из граней не имеет продолжения за линией пересечения с другой гранью. Существующее программное обеспечение TIN-представлений широко используется во многих приложениях.

«Сеть» отражает топологическую структуру, которая присуща TIN. Такая структура делает возможным любой, в том числе сложный анализ поверхности. Пример фрагмента TIN-поверхности изображен на рисунке 1а.

Если считается, что при задании поверхности объекта мелкие конкретные подробности формы участков несущественны, а важно общее правильное представление об ориентации, то при идеологии TIN достаточно рассматривать тетраэдр (рисунок 1б) с четырьмя вершинами, четырьмя треугольными гранями (конечно в общем случае различных размеров гранями и шестью ребрами).

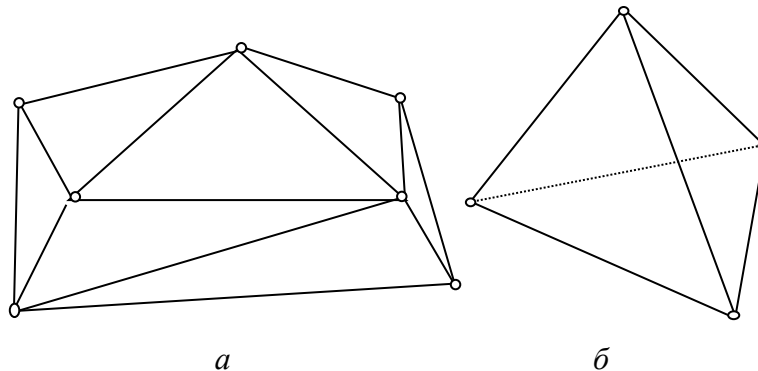


Рисунок 1. Представление любых поверхностей в виде многогранников с плоскими треугольными гранями (рисунок авторов)

Видно, что в вершинах могут сходиться три и более плоских треугольных граней. Основной признак нерегулярности определяет ключевое преимущество TIN в модельном представлении поверхностей – точки могут располагаться с переменной плотностью для моделирования поверхности, что активно используется для описания ровных или плавно меняющихся участков поверхности достаточно задания небольшого числа точек, для описания областей с резко изменяющимися поверхностями нужно задавать более густую сеть точек.

Однако все же нужно учитывать для рассматриваемых задач захватывания натуральных объектов наличие острых углов тетраэдра представляется неправдоподобным. Лучше исходной, хотя и грубо схематизированной представляется форма куба. В TIN-модели реальный куб должен представляться не прямоугольными, а парами треугольных граней (рисунок 2а).

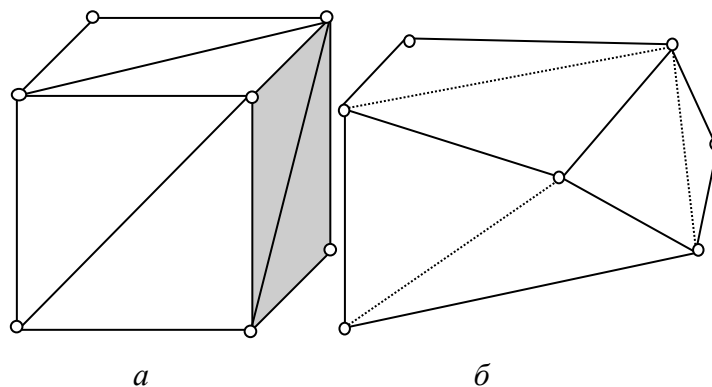


Рисунок 2. Пример представления поверхностей тела в виде куба или призмы многогранником с треугольными гранями (рисунок авторов)

При этом общее число вершин остается неизменным и равным восьми, число треугольных граней увеличивается до двенадцати, а число ребер – до восемнадцати. При подобном представлении куба или прямоугольного параллелепипеда пары треугольных граней лежат в одних плоскостях.

Но взяв такую кубическую форму за основу, простой трансформацией плоских четырехугольных (трансформированных, уже не прямоугольных) граней, изгибанием и

образованием углов по выделенным пунктиром диагональным ребрам, как на рисунке 2б (для изображенных трех граней шестигранника произвольного вида) можно получить возможности более гибкой трансформации общей формы поверхности, ограничивающей объем объекта. При этом общее число угловых точек (вершин) остается равным восьми.

В принципе с увеличением числа граней по желанию можно получать пространственные формы поверхностей с вогнутыми областями. Однако для рассматриваемых задач, имеющих практический смысл, целесообразно ограничиться везде выпуклыми многогранными поверхностями, поскольку только на выпуклых участках возможно расположение точек контакта объекта с поверхностями рабочих элементов захватного устройства.

