

УДК 621.865

DOI 10.35211/1990-5297-2021-9-256-58-68

С. И. Савин¹, Л. Ю. Ворочаева²**КЛАССИФИКАЦИОННЫЕ ПРИЗНАКИ ТЕНСЕГРИТИ-РОБОТОВ:
НАЗНАЧЕНИЕ И КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ**¹ Университет Иннополис² Юго-Западный государственный университет
s.savin@innopolis.ru

В работе выделены классификационные признаки тенсегрити-роботов, наиболее детально рассмотрены их классификации по назначению (стационарные и мобильные устройства) и конструктивным особенностям (форме, варианту изменения конфигурации и наличию и расположению приводов).

Ключевые слова: тенсегрити-роботы, классификационные признаки, назначение, конструктивные особенности.

S. I. Savin¹, L. Yu. Vorochaeva²**CLASSIFICATION FEATURES OF TENSEGRITY ROBOTS:
PURPOSE AND DESIGN FEATURES**¹ Innopolis University² Southwest State University

In this paper the classification features of tensegrity robots are highlighted, and their classification by purpose (stationary and mobile devices) and design features (shape, configuration options and the presence and location of drives are considered in detail).

Keywords: tensegrity robots, classification features, purpose, design features.

Введение

В настоящее время тенсегрити-роботы представляют собой достаточно новый, не до конца изученный и при этом быстро развивающийся класс робототехнических устройств. В основе конструкций данных роботов лежат тенсегрити-структуры, построенные на принципах сжатия и растяжения. В данной работе кратко описаны история возникновения термина «тенсегрити», а также основные особенности таких структур и обеспечиваемые ими преимущества.

Для более детального понимания принципов функционирования тенсегрити-роботов и имеющихся у них возможностей движения в работе предложены классификационные признаки таких устройств, причем более подробно рассмотрены только два из них: назначение и конструктивные особенности. Это обусловлено их универсальностью для широкого круга тенсегрити-роботов независимо от особенностей их применения, поставленных перед ними задач и т. д.

**1. История создания тенсегрити-роботов,
основные термины**

Термин «тенсегрити» введен Б. Фуллером в 60-е годы 20 столетия и происходит от английского *tensional integrity*, что можно перевести как «целостность посредством растяжения» [1]. Структура тенсегрити представляет собой конструкцию из стержней и тросов, в которой стержни работают на сжатие, а тросы – на рас-

тяжение. Таким образом, элементы конструкции испытывают только два типа нагрузок: чистое сжатие, либо чистое натяжение. Это означает, что конструкция выйдет из строя только в том случае, если тросы разорвутся или стержни прогнутся. Стабильность и жесткость тенсегрити-структур связана с естественно происходящим распределением нагрузок по ее элементам.

Первая структура, получившая название «тенсегрити», была разработана К. Снелсоном в конце 1940-х гг. и представляла собой двух-модульную колонну (рис. 1) [2].

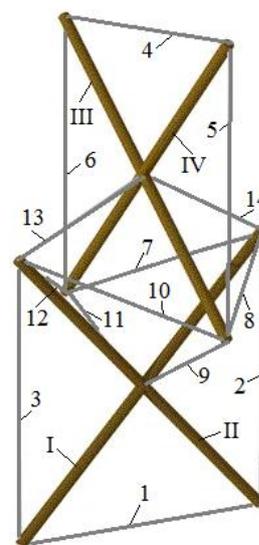


Рис. 1. Первая тенсегрити структура:
I-IV – стержни; 1-14 – тросы

К особенностям данных структур можно отнести следующие:

1. Высокое отношение жесткости к массо-геометрическим характеристикам [3, 4]. Это обусловлено равномерным распределением деформации по всей конструкции, а также очень быстрым обратимым переориентированием компонентов при деформировании структуры без их разрушения.

2. Модульность. Тенсегрити-структура является законченной конструкцией, но при этом она может комбинироваться с другими тенсегрити-структурами, образуя большую систему тенсегрити.

3. Иерархичность. Меньшие тенсегрити-структуры могут функционировать как компоненты сжатия или растяжения в большей системе тенсегрити, которая, в свою очередь, может выполнять аналогичную функцию в еще более крупных системах.

Первоначально тенсегрити-структуры использовались в архитектуре и строительстве для создания масштабных сооружений: крыш стадионов; рам мостов; раздвигаемых конструкций, аналогичных самораскрывающимся антеннам [5]. В настоящее время одним из перспективных направлений применения тенсегрити-структур является робототехника.

Последнее обусловлено тем, что тенсегрити-структуры обладают малой массой по сравнению с роботами других конструкций и при этом имеют высокие прочностные характеристики. Также тенсегрити-роботы имеют гибкую и подвижную структуру, что позволяет им эффективно гасить удары и в случае необходимости складываться без вреда для структуры в целом. Для многих конструкций тенсегрити-роботов смещение одной ее части конструкции отражается на другой. Это может рассматриваться как преимущество данных устройств и может использоваться для наиболее эффективного передвижения тенсегрити роботов, например, в режиме резонанса.

Использование термина «тенсегрити» зачастую выходит за пределы строгого определения, дополнительно включая более сложные конструкции (например, такие, где часть элементов работает как на растяжение/сжатие, так и на изгиб). Это позволяет говорить о делении структур на так называемые «чистые тенсегрити» и «тенсегрити-подобные» конструкции, как показано на рис. 2.

Чистой тенсегрити-структурой считается набор тел, работающих только на сжатие (стерж-

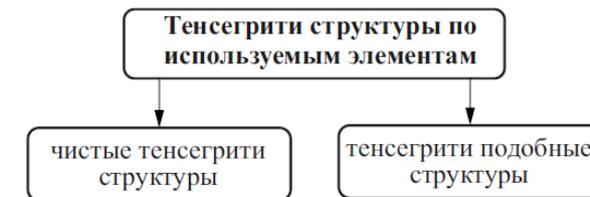


Рис. 2. Классификация тенсегрити-структур по используемым в них элементам

ней), соединенных упругими элементами, работающими только на растяжение (тросами). К тенсегрити-подобным структурам относятся все прочие, состоящие из стержней и тросов, имеющие существенные сходства с чистыми тенсегрити-структурами. Также к тенсегрити-подобным можно отнести структуры, в которых помимо стержней используются уголки, сферические конструкции и т. д. Далее будем рассматривать оба типа тенсегрити структур.

Существует большое разнообразие классификационных признаков тенсегрити-структур, что и показано на рис. 3. В этой работе остановимся на наиболее значимых и универсальных с точки зрения их использования в робототехнике: на назначении и конструктивных особенностях. Подходы к проектированию, методы исследования и методы управления являются более узкими и существенно отличаются в зависимости от поставленных задач конкретного исследования.

