

АНАЛИЗ АДАПТИВНЫХ СИСТЕМ ШАГАЮЩИХ РОБОТОВ**Н.Н. Воевода**

threespots@mail.ru

SPIN-код: 9113-5113

Е.В. Андреева

zheny-andreeva@yandex.ru

SPIN-код: 7823-6999

Д.В. Лапин

lapin.sm6@gmail.com

SPIN-код: 9435-9163

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация**Аннотация**

Представлено сравнение методов смены локомоции в современных шагающих роботах для адаптации к внешним и внутренним изменениям состояниям робота, таким как препятствия на пути следования, переменный ландшафт, поломка составляющих. Рассмотрены прототипы, выбор схемы локомоции которых определяется процессом самообучения на основе моделирования на базе бортового вычислителя. Результаты анализа показали, что на настоящий момент эти системы не могут применяться в реальных условиях, поскольку данные решения не обладают достаточным быстродействием. Также рассмотрен метод локомоции, основанный на децентрализованном управлении конечностями робота, который показал высокое быстродействие, но при этом низкую проходимость. Выполнено исследование машин с достаточной устойчивостью для применения в реальных условиях. Однако был выявлен существенный недостаток данной разработки: при выводе из строя конечности машина переставала эффективно адаптироваться к внешним изменениям. В качестве наиболее рационального варианта принята шаблонная выборка схем перемещения, основанная на анализе окружающей среды и внутреннего состояния мобильного робота

Ключевые слова

Экстремальная робототехника, локомоционный робот, мобильный робот, схема локомоции, метод перемещения робота, кинематический шаблон, адаптивная функция, управление роботом

Поступила в редакцию 02.07.2018

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018

Введение. Автономные шагающие машины, иначе — шагающие роботы, в настоящее время используются все чаще. Это обусловлено их высокой проходимостью, что критично для работы автономных робототехнических комплексов в экстремальных условиях [1, с. 8]. Однако существуют проблемы, связанные с автономным перемещением робота, возникающие по причине невозможности приспособиться к постоянно меняющимся внутренним и внешним условиям движения, будь то повреждение, изменение формы или коэффициента

трения поверхности перемещения. Для различных ситуаций необходимо вырабатывать индивидуальный алгоритм управления, удовлетворяющий требованиям эффективного движения [1, с. 9]. По этой причине необходима функция адаптации, заключающейся в анализе окружающей среды и подборе рациональной схемы движения, которую способен обеспечить робот [2]. Рассмотрим современные разработки по указанным направлениям более подробно.

Схемы с самообучением (разработка Корнеллского университета). Метод, разработанный в Корнеллской лаборатории синтеза, заключается в самостоятельном моделировании собственной формы и походки. Тестовой машиной является робот с четырьмя конечностями (рис. 1), в который изначально заложена возможность управлять только восемью двигателями, расположенными по два в каждой конечности.



Рис. 1. Внешний вид самообучающегося робота-морской звезды

Информацией о расположении этих двигателей в пространстве, методах их использования для перемещения и количестве конечностей машина не обладает. В основу логики робота заложен принцип самообучения, состоящий из трех этапов: выдвижение гипотезы, проверка экспериментом, составление усовершенствованной теории на основе полученных результатов [3].

Процесс начинается с построения серии моделей формы конструкции робота и относительного расположения двигателей (рис. 2, *а*). Комбинации элементов в моделях выбирают случайным образом. После робот разрабатывает последовательности движений и команды, выдаваемые на двигатели, для тестирования моделей.

Машина выбирает и совершает такие действия, выполнение которых дает максимально разнообразные результаты. Эти данные позволяют оценить корректность построенных моделей. После чего модель или отклоняется, или корректируется в соответствии с результатами эксперимента, что показано на рис. 2, *б* и *в*. Цикл

«проверка — перестройка» повторяется 15 раз, после этого робот начинает движение [4]. В результате в качестве оптимального способа перемещения вышеуказанный робот выбрал способ, аналогичный передвижению червя [5]. Схожие методы передвижения машина выбирает и при отсутствии одной или нескольких конечностей.