Поверхность одного и того же объекта может быть представлена или в виде единого уравнения, или совокупностью точек, или многогранниками. Соотношение между такими аппроксимирующими представлениями и реальной формой объекта могут быть различными.

В частности, аппроксимирующая поверхность может быть или описанной в реальную поверхность, или описанной вокруг нее.

К тому же нужно учитывать, что сложность аппроксимирующих поверхностей (например, число точек на границах или плоских граней) может быть различной. Во всех случаях целесообразно использовать специализированные компьютерные программы 3D-проектирования.

В соответствии с этими общими качественными представлениями далее при составлении анализе условий статического равновесия объекта в захватном устройстве в пренебрежении контактными деформациями считается, что контакт осуществляется в дискретных точках.

При этом в зависимости от математической модели поверхностей объекта и рабочих элементов схватов землеройных машин геометрические условия контакта задаются или ориентацией касательных (для трехмерной задачи – касательных плоскостей), или также и радиусами кривизны. При этом, естественно, форма поверхностей вне зон контакта не имеет значения. Это для плоской задачи иллюстрируется рисунком 3, где существенны только изображенные сплошными линиями участки поверхностей (в том числе дополняющие объем выпуклыми фрагментами), а пунктирными – варианты несущественных участков (в данном случае – выемки), на которых контакта рабочих элементов с объектом практически не может быть.

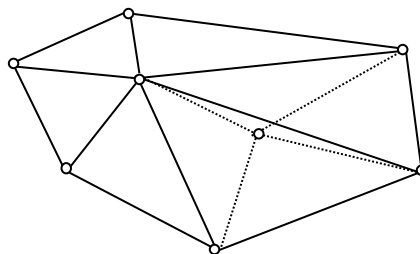


Рисунок 3. Представление поверхности для задания геометрических условий контакта с последующим определении ориентации нормалей и касательных к поверхности в различных точках (рисунок авторов)

Обсуждение полученных результатов

Отметим, что для многих практических задач захватывания области возможных контактов поверхностей объектов с поверхностями рабочих элементов захватных устройств

ограничены; задание и численное представление поверхностей вполне достаточно нужно только именно в этих областях. Дополнительно при этом требуется лишь привязка к единой системе координат [8–11].

Выводы

Основной является задача захватывания одного жесткого объекта, форма которого достоверно не задана, но относительно свойств форм поверхностей могут предполагаться некоторые универсальные свойства. Применительно к задачам захватывания при неопределенности формы основным и вполне оправданным применительно к решению практических задач является предположение, что контакт с рабочими элементами происходит в дискретных точках.

Для рассматриваемых задач, имеющих практический смысл, целесообразно ограничиться везде выпуклыми многогранными поверхностями, поскольку только на выпуклых участках возможно расположение точек контакта объекта с поверхностями рабочих элементов захватного устройства.

В зависимости от математической модели поверхностей объекта и рабочих элементов схватов землеройных машин геометрические условия контакта задаются или ориентацией касательных (для трехмерной задачи – касательных плоскостей), или также и радиусами кривизны. При этом, естественно, форма поверхностей вне зон контакта не имеет значения.