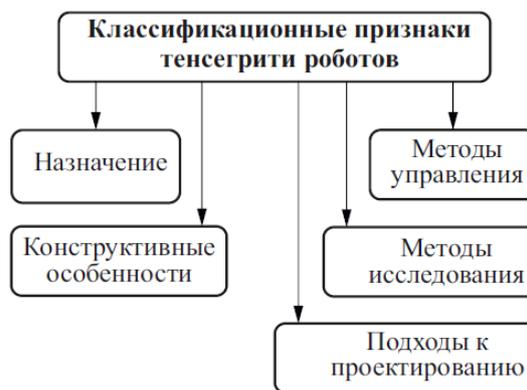


Рис. 3. Классификационные признаки тенсегрити-структур

2. Классификация тенсегрити-роботов по назначению

С точки зрения назначения тенсегрити-роботы можно разделить на два больших класса: стационарные, представляющие собой манипуляторы, и мобильные (рис. 4).

Мобильные тенсегрити-роботы, в свою очередь, могут быть разделены на четыре категории.

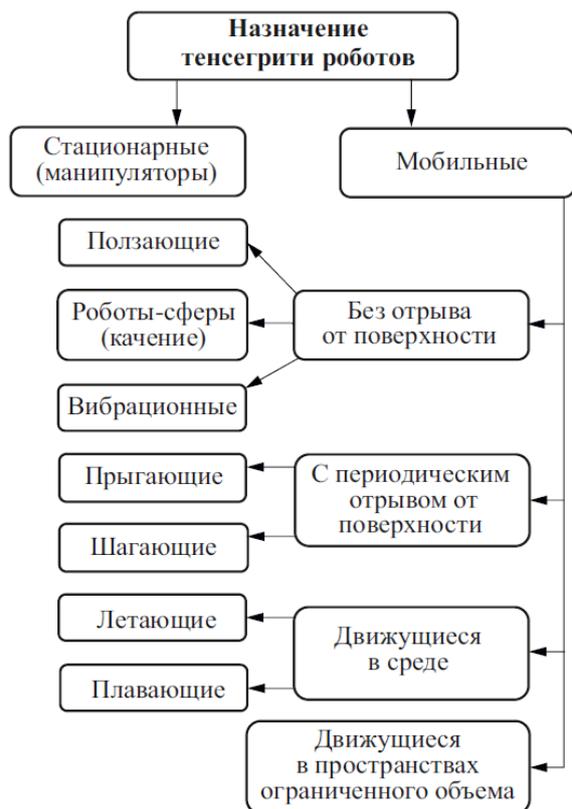


Рис. 4. Классификация назначений тенсегрити-роботов

К первой относятся роботы, перемещающиеся по поверхности без отрыва от нее. К ним мож-

но отнести ползающие устройства или перемещающиеся при помощи качения роботы-сферы. Вторую категорию образуют роботы, движущиеся с периодическим отрывом от поверхности; к ней относятся прыгающие и шагающие устройства. Третья категория тенсегрити-роботов перемещается при постоянном взаимодействии с окружающей средой (водной или воздушной). В соответствии с этим можно выделить плавающие и летающие системы (последние пока находятся только на стадии разработок, в открытой печати информации о них нет, поэтому рассматривать их более детально в данной работе не будем). Четвертую категорию составляют тенсегрити-роботы, которые перемещаются в пространствах ограниченного объема (например, внутри труб, вентиляционных шахт). Рассмотрим каждую из категорий тенсегрити-роботов более подробно.

2.1. Стационарные тенсегрити-роботы

Тенсегрити-манипуляторы, имитирующие поведение руки человека, представлены в работе [6] (рис. 5, а); манипуляторы отличаются между собой конструкцией плеча, что наглядно показано на рис. 5, б и 5, в. Конструкция локтя руки приведена на рис. 5, г. Обе конструкции имеют четыре активные степени подвижности.

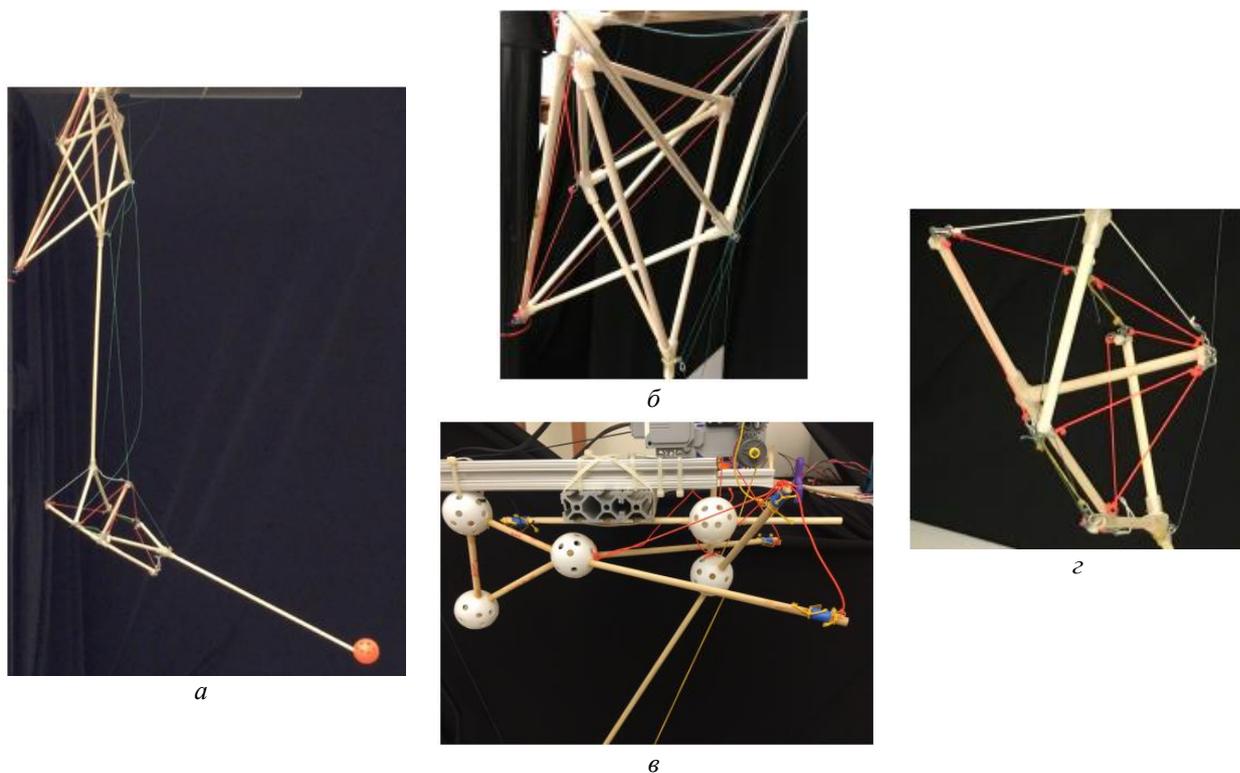


Рис. 5. Тенсегрити манипулятор:
а – рука; б, в – плечо; г – локоть

Такие манипуляторы обладают более широким спектром возможных движений, более широкой рабочей областью по сравнению с классическими конструкциями жестких манипуляторов, что позволит в дальнейшем использовать их в экзоскелетах, в роботах, непосредственно взаимодействующих с человеком, а также в качестве манипуляторов на космических кораблях и орбитальных станциях.