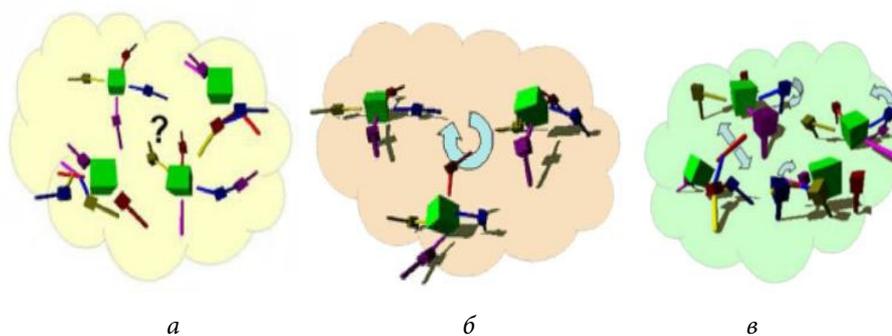


Рис. 2. Процесс формирования модели механической схемы

Разработка данного алгоритма — это большой шаг в развитии машинного обучения. Его преимуществом является универсальность. Алгоритм применим к роботам разных форм и размеров с любым количеством конечностей. Однако для реальных автономных модулей его использование на данном этапе развития не эффективно, поскольку в методе не задействован весь функционал робота. При наличии четырех конечностей тестовая машина выбрала оптимальным тот вариант походки, для реализации которого достаточно двух. Оставшиеся ноги выполняют дополнительную функцию обеспечения устойчивости корпуса. Этот способ перемещения не является эффективным ни по скоростному, ни по энергетическому режимам. Более того, процесс моделирования на базе бортового вычислителя, происходящий перед определением кинематической схемы, имеет сильное влияние на быстродействие, поскольку каждый раз при смене внешних или внутренних условий роботу нужно тестировать новую модель.

Разработка вермонтского университета. Джош Бонгард, исследователь из Вермонта, разработал алгоритм эволюции роботов при управляемых изменениях в конструкции, основанный на самообучении и внутреннем моделировании. Метод схож с описанным выше, однако алгоритм выбирает оптимальную схему походки, основываясь не только на текущих данных моделирования, но и на предыдущей выбранной схеме. При этом могут меняться форма, размеры, число и вид степеней свободы машины.

Метод тестировался на сделанном из конструктора LEGO Mindstorm четырехногом роботе с интегрированными в вычислитель параллельными нейросетевыми процессорами. В начале эксперимента отличие реального робота от его модели, заложенной в вычислителе, заключается в том, что на машине установлены две скобы, соединяющие передние и задние пары ног.

Робот изначально вырабатывает алгоритм, схожий с перемещением змеи, поскольку его возможности по перемещению сокращаются до движений корпусом и парами связанных конечностей. После того как скобы убираются, робот постепенно меняет схему перемещения на более эффективную, схожую с походкой койота [6]. Однако, по словам автора, быстрое осуществление метода возможно только на простых конструкциях роботов, так как каждая сессия моделирования процессов перемещения на бортовом вычислителе занимает порядка 30 часов [7].

Таким образом, недостаток этого метода заключается в том, что процесс самообучения автономного робота требует больших затрат вычислительных ресурсов, поэтому для реализации движения необходимо слишком много времени, что влияет на быстродействие робота.

Разработка компании Google. Программисты компании разработали среду, способную вырабатывать сложное поведение у искусственного интеллекта на основе метода обучения с подкреплением с непрерывной обратной связью.

Для обученной нейросети исследователи построили виртуальный мир с разными по сложности препятствиями, куда они поочередно помещали трех агентов: тело с двумя ногами, четвероногий корпус и человекообразную фигуру. Каждый агент обладал примитивным зрением и ощущением положения частей собственного тела относительно друг друга и в пространстве. Всем тестовым моделям нужно было добраться из точки *A* в точку *B*, и чем быстрее они это делали, тем больше была награда. Разработчики также ввели систему штрафов: двуногое тело наказывалось, если оно наталкивалось на препятствия из-за неправильного положения торса, а четвероногий «паук» и «человек» — если смещались с центра плоскости [8, с. 2].

Результатом стало самообучение компьютера. Агенты приспособивались к среде, преодолевая препятствия, что показано на рис. 3.

