

УДК 004.942

Моделирование шестистержневого мобильного тенсегрити-робота в среде MATLAB

© | Гуляняшкин Александр Александрович
Лесков Алексей Григорьевич

gulalex181@yandex.ru
leskov@bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Рассмотрено применение тенсегрити-структур в мобильной робототехнике, а также итерационный процесс проектирования таких роботов с помощью компьютерного моделирования. Разработана модель шестистержневого мобильного тенсегрити-робота в пакете Simulink среды MATLAB с использованием библиотеки Simscape Multibody. Проведено моделирование перемещения данного робота. Сделаны выводы о преимуществах и недостатках применения MATLAB для моделирования и проектирования тенсегрити-роботов.

Ключевые слова: мобильная робототехника, тенсегрити-структура, напряженно-связанные структура, тенсегрити-робот, шестистержневой тенсегрити-робот, моделирование, MATLAB, Simscape Multibody

Введение. Одно из направлений исследований и разработок современной робототехники — использование в конструкциях робототехнических систем напряженно-связанных структур (тенсегрити-структур — ТС) [1, 2, 3, 4, 5].

Концепция тенсегрити (tensegrity) первоначально исследована в 1960-х годах Бакминстером Фуллером и Кеннетом Снелсоном. Термин tensegrity является комбинацией слов tensile (напряженный) и integrity (целостность).

ТС представляют собой механические конструкции, состоящие из гибких тросов и недеформируемых стержней. Тросы в ТС работают только на растяжение. Стержни — только на сжатие. Стержни охвачены сетью тросов таким образом, что образующаяся конструкция находится в упруго-напряженном состоянии и, благодаря этому, сохраняет свою форму в пространстве.

ТС пробуют применять в мобильной робототехнике. Наиболее распространены 6-ти стержневые тенсегрити-роботы (ТР), имеющие форму икосаэдра. Принцип перемещения этих роботов основан на перемещении центра масс за счет стягивания и отпускания тросов, в результате чего осуществляется перекачивание с одной грани на другую.

Общие вопросы проектирование мобильных ТР. Одним из подходов к проектированию мобильных ТР является использование итерационного процесса, в котором с помощью алгоритма искусственного интеллекта подбираются параметры робота, с которыми он способен к заданному передвижению. В качестве основных алгоритмов на данный момент используются алгоритмы на основе центрального генератора упорядоченной активности (ЦГУА), обучение с подкреплением и эволюционные алгоритмы (в частно-

сти, генетические алгоритмы). Наиболее распространенный метод проверки функционирования ТР — компьютерное моделирование.

Для проектирования робота могут использоваться разные среды моделирования, например, Open Dynamics Engine (ODE) [6], NASA Tensegrity Robotics Toolkit (NTRT) [7]. В данной работе оценивается возможность проектирования тенсегрити-робота с использованием библиотеки Simscape Multibody [8] пакета Simulink среды MATLAB.

Моделирование ТР с среде MATLAB. Рассматривается 6-ти стержневой мобильный ТР, у которого три активных стержня, на концах которых расположены электромеханические приводы, состоящие из бесколлекторного двигателя, датчика положения ротора, редуктора и платы управления. На концах каждого стержня (и активных, и пассивных) закреплены по четыре упругих троса, которые поддерживают структуру робота. С концов активных стержней дополнительно идет по одному жесткому тросу, за счет стягивания и отпускания которых с помощью приводов робот перемещается. На рис. 1 показана ТС с 6 стержнями, 24 упругими и 6 жесткими тросами, а также матрица связности концов стержней. В центре робота на упругих тросах, присоединенных к стержням, закреплена платформа, на которой находится полезная нагрузка.