В работе [7] проведен сравнительный анализ четырех тенсегрити-манипуляторов, отличающихся конструкциями плеча; оценены реализуемые устройствами траектории (рис. 6).

Преимуществом Simple Saddle Model является простота конструкции и малое число элементов (рис. 6, а). В более сложной структуре Com-

plex Saddle Model стержни моделируют ключичную кость (желтая), которая соединяется с лопаточной костью (бирюзовая) и плечевой костью (розовая). Тросы в этой модели имитируют бицепсы, трицепсы и дельтовидные мышцы (рис. 6, б). Suspended Tubercle Model является наиболее структурно сложной моделью плеча (рис. 6, в). Эта модель состоит из ключичной кости (желтый элемент в верхней части рисунка), лопатки (горизонтальный бирюзовый элемент), акромиона (желтый, двойной элемент «Y») и головки плечевой кости (вертикальный бирюзовый элемент). Interlocked Tetrahedron является наименее биологически адаптированной моделью, но при этом ее отличает простота изготовления и механическая стабильность (рис. 6, г).

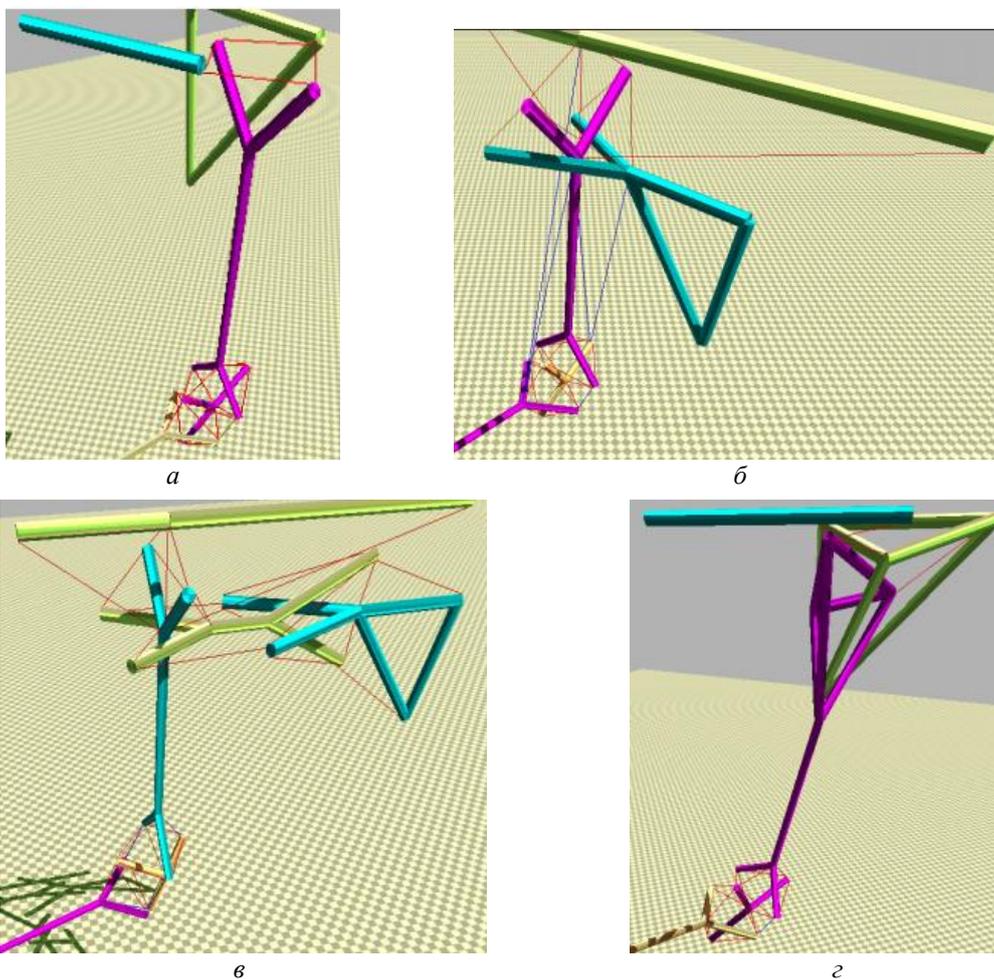


Рис. 6. Конструкции тенсегрити-манипуляторов:
а – Simple Saddle Model; б – Complex Saddle Model; в – Suspended Tubercle Model; г – Interlocked Tetrahedrons

2.2. Ползающие тенсегрити-роботы

Примером ползающего тенсегрити-робота может служить робот Tetraspine, описанный в работе [8] и показанный на рис. 7, а. Робот состоит из последовательности сегментов, каж-

дый из которых имеет форму тетраэдра; стержни соединены между собой шестью тросами. Результатом численного исследования устройства является его успешное передвижение по различным типам неровных поверхностей.

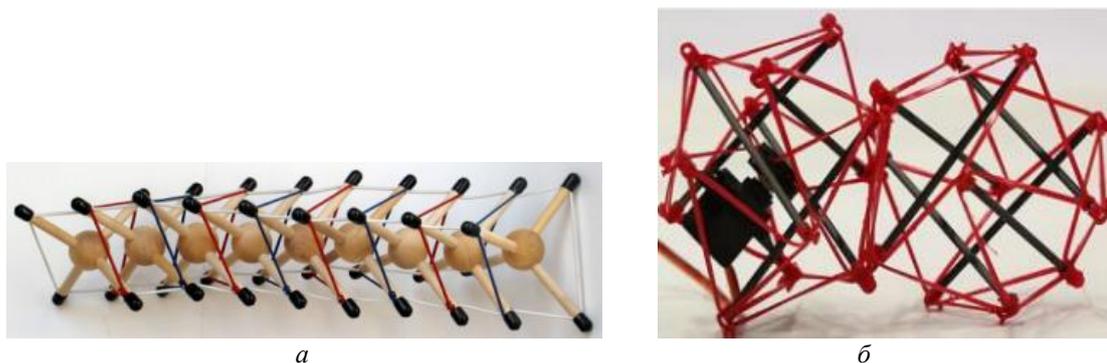


Рис. 7. Ползающие тенсегрити-роботы:
a – в работе [8]; *б* – в работе [9]

В статье [9] исследуется червеподобная походка ползающего тенсегрити-робота, состоящего из нескольких однотипных модулей (рис. 7, *б*).