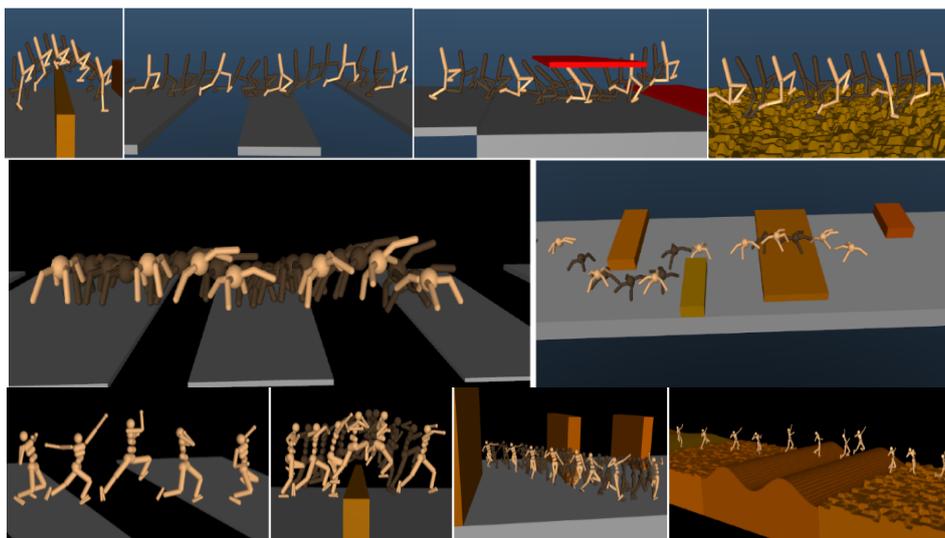


Рис. 3. Покадровое преодоление препятствий разными агентами

Метод обучения с подкреплением на данной стадии разработки в полевых условиях неприменим, потому что для каждой новой среды и задачи понадобится реализовывать новые протоколы наград-наказаний, так как реальные условия непредсказуемы, а роботу свойственна многофункциональность, т. е. выполнение множества разных задач. Также данный алгоритм разработан для виртуальной реальности, а это значит, что ряд факторов в ней не учитывается, что делает метод непригодным для применения на практике.

Схемы с децентрализованным управлением (разработка университетов Тохоку и Хоккайдо). Ученые из Японии, изучая поведение морских звезд, создали робота, который способен приспосабливаться к повреждениям. Экспериментальный модуль, изображенный на рис. 4, состоит из пяти ног, прикрепленных на равноудаленном расстоянии к диску, на котором размещены источник питания и плата связи между ногами. Каждая конечность имеет две степени свободы, которые обеспечиваются шарнирами вращения в вертикальной и горизонтальной плоскостях. На конце каждой конечности расположены шипы, обеспечивающие трение между машиной и землей. Данный робот оценивает силы реакции между окружающей средой и каждой конечностью, измеряя потенциометрическим датчиком отклонение конечности от требуемого значения угловой координаты.

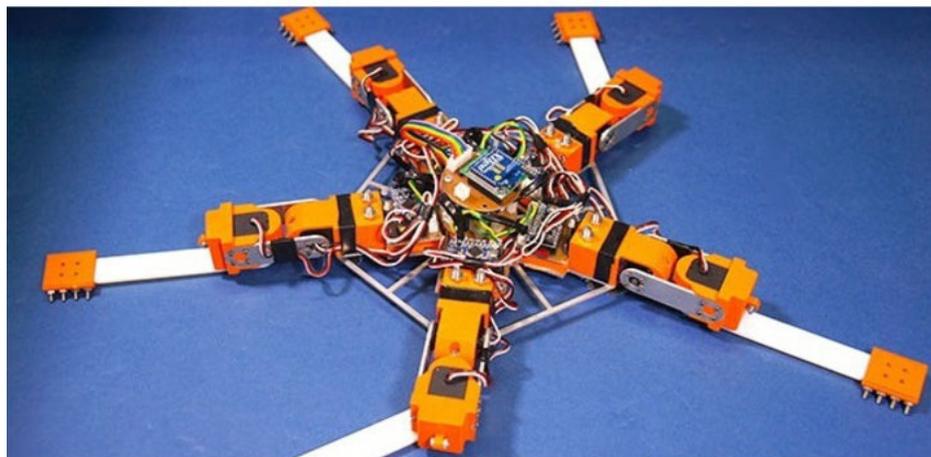


Рис. 4. Внешний вид прототипа робота

Выработка схемы передвижения осуществляется с помощью децентрализованного механизма управления конечностями. Каждая нога является самостоятельной подсистемой, определяющей собственные действия во время перемещения. Сначала конечность совершает случайное движение, чтобы определить реакцию поверхности. Если воздействие с поверхностью помогает движению к цели, то робот продолжает отталкиваться, начиная процесс интенсивного перемещения, который продолжается до достижения определенного угла конечностью. Если воздействие с поверхностью мешает движению к цели, то конечность остается в пассивном состоянии [9].