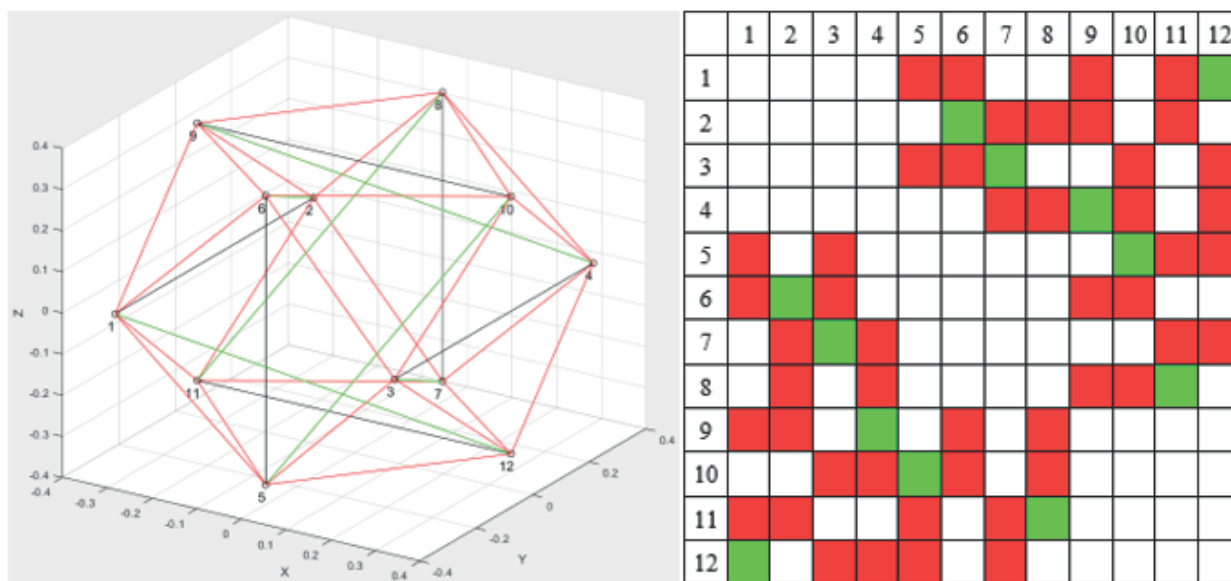


Рис. 1. Структура ТР с 6 стержнями (черные), 24 упругими (красные) и 6 жесткими (зеленые) тросами (слева) и матрица связности концов стержней (справа). Цифрами пронумерованы концы стержней

На рис. 2 приведена структура разработанной компьютерной модели ТР в Simulink. Она состоит из блока системы управления Control System, в котором содержатся модели всех приводов тенсегрити-робота (рис. 3), блока Input/Output signals, где находится интерфейс управления, и блока математи-

ческой модели динамики ТР вместе с центральной платформой для полезной нагрузки Physical System (рис. 4).

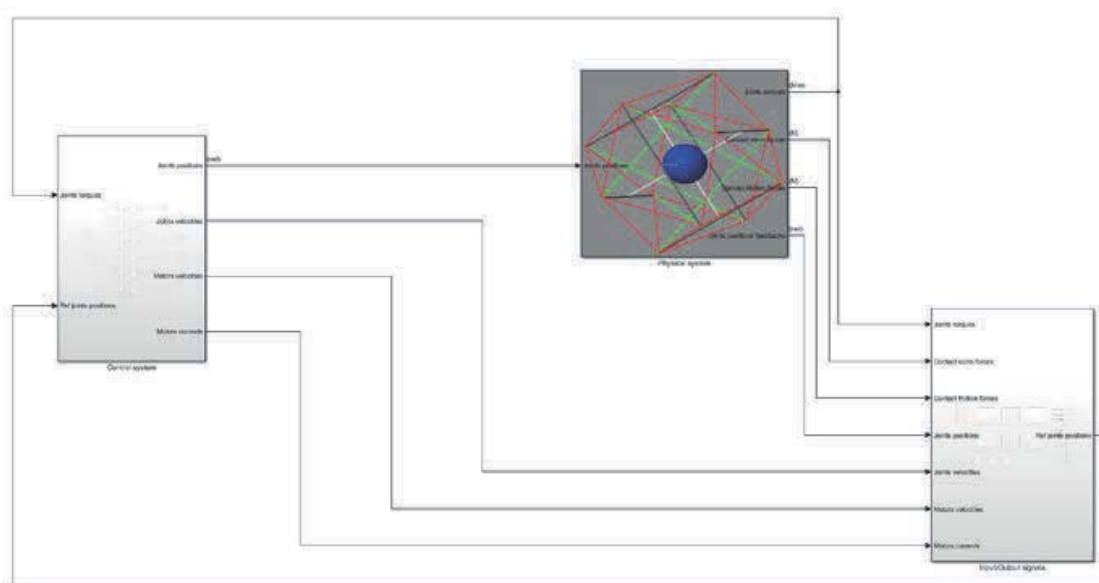


Рис 2. Модель тенсегрити-робота и его системы управления

В систему управления с интерфейса управления подаются задаваемые углы поворота приводов робота, а из физической модели — моменты внешней нагрузки на выходные валы приводов. Система управления передает в физическую модель углы поворота приводов. Под действием управляющих сигналов приводы совершают соответствующие перемещения, приводящие к изменению формы ТР.