При этом для разработки конструкции устройства учитывались три критерия:

1. Модуль должен деформироваться во всех направлениях, для увеличения морфологического разнообразия конфигураций.

2. Структура тенсегрити-модуля должна включать наименьшее возможное количество стержней и тросов для облегчения изготовления и сборки.

3. Сетевые конфигурации модулей, при которых внутренний объем не пересекается, что позволяет размещать в нем полезную нагрузку.

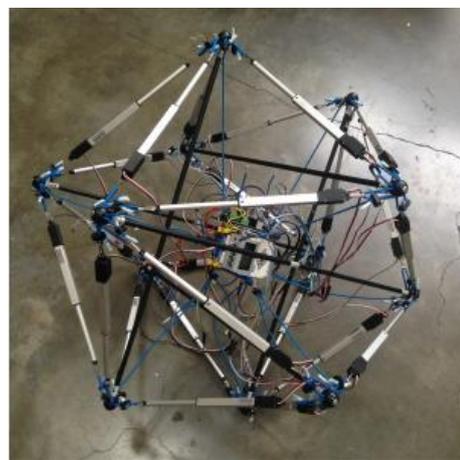
2.3. Роботы-сферы

Роботы-сферы перемещаются по поверхности без отрыва от нее путем качения и смены контактных площадок. В работе [10] представлено исследование 6-стержневого робота-сферы, приводящегося в движение 24 пневмоприводами; выделены два режима контакта устройства с поверхностью: осевой симметричный контакт и плоский симметричный контакт; рассмотрены стратегии движения робота.

Другой робот-сфера SUPERball разработан NASA и предназначен для космических миссий в качестве устройства для исследования других планет, особое внимание уделено вопросам управления (рис. 8, *а*) [11, 12].



a



б

Рис. 8. Роботы-сферы:
a – SUPERball [11, 12]; *б* – в работе [13]

В работе [13] предложено решение проблемы устойчивости тенсегрити-сферы с использованием трех последовательных шагов (рис. 8, *б*). Управление передвижением робота-сферы разбивается на определение последующей формы конструкции и на вычисление для этой новой формы положения центра масс уст-

ройства относительно опорного полигона. Производится определение структуры робота, при которой проекция центра масс устройства выходит за пределы опорного полигона, что обеспечивает качение робота, для этого используется многоступенчатый Монте-Карло алгоритм обучения.

2.4. Вибрационные тенсегрити-роботы

Еще одним видом тенсегрити-роботов, перемещающихся без отрыва от поверхности, являются вибрационные роботы, которые совершают движения за счет вибраций, создаваемых приводами [14, 15].

В работе [16] рассматриваются два вибрационных тенсегрити-робота; один из них представ-

ляет собой плоскую конструкцию, состоящую из двух стержней, соединенных четырьмя предварительно напряженными тросами (рис. 9, а), а второй имеет пространственную конфигурацию и состоит из двух угловых стоек, соединенных восемью тросами (рис. 9, б). Оба робота приводятся в движение при помощи вибрации, частота которой обуславливает скорость перемещения устройств.

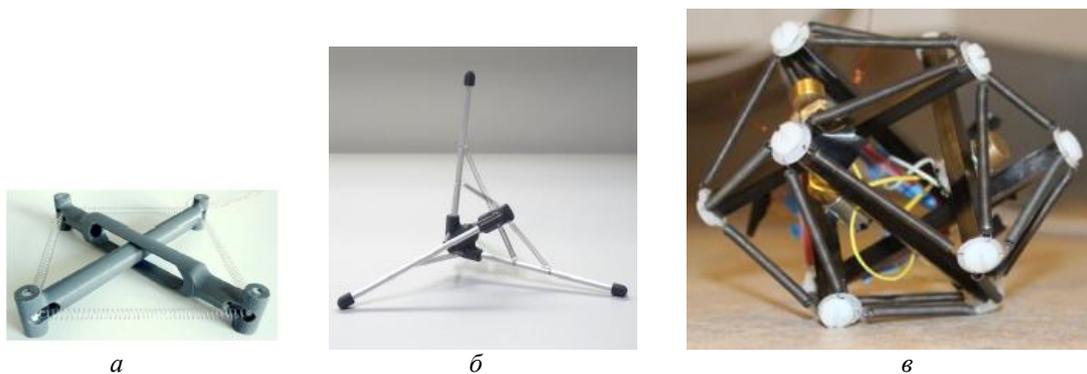


Рис. 9. Вибрационные тенсегрити-роботы:
а – плоская конструкция; б – пространственная конструкция; в – робот-шар

В статье [17] исследовано плоское движение тенсегрити-шара за счет регулирования частоты вибрационных воздействий трех приводов (рис. 9, в). Геометрия робота определяется шестью стержнями, которые соединены друг с другом при помощи 24 идентичных спиральных пружин (четыре пружины соединены с каждым концом стержня). Робот приводится в действие тремя независимыми вибрационными двигателями, каждый из которых установлен на отдельном стержне (три из шести стержней без приводов). Каждый двигатель управляется независимо друг от друга с помощью встроенного USB-контроллера.

2.5. Шагающие тенсегрити-роботы

Среди шагающих тенсегрити-роботов можно условно выделить антропоморфные конст-

рукции и многоногие. Первые из них будут более детально рассмотрены в дальнейшем, здесь остановимся только на многоногих устройствах.

В работе [18] представлено исследование генерации походки четырехногого шагающего робота, у которого позвоночник представляет собой тенсегрити-структуру (рис. 10, а).

Другой четырехногий шагающий робот Laika описан в статьях [19, 20]. Этот робот предназначен для движения по неровной и пересеченной местности – для этого его позвоночник в виде тенсегрити-структуры изгибается с помощью вращающегося позвонка в центре, регулируя длину тросов, которые разделяют его позвонки (рис. 10, б).