Направлением будущих исследований является взаимодействия рабочего органа землеройной машины и крупного каменного объекта в статике и в движении с учетом локального и глобального представления поверхностей объекта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Челпанов И.Б., Колпашников С.Н. Схваты промышленных роботов. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1989.– 287 с: ил.
2. Баловнев В.И. Моделирование процессов взаимодействия со средой рабочих органов дорожно-строительных машин. – М.: Машиностроение, 1994. – 452 с.
3. Ананин В.Г. Теория и расчет параметров рабочего оборудования одноковшовых экскаваторов с механическим приводом: дис. ... докт. техн. наук. – Томск, 2007. – 281 с.
4. Павлов В.П. Методология эффективного проектирования одноковшовых экскаваторов: автореф. ... докт. техн. наук. – М., 2008. – 43 с.
5. Integrity assessment and determination of residual fatigue life of vital parts of bucket-wheel excavator operating under dynamic loads Engineering Failure Analysis, Dušan Arsić, Nebojša Gnjatović, Simon Sedmak, Aleksandra Arsić, Milan Uhričik, Volume 105, November 2019, Pages 182–195.
6. Altynbek Kaukarov, Natalia Kokodeeva, Andrey Kochetkov, Leonid Yankovsky and Igor Chelpanov. Capture of Large Objects by the Earthmoving Machine's Implement During Operation on Motor and Toting Roads Advances in Intelligent Systems and Computing, VIII International Scientific Siberian Transport Forum Trans Siberia 2019, Volume 2 Volume 1116 (2020) DOI: 10.1007/978-3-030-37919-3 <https://www.springer.com/us/book/9783030379186>.
7. Evaluation of Single-bucket Excavators Energy Consumption. Procedia Engineering, A.P. Komissarov, Y.A. Lagunova, O.A. Lukashuk Volume 150, 2016, Pages 1221–1226.
8. Bucket Wheel Excavator Damage by Fatigue Fracture – Case Study Procedia Materials Science, Darko Danicic, Stojan Sedmak, Dragan Ignjatovic, Slobodan Mitrovic. Volume 3, 2014, Pages 1723–1728.
9. Determination of Residual Fatigue Life of Welded Structures at Bucket-Wheel Excavators through the Use of Fracture M. Arsić, S. Bošnjak, N. Gnjatović, S.A. Sedmak, Z. Savić. Mechanics Procedia Structural Integrity, Volume 13, 2018, Pages 79–84.
10. Bucket trajectory classification of mining excavators Automation in Construction, Rashi Tiwari, Jeremy Knowles, George Danko, Volume 31, May 2013, Pages 128–139.
11. Flexible virtual fixtures for human-excavator cooperative system. Hao Feng, Chenbo Yin, Rong Li, Wei Ma, Junjing Zhou. Automation in Construction, Volume 106, October 2019, Article 102897.

Kulgildinov Murat Saparbekovich

Kazakh academy of transport and communications named after M. Tynyshpaev, Alma-Ata, Republic of Kazakhstan
E-mail: mursap@mail.ru

Kochetkov Andrey Viktorovich

Perm national research polytechnical university, Perm, Russia
E-mail: soni.81@mail.ru

Kadyrov Zhannat Nurgalievich

Office of the patent attorney «Kadyrov and partners», Alma-Ata, Republic of Kazakhstan
E-mail: kadyrov.1954@mail.ru

Kaukarov Altunbek Kubachevich

Kazakh academy of transport and communications named after M. Tynyshpaev, Alma-Ata, Republic of Kazakhstan
E-mail: altynbek-79@mail.ru

Oralbekov Rakhat Oralbekovich

D. Serikbayev east Kazakhstan state technical university, Ust-Kamenogorsk, Republic of Kazakhstan
E-mail: roralbekov@mail.ru

Kamsanov Nurbol Sadykanovich

Kazakh academy of transport and communications named after M. Tynyshpaev, Alma-Ata, Republic of Kazakhstan
E-mail: mursap@mail.ru

Methodological and mathematical description of the interaction of the earthmoving machine gripper and stone objects

Abstract. In relation to the research topic, we will select the problem of grabbing from a shapeless pile of stones or blocks from the problems of studying the geometry of grabbing by the working body of the excavator.

It is reasonable to limit the variety of surface shapes of captured objects to the class of single-connected convex surfaces everywhere. The first stage of research on mathematical models for capturing objects of various shapes is an analytical or other representation of their surfaces.

In principle, universal representations of closed surfaces can be used, for example, in the form of spherical harmonics expansion, as is done, for example, for building accurate geometric models of The earth's surfaces and various celestial bodies. However, this representation is cumbersome and its application to the problems under consideration cannot be considered justified.

When applied to real natural objects, such as boulders, the most important thing is to divide the representation of surfaces into components: global and local aggregates. Global ones can be considered as simplified approximating ones, while local ones can be considered as relatively small – scale deviations from them. In the global view, the entire surface of the body is set, in the case of a set of local ones, separate sections (in relation to capture tasks) are defined – those on which there may be points of contact with the working elements of the grip. Some tasks require only a global view, while others require only a local view.

In the case of capture problems with shape uncertainty, the basic assumption that contact with working elements occurs at discrete points is quite justified in the case of solving practical problems.

For the problems under consideration, which have practical meaning, it is advisable to limit ourselves to convex polyhedral surfaces everywhere, since only on convex sections is it possible to

locate the points of contact of the object with the surfaces of the working elements of the gripper device.

Depending on the mathematical model of the object surfaces and working elements of earthmoving machines, the geometric contact conditions are set either by the orientation of the tangents (for a three – dimensional problem, tangent planes), or also by the radii of curvature.

Keywords: tong; excavator; working body; earthmoving machine; geometry; stone objects; contact points; moving; transfer