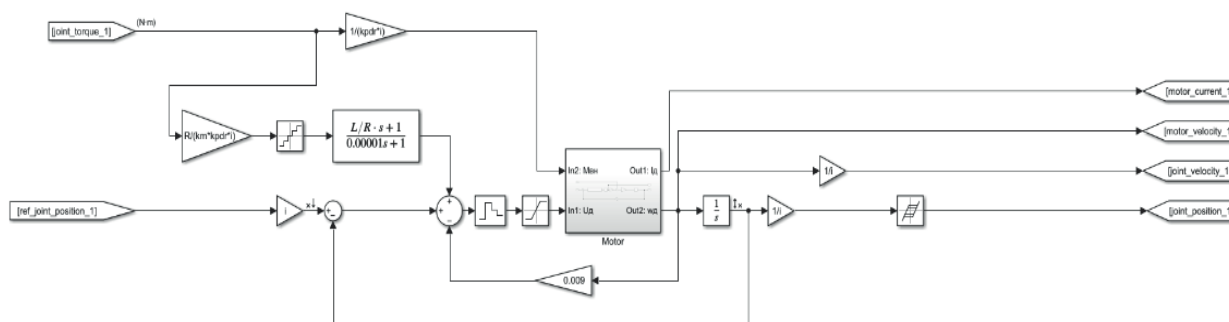


Рис. 3. Содержимое блока Control System (показан только один привод, остальные аналогичные)

В качестве тел, участвующих в контактном взаимодействии ТР с внешней средой, используются сферы на концах стержней и бесконечная плоскость (блок Infinite Plane). Для моделирования контактного взаимодействия между плоскостью и сферами используются блоки Spatial Contact Force. При взаимодействии двух тел (плоскости и сферы) данный блок прикладывает

равные и противоположно направленные силы (сила реакции опоры и сила трения) к обоим телам.