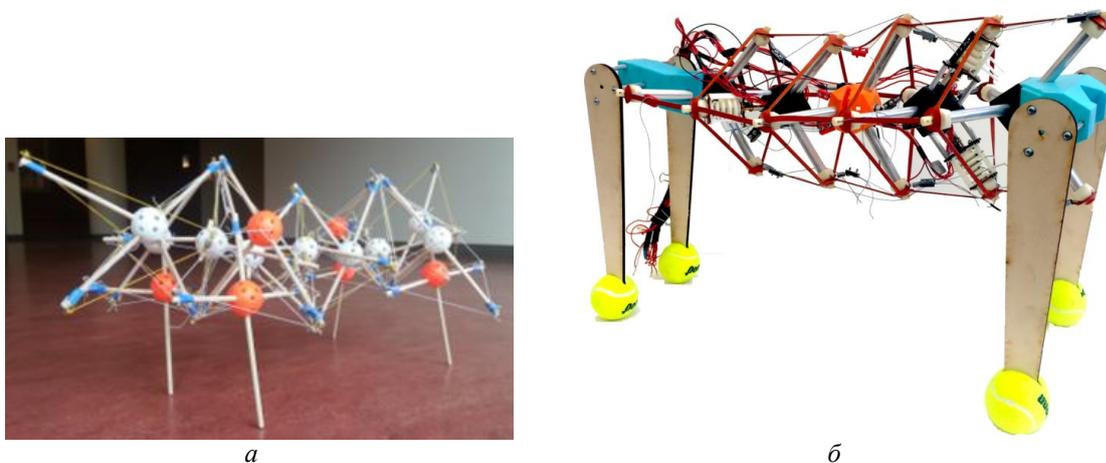
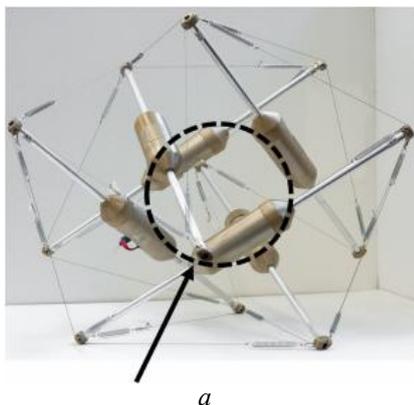


Рис. 10. Четырехногие шагающие тенсегрити-роботы:
а – в работе [18]; б – в работах [19, 20]

2.6. Прыгающие тенсегрити-роботы

Пример прыгающего тенсегрити-робота показан на рис. 11, а и описан в статье [21]. Робот имеет сферическую форму; прыжки осуществляются за счет пневматического привода, установленного в центре конструкции и защищенного от ударов тенсегрити-структурой. Робот предназначен для прыжков по поверхности Луны, что позволит ему быстро преодолевать



многочисленные неровности поверхности.

Еще один сферический тенсегрити-робот представлен в работе [22]; для реализации прыжков он оснащен двумя пропеллерами. При приземлении на поверхность после прыжка ударные нагрузки компенсируются упругодемпфирующей структурой робота, что позволяет избежать повреждений устройства (рис. 11, б).



Рис. 11. Прыгающие тенсегрити-роботы:
а – в работе [21]; б – в работе [22]

2.7. Плавающие тенсегрити-роботы

В работе [23] представлен плавающий тенсегрити-робот, хвост которого выполнен в виде нескольких тенсегрити-модулей, а его движение аналогично движениям хвоста во время плавания рыбы (рис. 12, а).

Другой плавающий тенсегрити-робот описан в работе [24]. Тело робота состоит из ряда

жестких сегментов, связанных между собой при помощи тросов таким образом, что каждый жесткий сегмент может вращаться вокруг тенсегрити-соединения и при этом не контактирует с другими жесткими сегментами (рис. 12, б). В основе плавательного движения устройства лежит вибрационный принцип перемещения.

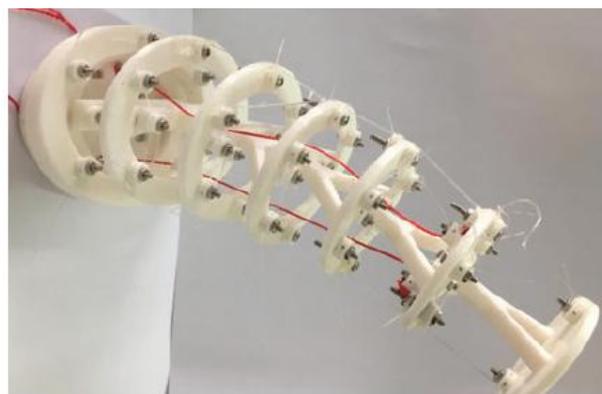
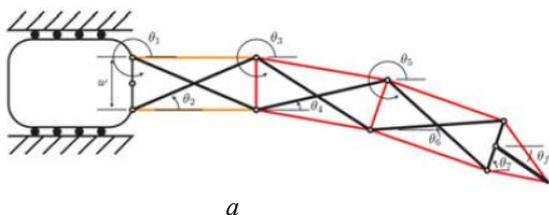


Рис. 12. Плавающие тенсегрити роботы:
а – в работе [23]; б – в работе [24]

2.8. Тенсегрити-роботы, перемещающиеся по пространствам ограниченного объема

В работе [25] представлен тенсегрити-робот DuСТТ, способный перемещаться по сложному

воздуховоду, что обеспечивается широким диапазоном возможных управляемых движений, а также способностью перемещаться в распор по вертикальным шахтам (рис. 13, а). Робот со-

стоит из двух связанных между собой рам в форме тетраэдров, каждая из них содержит линейный привод, соединенный с восемью тросами. Принцип движения робота червеподобный, заключается в поочередном перемещении одного тетраэдра внутри трубы относительно другого.

Усовершенствованная конструкция этого тенсегрити-робота в виде прототипа DuCTTv2 описана в статье [26]. В нем более детально проработаны вопросы питания привода, прокладки кабеля, управления тросами, что позволяет устройству преодолевать Т-образные переходы и острые углы воздухопроводов (рис. 13, б).

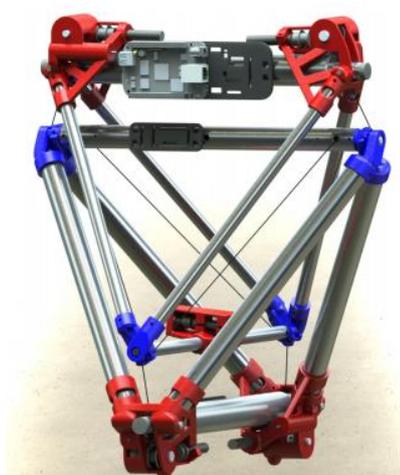


Рис. 13. Тенсегрити-роботы, перемещающиеся внутри пространств ограниченного объема: а – в работе [25]; б – в работе [26]

3. Классификация тенсегрити-роботов по конструктивным особенностям

К конструктивным особенностям тенсегрити-структур можно отнести их форму, вариант изменения конфигурации, наличие и расположение приводов (рис. 14). Рассмотрим каждый из критериев более детально.



Рис. 14. Классификация конструктивных особенностей тенсегрити-роботов

3.1. Классификация тенсегрити-структур по форме

В настоящее время существует большое разнообразие форм тенсегрити-структур, которые можно условно разделить на два больших класса: плоские и пространственные (рис. 15).

Примером плоского тенсегрити-робота является описанный в работе [16] и показанный на рис. 9, а.