Для функционирования данной системы нужно три, а в некоторых случаях две функционирующие ноги, что позволяет игнорировать повреждения прочих.

Разработанный метод адаптации обладает высоким быстродействием в случае потери конечности, но сам вид походки неприспособлен для реализации на сухопутном модуле, так как она обладает низкой проходящей способностью и малой скоростью перемещения.

Схемы с устойчивой схемой походки (разработка Boston dynamics BigDog). Компания Boston dynamics создала четырехногого робота, изображенного на рис. 5, разработанного в рамках тендерного конкурса Darpa Mil, предназначенного для реализации разведывательной и транспортной функций. BigDog при собственной массе 110 кг способен переносить дополнительно до 154 кг со скоростью 6,4 км/ч. Габаритные размеры машины: 0,91 м по длине и 0,76 м по высоте. Основной целью разработки было обеспечение мобильности робота в условиях, не предназначенных для гусеничных и колесных машин. Созданная конструкция обеспечила требуемые характеристики проходимости [10].

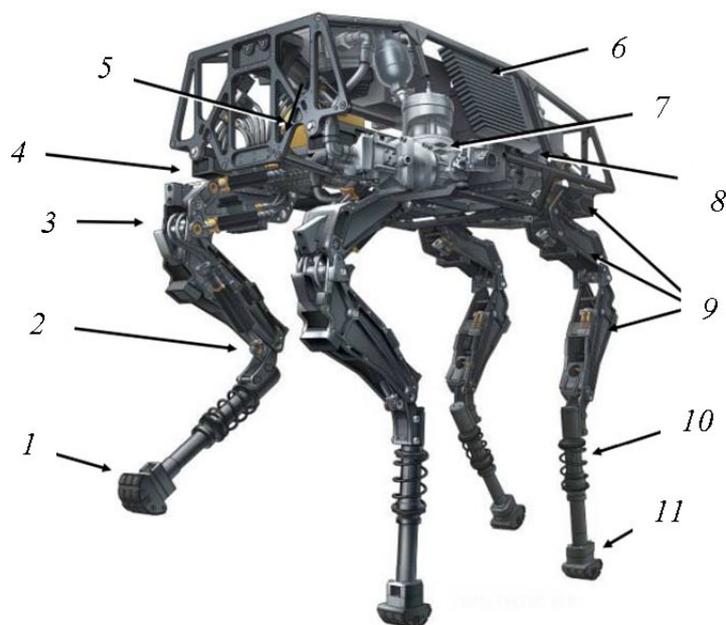


Рис. 5. Внешний вид робота BigDog:

1 — стопа; 2 — голень; 3 — колено; 4 — бедро; 5 — IMU-датчики; 6 — радиатор; 7 — двигатель; 8 — бортовой вычислитель; 9 — приводы; 10 — амортизаторы; 11 — датчик силы

Основной двигатель робота — двухтактный одноцилиндровый двигатель внутреннего сгорания, подсоединенный к гидронасосу, распределяющему рабочую жидкость между конечностями. Каждая нога BigDog оснащена четырьмя гидродвигателями, состоящими из гидроцилиндра, сервоклапана, измерителей положения и усилия. Суммарно контур управления машины содержит прибли-

зительно 50 датчиков. Локомоция генерируется моментально, опираясь на информацию о внутреннем состоянии робота, которую дают инерциальные сенсоры, определяющие положение и ускорение машины, и совмещенные датчики состояния гидроприводов в сочленениях конечностей робота. Также используются формируемые плоскостным лазерным сканированием и системой стереовизуализации объектов данные о возможных препятствиях, корректируемые с помощью датчиков формы и состояния поверхности, расположенных на конечностях [11, с. 4736–4741].

Основной метод перемещения BigDog — это динамически сбалансированная рысь, позволяющая развивать ему скорость, соизмеримую с человеческой. Процесс балансировки осуществляется с помощью оценки боковых скоростей и ускорений, которые определяются благодаря инерционным датчикам вычисляющие расположения ног. Система управления походки учитывают кинематику движения робота, силы реакции опоры и распределяет нагрузку между ногами, оптимизируя таким образом несущую способность робота. Алгоритм, координирующий походку, инициирует переходы состояния ноги, для воссоздания стабильного перемещения. Система управления адаптируется к изменению ландшафта благодаря анализу рельефа местности и контролю восприятия и положения тела робота относительно земли [12, с. 3]. С одной стороны, этот метод гарантировал необходимую проходимость и устойчивость в разных условиях (лесистая местность, обледенелая поверхность, асфальтированная дорога, и т. п.). С другой стороны, машина не приспособлена адаптироваться к повреждениям. Более того, она оснащена бензиновым двигателем, значит время автономной работы без дозаправки ограничено [13, с. 2].