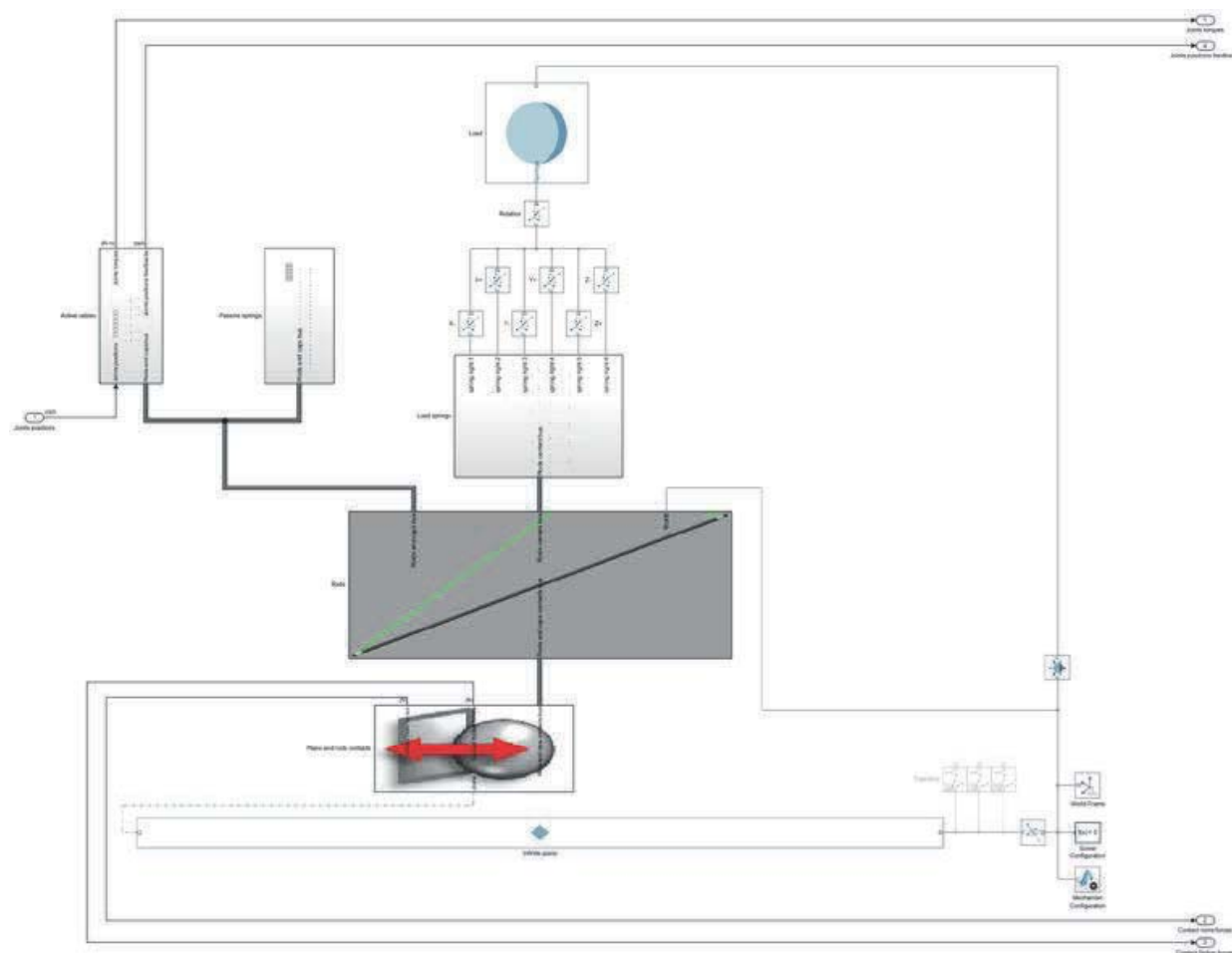


Рис. 4. Физическая модель тенсегрити-робота

Для задания начальных положений стержней необходимо задать координаты узлов (концов стержней) ТС. Делать это будем с помощью матрицы, в которой каждый столбец представляет собой координаты узла в декартовой системе координат модели (World Frame):

$$\begin{pmatrix} -0,3125 & -0,3125 & 0,3125 & 0,3125 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0,3508 & 0,3508 & -0,3508 & 0,3508 \\ -0,3508 & 0,3508 & -0,3508 & 0,3508 & -0,3125 & -0,3125 & 0,3125 & 0,3125 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -0,3508 & 0,3508 & -0,3508 & 0,3508 & 0,3125 & 0,3125 & -0,3125 & -0,3125 \end{pmatrix}.$$

На рис. 5 красным цветом показаны стержни в их начальном положении. В таком положении их задавать проще всего, поскольку стержни получаются параллельными осям декартовой системы координат. Робот может иметь в качестве начального и другое положение, когда он опирается с помощью трех взаимно скрещивающихся стержней. Чтобы получить такое начальное положение, можно воспользоваться матрицей поворота:

$$\begin{pmatrix} \cos 35 & 0 & \sin 35 \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin 35 & 0 & \cos 35 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 45 & -\sin 45 \\ 0 & \sin 45 & \cos 45 \end{pmatrix}.$$

В результате умножения исходной матрицы координат узлов на матрицу поворота получается матрица новых координат узлов:

$$\begin{pmatrix} -0,3983 & -0,1137 & 0,1137 & 0,3983 & -0,2690 & 0,0155 & -0,0155 & 0,2690 & -0,1606 & 0,4141 & -0,4141 & 0,1606 \\ -0,2481 & 0,2481 & -0,2481 & 0,2481 & 0,0271 & -0,4690 & 0,4690 & -0,0271 & -0,2210 & -0,2210 & 0,2210 & 0,2210 \\ -0,0240 & 0,3825 & -0,3825 & 0,0240 & -0,3842 & 0,0222 & -0,0222 & 0,3842 & 0,3822 & -0,0202 & 0,0202 & -0,3822 \end{pmatrix}.$$

Результат показан на рис. 5 синим цветом.