Пространственные конструкции включают два класса: формы, аналогичные простым гео-

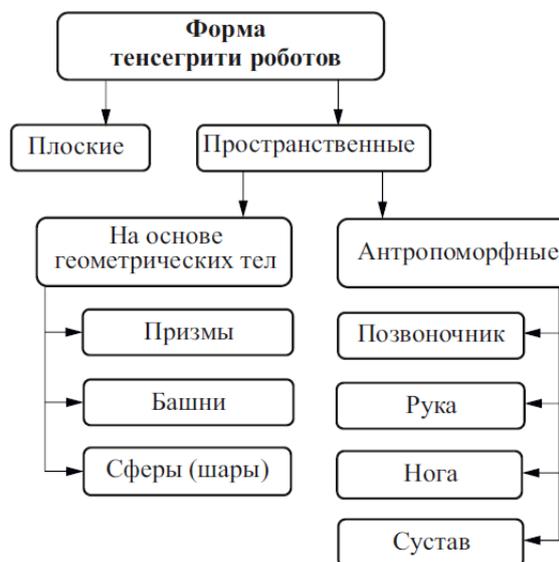


Рис. 15. Классификация тенсегрити-роботов по форме

метрическим телам, и антропоморфные формы. К первому классу относятся тенсегрити-структуры в форме призм, башен и сфер (шаров), примеры которых показаны на рис. 16.

Тенсегрити-призмы представляют собой структуры с симметрией относительно поворота на некоторый угол. Эти структуры состоят из стержней, имеющих идентичную ориентацию за

исключением одного из углов поворота; центры масс стержней и их концы расположены на окружностях с центром в геометрическом центре структуры (рис. 16, *а*). Так, в работе [4] рассматриваются вопросы проектирования и генерации походок двух тенсегрити-роботов, один из которых построен на основе 3-стержневой призмы, а второй – на основе 4-стержневой.

Тенсегрити-башни являются структурами,

представляющими собой повторение блоков, расположенных вдоль оси структуры (рис. 16, *б*).

Тенсегрити-шар в самом простом случае представляет собой структуру, образованную шестью стержнями и соединяющими их тросами; на рис. 16, *в* показана более сложная конфигурация. Исследование двух тенсегрити-роботов в виде сфер, образованных 6 и 12 стержнями, описано в работе [27].

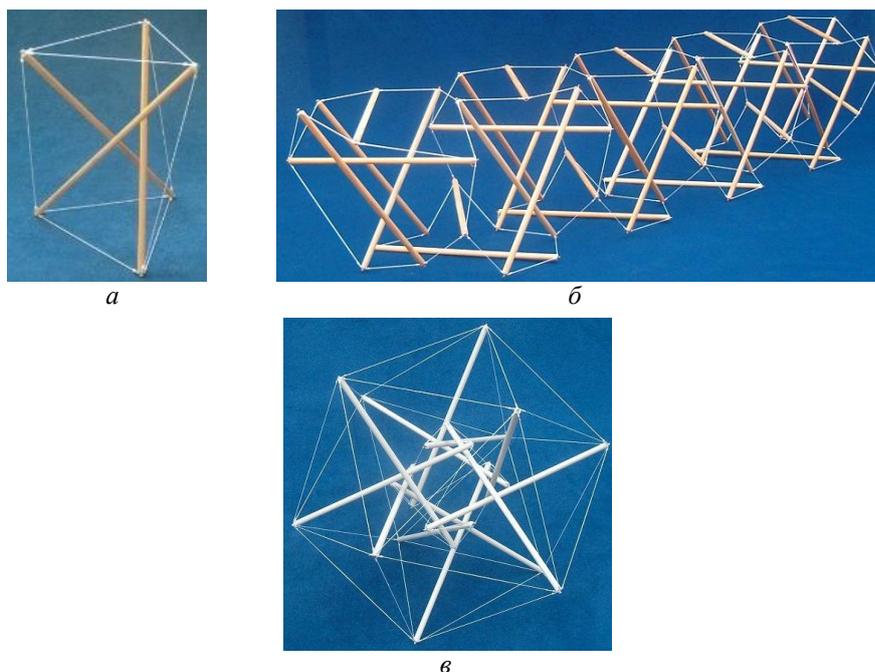


Рис. 16. Формы тенсегрити-структур на основе геометрических тел:
а – призма; *б* – башня; *в* – сфера (шар)

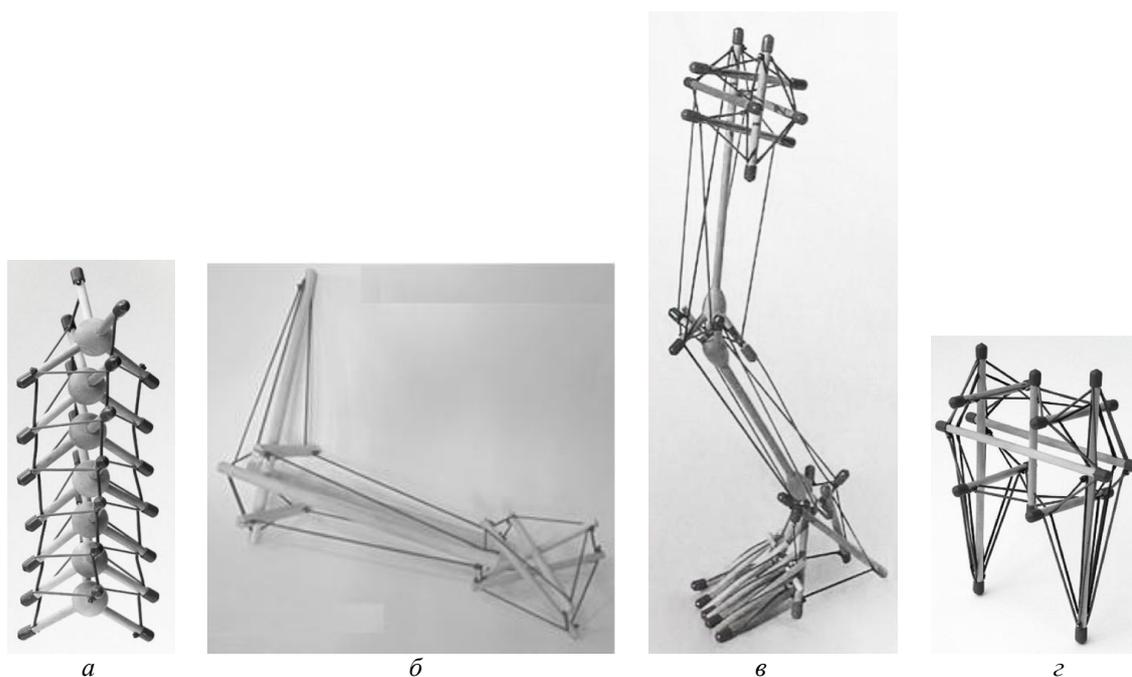


Рис. 17. Антропоморфные тенсегрити-структуры:
а – позвоночник; *б* – рука; *в* – нога; *г* – сустав

Антропоморфные тенсегрити-структуры представляют собой имитации некоторых частей скелета тела человека и используются в антропоморфных роботах. Среди них можно выделить модели позвоночника (рис. 17, а), руки (рис. 17, б), ноги (рис. 17, в) и сустава (рис. 17, з).