Вывод. На основе приведенных разработок можно сделать вывод о том, что в настоящий момент имеется несколько общих тенденций в плане используемых технологий:

- технологии на основе машинного самообучения [14];
- технологии на основе устойчивой системы управления отдельными конечностями.

На основе сравнения рассмотренных вариантов было принято решение о дальнейшем исследовании концепции, заключающейся в подходе с сочетанием технологий машинного обучения и схем с устойчивой походкой — система так называемых кинематических шаблонов [15]. По сравнению со способом на основе машинного обучения данное решение будет обладать меньшими требованиями к вычислительным мощностям, а по отношению к системам с устойчивой походкой — большей вариативностью и возможностью подстройки под разные условия перемещения.

Литература

- [1] Лапшин В.В. *Механика и управление движением шагающих машин*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012, 199 с.
- [2] Рубцов И.В., Нестеров В.Е., Рубцов В.И. Современная зарубежная военная микро- и мини-робототехника. *Микросистемная техника*, 2000, № 3, с. 36–42.

- [3] Cornell University: веб-сайт университета. URL: <http://www.cornell.edu/> (дата обращения 15.04.2018).
- [4] Bongard J., Zykov V., Lipson H. Resilient machines through continuous self-modeling. *Science*, 2006, vol. 17, no. 314, pp. 1118–1121.
- [5] A robot teaches itself how to walk. URL: https://www.youtube.com/watch?v=iNL5-0_T1D0 (дата обращения 15.04.2018).
- [6] Bongard J. Morphological change in machines accelerates the evolution of robust behavior. *PNAS*, 2011, vol. 108, no. 4, pp. 1234–1239.
- [7] The University of Vermont: веб-сайт университета. URL: <https://www.uvm.edu> (дата обращения 15.04.2018).
- [8] Heess N., Dhruva T.B., Sriram S., Lemmon J., Merel J., Wayne G., Tassa Y., Erez T., Wang Z., Ali Eslami S.M., Riedmiller M., Silver D. Emergence of locomotion behaviours in rich environment. URL: <https://arxiv.org/pdf/1707.02286.pdf> (дата обращения 15.04.2018).
- [9] Kano T., Sato E., Ono T., Aonuma H., Matsuzaka Y., Ishiguro A. A brittle star-like robot capable of immediately adapting to unexpected physical damage. *R. Soc. Open Sci.*, 2017, vol. 4, no. 12, art. 171200.
- [10] Boston Dynamics: веб-сайт компании. URL: <https://www.bostondynamics.com/> (дата обращения 15.04.2018).
- [11] Wooden D., Malchano M., Blankespoor K., Howardy A., Rizzi A.A., Raibert M. Autonomous navigation for BigDog. *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, IEEE, 2010, pp. 4736–4741.
- [12] Raibert M., Blankespoor K., Nelson G., Playter R., the BigDog Team. BigDog, the rough-terrain quadruped robot. 2017. URL: <https://www.cs.swarthmore.edu/meeden/DevelopmentalRobotics/bigdog.pdf> (дата обращения 15.04.2018).
- [13] Playter R., Buehler M., Raibert M. BigDog. *Proc SPIE*, 2006, no. 6230, pp. 1–6.
- [14] Neuro-Robotics Systems. URL: <http://www.ieee-ras.org/neuro-robotics-systems> (дата обращения 15.04.2018).
- [15] Spröwitz A., Ajallooeian M., Tuleu A., Ijspeert A.J. Kinematic primitives for walking and trotting gaits of a quadruped robot with compliant legs. *Front. Comput. Neurosci.*, 07.03.2014. URL: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fncom.2014.00027/full>.