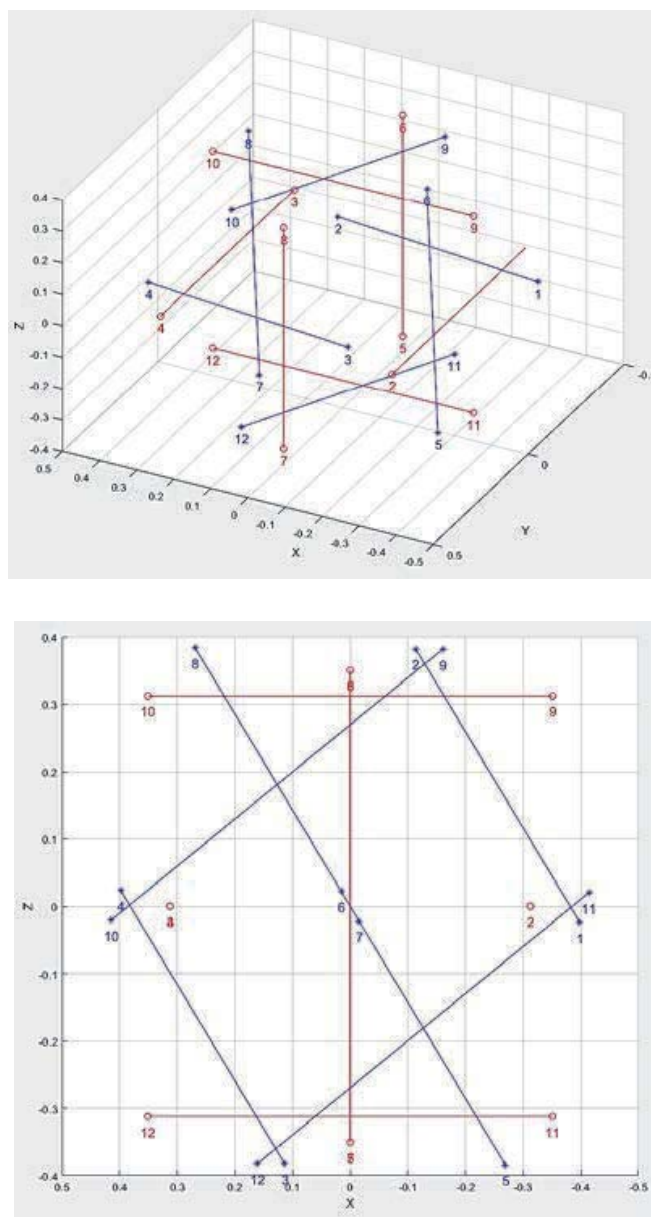


Рис. 5. Стержни тенсегрити-робота в двух возможных начальных положениях (красный цвет — без поворота, синий цвет — с поворотом)

Для моделирования стержней и задания их позиций используются блоки Rigid Transform, в которых задаются смещения и повороты стержней в системе координат модели. В качестве смещений выступают координаты одного из концов стержней. Поворот стержня задается вокруг вектора $\bar{t}$, полученного как векторное произведение орта оси Z системы координат модели и вектора стержня (формируется как разница координат концов стержня в системе координат модели) $\bar{v}$, на угол, определяемый формулой

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{|\bar{t}|}{|\bar{v}|}\right). \quad (1)$$

Структуру тенсегрити-робота поддерживают упругие тросы. Для моделирования упругого троса используется блок Spring and Damper Force, который дает возможность задать коэффициент упругости и коэффициент демпфирования троса. Поскольку данный блок не имеет визуального представления, то для визуализации дополнительно используются блоки из группы Belt-Cable (Belt-Cable Spool, Belt-Cable Properties, Belt-Cable End), а также блок Revolute Joint, обеспечивающий изменение длины визуального троса.

Модель жесткого троса представляет из себя сборку из блоков группы Belt-Cable (Belt-Cable Spool, Belt-Cable Properties, Belt-Cable End), и блока Revolute Joint, на вход которого подается угол поворота соответствующего привода, а с выхода которого берется внешний момент, прикладываемый к данному приводу.