Вопросы проектирования позвоночника четырехногого шагающего робота описаны в работе [28], где для разработки робота с определенными техническими характеристиками используется обратное кинематическое моделирование, а для проверки адекватности полученных параметров применяется прямое кинематическое моделирование.

3.2. Классификация вариантов изменения конфигурации

Тенсегрити-роботы во время передвижения постоянно изменяют свою конфигурацию, при этом у каждой структуры можно условно выделить два характерных положения: сложенное и развернутое. В сложенном состоянии тенсегрити-структура занимает минимальный объем пространства, а в развернутом – максимальный. Переход из сложенного состояния в развернутое, и наоборот, путем реализации последовательного ряда конфигураций возможен с использованием трех вариантов изменения длин элементов тенсегрити-структуры (рис. 18) [29].

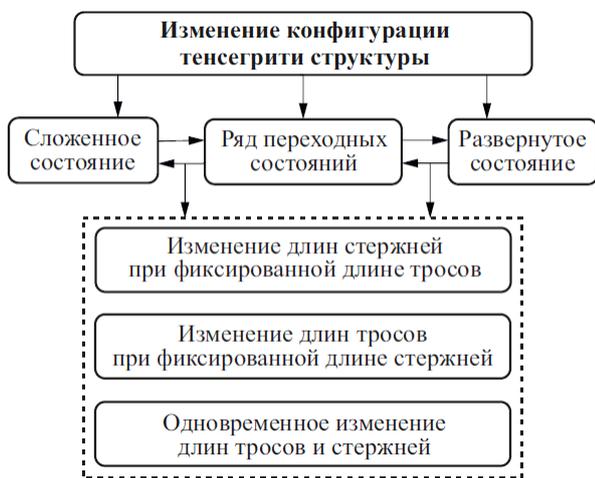


Рис. 18. Классификация вариантов изменения конфигурации тенсегрити-структуры

Первый из них заключается в изменении длин стержней при фиксированной длине тросов, второй – в изменении длин тросов при фиксированной длине стержней. Третий вариант является комбинированным и сочетает в себе одновременное варьирование длин тро-

сов и стержней [30]. Здесь и далее под длиной тросов подразумевается расстояние между точками закрепления троса в ситуации, когда тот не деформирован; это defacto может включать длину эластичного троса или длину нерастяжимого троса и соединенного с ним упругого элемента.

3.3. Наличие и расположение приводов

Данная классификация тесно связана с предыдущей, в ней рассматривается наличие и расположение приводов в тенсегрити-роботах (рис. 19).

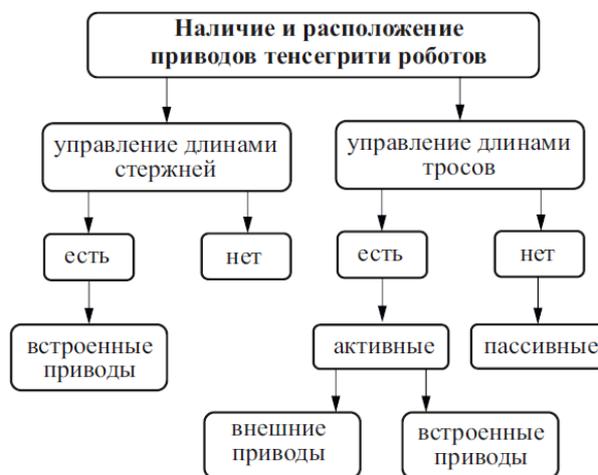


Рис. 19. Классификация тенсегрити-роботов по наличию и расположению приводов

В случае, если при изменении конфигурации робота требуется управление длинами стержней, для этого могут использоваться приводы, встроенные непосредственно в стержни. Для регулирования длины тросов приводы могут быть как встроенными, так и внешними; при этом тросы называются активными. Если изменения длины тросов в тенсегрити-роботах не происходит, то можно говорить о том, что тросы являются пассивными, т. е. непосредственно не приводимыми в действие. Они могут использоваться в качестве элементов натяжения, обеспечивающих статическую поддержку в структурах [6], что особенно важно для компенсации непредвиденных внешних и внутренних сил. Их эластичность позволяет конструкции поглощать удары и деформироваться, в то время как приложенная нагрузка распределяется по всем другим элементам конструкции.

Заключение

В статье рассмотрены вопросы истории появления термина «тенсегрити» и его внедрения в робототехнику, выделены основные отличия