Воевода Никита Николаевич — студент кафедры «Специальная робототехника и мехатроника», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Андреева Евгения Валерьевна — студентка кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Лапин Дмитрий Владимирович — аспирант кафедры «Ракетные и импульсные системы», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

ANALYSIS OF THE WALKING ROBOTS' ADAPTIVE SYSTEMS

N.N. Voevoda

threespots@mail.ru

SPIN-code: 9113-5113

E.V. Andreeva

zheny-andreeva@yandex.ru

SPIN-code: 7823-6999

D.V. Lapin

lapin.sm6@gmail.com

SPIN-code: 9435-9163

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The article presents a comparison of the techniques for the modern walking robots' locomotion change with the purpose of the adaptation to the external and internal changes of the robot's state such as obstacles on the path of travel, varying landscape, breakdown of the components. We consider the prototypes, whose locomotion flow chart change is determined by the self-learning process based on the simulation carried out by means of the onboard computer. The analysis results show that currently these systems cannot be applied under real-life conditions, since these solutions do not have sufficient operational speed. The article also presents a locomotion technique based on the robot limbs decentralized control. This technique has demonstrated high speed of operation, but at the same time low passability. The authors have conducted the investigation of the machines with the adequate stability for the use under real-life conditions. However, we have detected a significant drawback of this product: when some limb is inactivated, the machine stops adapting efficiently to the external changes. As the most sustainable option we have accepted a template selection of the motion patterns based on the analysis of the environment and the internal state of the mobile robot.

Keywords

Extreme robotics, locomotion robot, mobile robot, locomotion flow chart, method of moving a robot, kinematic template, adaptive function, robot control

Received 02.07.2018

© Bauman Moscow State Technical University, 2018

References

- [1] Lapshin V.V. Mekhanika i upravlenie dvizheniem shagayushchikh mashin [Mechanics and control on walking machines movement]. Moscow, Bauman Press, 2012, 199 p.
- [2] Rubtsov I.V., Nesterov V.E., Rubtsov V.I. Modern foreign military micro- and mini-robotics. *Mikrosistemnaya tekhnika*, 2000, no. 3, pp. 36–42.
- [3] Cornell University: university website. Available at: <http://www.cornell.edu/> (accessed 15 April 2018).
- [4] Bongard J., Zykov V., Lipson H. Resilient machines through continuous self-modeling. *Science*, 2006, vol. 17, no. 314, pp. 1118–1121.
- [5] A robot teaches itself how to walk. Available at: https://www.youtube.com/watch?v=iNL5-0_T1D0 (accessed 15 April 2018).

- [6] Bongard J. Morphological change in machines accelerates the evolution of robust behavior. *PNAS*, 2011, vol. 108, no. 4, pp. 1234–1239.
- [7] The University of Vermont: university website. Available at: <https://www.uvm.edu> (accessed 15 April 2018).
- [8] Heess N., Dhruva TB, Sriram S., Lemmon J., Merel J., Wayne G., Tassa Y., Erez T., Wang Z., Ali Eslami S.M., Riedmiller M., Silver D. Emergence of locomotion behaviours in rich environment. Available at: <https://arxiv.org/pdf/1707.02286.pdf> (accessed 15 April 2018).
- [9] Kano T, Sato E., Ono T., Aonuma H., Matsuzaka Y., Ishiguro A. A brittle star-like robot capable of immediately adapting to unexpected physical damage. *R. Soc. Open Sci.*, 2017, vol. 4, no. 12, art. 171200.
- [10] Boston Dynamics: company website. Available at: <https://www.bostondynamics.com/> (accessed 15 April 2018).
- [11] Wooden D., Malchano M., Blankespoor K., Howardy A., Rizzi A.A., Raibert M. Autonomous navigation for BigDog. *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, IEEE, 2010, pp. 4736–4741.
- [12] Raibert M., Blankespoor K., Nelson G., Playter R., the BigDog Team. BigDog, the rough-terrain quadruped robot. 2017. Available at: <https://www.cs.swarthmore.edu/~meeden/DevelopmentalRobotics/bigdog.pdf> (accessed 15 April 2018).
- [13] Playter R., Buehler M., Raibert M. BigDog. *Proc SPIE*, 2006, no. 6230, pp. 1–6.
- [14] Neuro-Robotics Systems. Available at: <http://www.ieee-ras.org/neuro-robotics-systems> (accessed 15 April 2018).
- [15] Spröwitz A., Ajallooeian M., Tuleu A., Ijspeert A.J. Kinematic primitives for walking and trotting gaits of a quadruped robot with compliant legs. *Front. Comput. Neurosci.*, 07.03.2014. Available at: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fncom.2014.00027/full>.

Voevoda N.N. — student, Department of Robotics and Mechatronics, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Andreeva E.V. — student, Department of Aerospace Engineering Technologies, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Lapin D.V. — post-graduate, Department of Missile and Kinetic Warfare Systems, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.