Содержимое блока Load springs аналогично содержимому блока Passive springs. Отличие лишь в том, что там не 24 упругих троса, а 6.

В результате получается ТР, представленный на рис. 6.

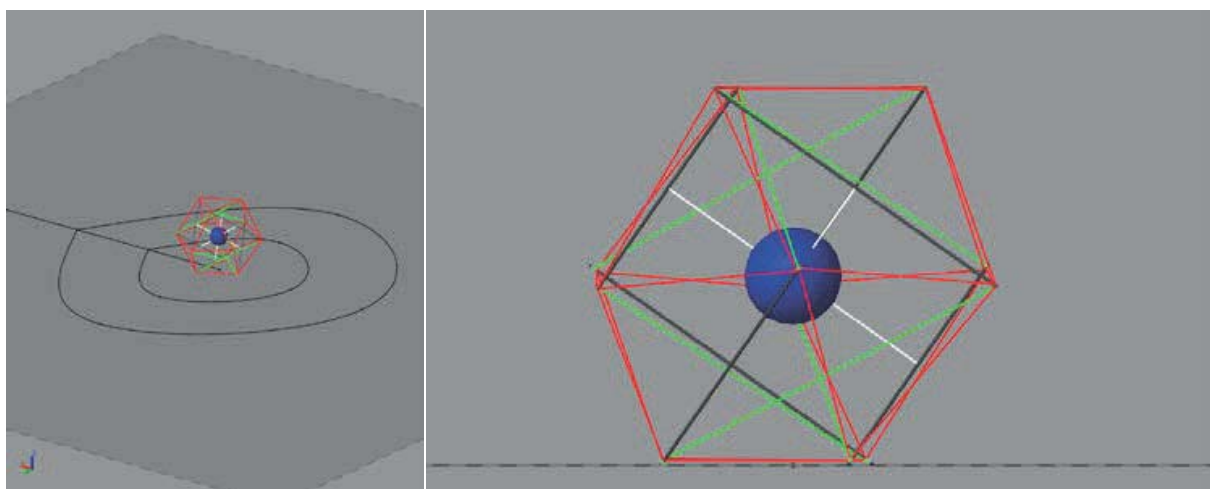


Рис. 6. Тенсегрити-робот в приложении Mechanics Explorer (слева — вид в изометрии, справа — вид спереди).

При моделировании визуализация упругих тросов выключена. Для уменьшения времени моделирования ТР моделируется без центральной платформы для полезной нагрузки. На рис. 7 показано моделирование одного шага робота (покадрово).