тельные особенности тенсегрити-структур. Также предложены классификационные признаки тенсегрити: назначение, конструктивные особенности, методы управления, методы исследования и подходы к проектированию. При этом в работе детально рассмотрены только первые два критерия, что обусловлено их общностью и универсальностью для широкого класса тенсегрити-роботов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Sadao, S.* Fuller on tensegrity / S. Sadao // Intern. J. of Space Structures. – 1996. – Vol. 11(1–2). – P. 37–42.
2. *Snelson, K.* Snelson on the tensegrity invention / K. Snelson // Intern. J. of Space Structures. – 1996. – Vol. 11(1–2). – P. 43–48.
3. Design and control of compliant tensegrity robots through simulation and hardware validation / K. Caluwaerts, J. Despraz, A. İçen, A.P. Sabelhaus, J. Bruce, B. Schrauwen, V. SunSpiral // J. of the royal society interface. – 2014. – Vol. 11(98).
4. *Paul, C.* Design and control of tensegrity robots for locomotion / C. Paul, F.J. Valero-Cuevas, H. Lipson // IEEE Transactions on Robotics. – 2006. – Vol. 22(5). – P. 944–957.
5. *Motro, R.* Tensegrity systems: the state of the art / R. Motro // Intern. J. of space structures. – 1992. – Vol. 7(2). – P. 75–83.
6. A bio-inspired tensegrity manipulator with multi-DOF, structurally compliant joints / S. Lessard, D. Castro, W. Asper, S.D. Chopra, L.B. Baltaxe-Admony, M. Teodorescu, V. SunSpiral, A. Agogino // IEEE/RSJ Intern. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS) – Daejeon, South Korea, 2016. – P. 5515–5520.
7. Simulating the human shoulder through active tensegrity structures / L.B. Baltaxe-Admony, A. Robbins, E. Jung, S. Lessard, M. Teodorescu, V. SunSpiral, A. Agogino // Intern. Design Engineering Technical Conf. Computers and Information in Engineering Conf. (IDETC/CIE) – American Society of Mechanical Engineers, 2016. – Vol. 50183.
8. Tetraspine: Robust terrain handling on a tensegrity robot using central pattern generators / B.R. Tietz, R.W. Carnahan, R.J. Bachmann, R.D. Quinn, V. SunSpiral // IEEE/ASME Intern. Conf. on Advanced Intelligent Mechatronics – Wollongong, Australia, 2013. – P. 261–267.
9. Bio-inspired tensegrity soft modular robots / D. Zappetti, S. Mintchev, J. Shintake, D. Floreano // Conf. on Biomimetic and Biohybrid Systems – Springer, Cham, 2017. – P. 497–508.
10. *Koizumi, Y.* Rolling tensegrity driven by pneumatic soft actuators / Y. Koizumi, M. Shibata, S. Hirai // IEEE Intern. Conf. on Robotics and Automation (ICRA) – Saint Paul, USA, 2012. P. 1988–1993.
11. System design and locomotion of SUPERball, an untethered tensegrity robot / A.P. Sabelhaus, J. Bruce, K. Caluwaerts, P. Manovi, R.F. Firoozi, S. Dobi, A.M. Agogino, V. SunSpiral // IEEE Intern. Conf. on Robotics and Automation (ICRA) – Seattle, USA, 2015. – P. 2867–2873.
12. Design of SUPERball v2, a compliant tensegrity robot for absorbing large impacts / M. Vespignani, J.M. Friesen, V. SunSpiral, J. Bruce // IEEE/RSJ Intern. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS) – Madrid, Spain, 2018. – P. 2865–2871.
13. Robust learning of tensegrity robot control for locomotion through form-finding / K. Kim, A.K. Agogino, A. Toghyan, D. Moon, L. Taneja, A.M. Agogino // IEEE/RSJ Intern. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS) – Hamburg, Germany, 2015. – P. 5824–5831.
14. Exploiting dynamical complexity in a physical tensegrity robot to achieve locomotion / M. Khazanov, B. Humphreys, W. D. Keat, J. Rieffel // Artificial Life Conf. (ECAL) – Cambridge, USA, 2013. – P. 965–972.
15. *Rieffel, J.* Adaptive and resilient soft tensegrity robots / J. Rieffel, J.-B. Mouret // Soft robotics. – 2018. – Vol. 5(3). – P. 318–329.
16. *Böhm, V.* Vibration-driven mobile robots based on single actuated tensegrity structures / V. Böhm, K. Zimmermann // IEEE Intern. Conf. on Robotics and Automation (ICRA) – Karlsruhe, Germany, 2013. – P. 5475–5480.
17. *Khazanov, M.* Evolution of locomotion on a physical tensegrity robot / M. Khazanov, J. Jocque, J. Rieffel // Artificial Life Conf. – Cambridge, USA, 2014. – P. 232–238.
18. *Hustig-Schultz, D.* Morphological design for controlled tensegrity quadruped locomotion / D. Hustig-Schultz, V. SunSpiral, M. Teodorescu // IEEE/RSJ Intern. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS) – Daejeon, South Korea, 2016. – P. 4714–4719.
19. Design, simulation and testing of Laika, a quadruped robot with a flexible actuated spine / A.P. Sabelhaus, L.J. van Vuuren, A. Joshi, E. Zhu, H.J. Garnier, K.A. Sover, ... & A.M. Agogino // arXiv preprint arXiv:1804.06527. – 2018.
20. Design, simulation and testing of a flexible actuated spine for quadruped robots / A.P. Sabelhaus, L.J. van Vuuren, A. Joshi, E. Zhu, H.J. Garnier, K.A. Sover, ... & A.M. Agogino // arXiv preprint arXiv:1804.06527. – 2018.
21. Hopping and rolling locomotion with spherical tensegrity robots / K. Kim, L.-H. Chen, B. Cera, M. Daly, E. Zhu, J. Despois, A.K. Agogino, V. SunSpiral, A.M. Agogino // IEEE/RSJ Intern. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS) – Daejeon, South Korea, 2016. – P. 4369–4376.
22. *Mintchev, S.* A Soft robot for random exploration of terrestrial environments / S. Mintchev, D. Zappetti, J. Willemin, D. Floreano // IEEE Intern. Conf. on Robotics and Automation (ICRA) – Brisbane, Australia, 2018. – P. 7492–7497.
23. *Bliss, T.* Central pattern generator control of a tensegrity swimmer / T. Bliss, T. Iwasaki, H. Bart-Smith // IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. – 2013. – Vol. 18(2). – P. 586–597.
24. *Chenand, B.* Swimming performance of a tensegrity robotic fish / B. Chenand, H. Jiang // Soft Robotics. – 2019. – Vol. 6(4). – P. 520–531.
25. *Friesen, J.* DuCTT: a tensegrity robot for exploring duct systems / J. Friesen, A. Pogue, T. Bewley, M. de Oliveira, R. Skelton, V. SunSpiral // IEEE Intern. Conf. on Robotics and Automation (ICRA) – Hong Kong, China, 2014. – P. 4222–4228.
26. The second generation prototype of a duct climbing tensegrity robot, DuCTTv2 / J. M. Friesen, P. Glick, M. Fanton, P. Manovi, A. Xydes, T. Bewley, V. Sun-spiral // IEEE Intern. Conf. on Robotics and Automation (ICRA) – Stockholm, Sweden, 2016. – P. 2123–2128.
27. Modular elastic lattice platform for rapid prototyping of tensegrity robots / L. H. Chen, M. C. Daly, A. P. Sabelhaus, L. A. Janse van Vuuren, H. J. Garnier, M. I. Verdugo, ... & A. K. Agogino // Intern. Design Engineering Technical Conf. and Computers and Information in Engineering Conf. – American Society of Mechanical Engineers, 2017.
28. Mechanism design and simulation of the ULTRA spine: a tensegrity robot / A. P. Sabelhaus, H. Ji, P. Hylton, Y. Madaan, C. Yang, A.M. Agogino, ... & V. SunSpiral // Intern. Design Engineering Technical Conf. and Computers and Information in Engineering Conf. – American Society of Mechanical Engineers, 2015.
29. *Shibata, M.* Crawling by body deformation of tensegrity structure robots / M. Shibata, F. Saijyo, S. Hirai // IEEE Intern. Conf. on Robotics and Automation (ICRA) – Kobe, Japan, 2009. – P. 4375–4380.
30. *Bouderbala, M.* Folding tensegrity systems / M. Bouderbala, R. Motro // IUTAM-IASS Symposium on Deployable Structures: Theory and Applications – Springer, Dordrecht, 2000. – P. 27–36.