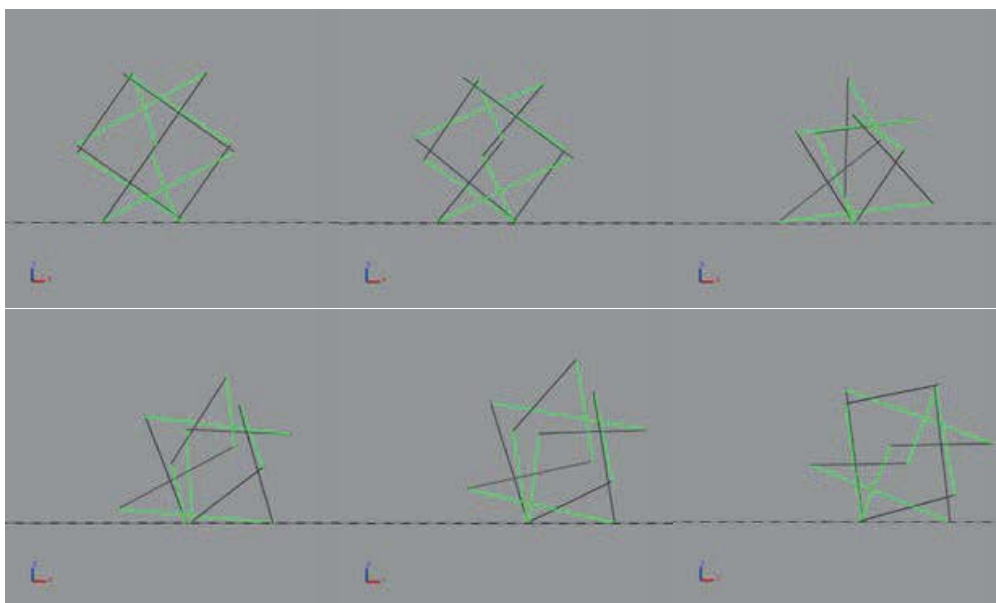


Рис. 7. Один шаг тенсегрити-робота

Заключение. Одним из подходов к проектированию ТР является итеративный подход с использованием алгоритмов искусственного интеллекта. Чаще всего для проверки функционирования ТР применяют компьютерное моделирование. Из полученных результатов моделирования можно сделать вывод, что моделировать робот без нагрузки в Simscape Multibody и подбирать его параметры с помощью алгоритма искусственного интеллекта можно. Однако это занимает довольно длительное время, особенно при моделировании робота с нагрузкой. Возможным решением этой проблемы может быть распараллеливание на много ядер одной машины либо использование кластера машин. Такие варианты моделирования возможны при помощи библиотеки Parallel Computing Toolbox среды MATLAB. Также ускорить моделирование можно при использовании более мощной вычислительной машины. В данной работе для моделирования использовался компьютер со следующими параметрами:

Процессор: AMD Ryzen 7 4800H 2,9 ГГц (с разгоном до 4,2 ГГц),

Оперативная память: 16 Гб,

Видеокарта: NVIDIA GeForce GTX 1660 Ti Max-Q.

Таким образом, моделирование ТР в библиотеке Simscape Multibody пакета Simulink среды MATLAB проходит более медленно, чем в специализированном ПО (например, в NTRT). Однако такое моделирование позволяет

использовать все разнообразие готовых инструментов, предоставляемых MATLAB.

Литература

- [1] Paul C., Roberts J.W., Lipson H. et al. Gait production in a tensegrity based robot // Proceedings of the 12th International Conference on Advanced Robotics. Seattle, WA, 2005. Pp. 216–222. DOI: <http://doi.org/10.1109/ICAR.2005.1507415>
- [2] Mirletz B.T., Quinn R.D., SunSpiral V. CPGs for adaptive control of spine-like tensegrity structures // 2015 International Conference on Robotics and Automation Workshop on Central Pattern Generators for Locomotion Control: Pros, Cons & Alternatives, Seattle, WA, 2015.
- [3] Koizumi Y., Shibata M., Hirai S. Rolling tensegrity driven by pneumatic soft actuators // 2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Saint Paul, MN, 2012. Pp. 1988–1993. DOI: <http://doi.org/10.1109/ICRA.2012.6224834>
- [4] Caluwaerts K. Design and Computational Aspects of Compliant Tensegrity Robots. PhD thesis. Ghent University, 2014.
- [5] Bruce J., Caluwaerts K., Iscen A., Sabelhaus A., SunSpiral V. Design and evolution of a modular tensegrity robot platform // Robotics and Automation (ICRA). 2014 IEEE International Conference on. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICRA.2014.6907361>
- [6] Open Dynamics Engine. Available at: <http://www.ode.org/> (accessed October 28, 2021).
- [7] NASA Tensegrity Robotics Toolkit. Available at: <https://ti.arc.nasa.gov/tech/asr/groups/intelligent-robotics/tensegrity/NTRT/> (accessed October 28, 2021).
- [8] Simscape Multibody User's guide. 2021a. Available at: https://www.mathworks.com/help/pdf_doc/phymod/sm/sm Ug.pdf (accessed October 28, 2021).

Simulation of a Six-Rod Mobile Tensegrity Robot in MATLAB Environment

© | Gulnyashkin A.A.
Leskov A.G.

| gulalex181@yandex.ru
| leskov@bmstu.ru

BMSTU, Moscow, 105005, Russia

The paper deals with the concept of tensegrity structures and its applications in mobile robotics. Iterative design based on an artificial intelligence algorithm with the use of computer simulation is considered. A simulation model of a six-rod mobile tensegrity robot has been developed in the Simulink package of MATLAB environment with the use of the Simscape Multibody library. One-step movement of the robot has been simulated. Conclusions have been drawn regarding advantages and disadvantages of MATLAB application for tensegrity robot simulation and design.

Keywords: Mobile robotics, tensegrity structure, tensegrity robotics, six-rod tensegrity robot, simulation, MATLAB, Simscape Multibody