

Ю. Ф. Голубев^{1, 2}, д-р физ.-мат. наук, гл. науч. сотр., проф., golubev@keldysh.ru,

В. В. Корянов¹, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр., korianov@keldysh.ru,

Е. В. Мелкумова², канд. физ.-мат. наук, доц., elena_v_m@mail.ru,

¹ ИПМ имени М. В. Келдыша РАН, г. Москва,

² МГУ имени М. В. Ломоносова, г. Москва

Спасение шагающего робота из аварийного положения на спине при наличии неровностей опоры

Предложен метод раскачивания шестиногого шагающего робота с целью обеспечить его переворот из положения "вверх ногами". В качестве опоры рассмотрена наклонная плоскость с небольшим уклоном в сторону переворота. Положение неподвижной опоры может быть задано последовательными поворотами вокруг двух разных осей. В области контакта возможно наличие ямки. Рядом с ямкой возможно наличие бугорка. Показано, что переворот возможен с помощью циклического движения ног, если корпус имеет верхнюю оболочку в виде усеченного цилиндра. Ноги на заранее выбранном краю корпуса, через который должен произойти переворот, являются пассивными, и выпрямляются вдоль корпуса для того, чтобы не мешать раскачиванию. Ноги на противоположном краю являются активными, они осуществляют синхронное движение в плоскости, перпендикулярной продольной оси корпуса, при фиксированном угле в колене. Выполнено аналитическое исследование, а также компьютерное моделирование полной динамики робота, контактирующего с опорой, средствами программного комплекса "Универсальный механизм". Приведены изменения, которые необходимо вносить в раскачивание при наличии ямки и бугорка. Для типичного набора параметров робота приведены результаты численных экспериментов для ямок приблизительно наибольших допустимых размеров в случаях, когда опорная поверхность повернута вокруг одной оси, вокруг двух осей, а также для разных типов ямок, глубокой и пологой. Во всех случаях рядом с ямкой расположен бугорок.

Ключевые слова: шестиногий робот, переворот корпуса, раскачивание, неровности опоры

Введение

Данная работа развивает результаты, представленные в работе [1], в части построения алгоритмов управления поведением робота в экстремальных ситуациях с использованием методов компьютерного моделирования.

Ситуации, когда требуется переворот из положения "вверх ногами", нередко встречаются в мире животных и особенно среди насекомых и рептилий, у которых имеется широкий твердый корпус. Например, жуки или черепахи в процессе эволюции научились преодолевать подобные затруднения. Методы, которые они используют, включают в себя приемы подтягивания и отжимания от опорной поверхности [2—4].

В работе [5] аналогичные методы используются для переворота робота с корпусом в виде полусферы. В статье [6] пара ног шестиного робота используется в качестве упора, облегчающего переворот. В работе [7] для переворота используется вспомогательный стержень.

В статье [8] возможности переворота обеспечивает модульная конфигурация корпуса робота, при которой отдельные части могут вращаться друг относительно друга.

Возможен вариант, когда за счет специальной конструкции ног робот может двигаться как в стандартном, так и в перевернутом положении корпуса [9].

В данной работе предлагается другой метод переворота робота из аварийного в рабочее положение с использованием динамических эффектов, которые возникают, когда робот, оказавшись в перевернутом положении, начинает без опоры ногами о грунт раскачивать корпус за счет специально сформированного движения ног, обеспечивающего увеличение амплитуды качаний. В результате амплитуда достигает такого значения, что робот обязательно переворачивается. Очевидно, что в рассматриваемом случае простой периодический закон движения ног не приведет к успеху, так как период качаний корпуса будет зависеть от амплитуды.

Особенности переворота робота в рабочее положение

Для облегчения переворота корпус имеет форму выпуклой вверх части цилиндра, срезанного плоскостью, параллельной оси цилиндра. В модельной задаче рассматривается раскачивание однородного сегмента круга без проскальзывания на опорной прямой (рис. 1). К правому концу B хорды сегмента плоским шарниром прикреплена нога — стержень массы m_1 , который может вращаться относительно сегмента на угол ψ . На другом конце хорды в точке E расположена точечная масса m_2 , уравнивающая ногу.

Аналитически раскачивание в этом случае описывается с помощью теоремы об изменении кинетического момента системы относительно подвижной точки A касания дуги окружности сегмента с опорной прямой [10, 11]. Из анализа модельной задачи следует, что управляющий угол отклонения активных ног следует задавать в виде кусочно-постоянной функции. Переключение должно происходить между двумя значениями, соответствующими предельным положениям ног при махах в сторону пассивных ног и обратно, в моменты времени, когда угловая скорость корпуса обращается в ноль.

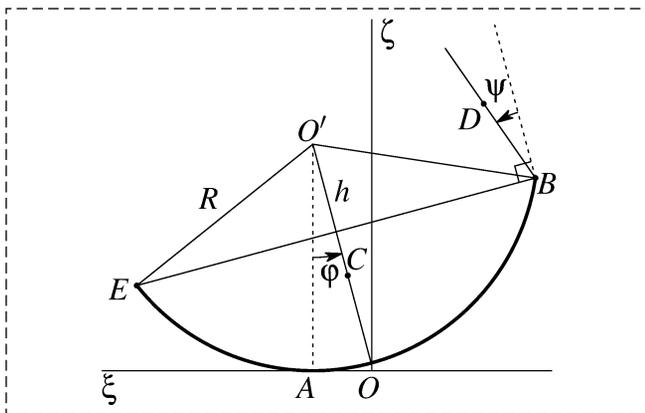


Рис. 1. Перевернутое положение робота
Fig. 1. Robot's overturned position

С помощью компьютерного моделирования выполняется уточнение управления с учетом наличия трения в контакте, а также наклонов опорной поверхности. При задании управляющего угла между постоянными значениями выполняются линейные переходы. Полная динамическая модель робота формируется автоматически средствами комплекса "Универсальный механизм" [12]. Механическая система имеет 24 степени свободы.

При наличии небольшого наклона опорной плоскости в сторону переворота необходимо сокращать мах активных ног в сторону от пассивных ног. При наличии ямки и бугорка необходимо увеличивать массу ног. Структура движения сохраняется, если при этом суммарная масса ног меньше, чем масса корпуса. На рис. 2 приведены фрагменты типичного раскачивания при комбинации помех. Наклон плоскости 10° , размеры ямки и бугорка примерно наибольшие для выбранных параметров робота при таком наклоне.

Соотношение размеров корпуса и звеньев ног имеет вид

$$a : b : R : r : l_1 : l_2 = 1 : 0,79 : 0,4 : 1,5 : 0,5 : 0,33,$$

где a, b — размеры прямоугольного плоского сечения двух прямых круговых цилиндров, образующих корпус робота; R, r — радиусы оснований цилиндров; l_1, l_2 — длины звеньев ног. Масса корпуса робота 25,42 кг.

Параметры ямки и бугорка на рис. 2: $\zeta_{0pit} = 0,45$ м (вертикальная координата центра ямки в связанной с ней системе координат, т. е. без учета поворота опоры), $R_{pit} = 0,55$ м (радиус основания цилиндра, образующего ямку); $\zeta_{0bump} = 0,45$ м, $R_{bump} = 0,55$ м, $\xi_{0bump} = 0,7$ м (горизонтальная координата центра бугорка в упомянутой выше связанной с ямкой системе координат, т. е. без учета поворотов опоры); масса одной ноги $m_{leg} = 2,6$ кг (масса всех ног равна $6m_{leg}$). Для определенности приведены конкретные значения, но, вообще говоря, размеры мо-

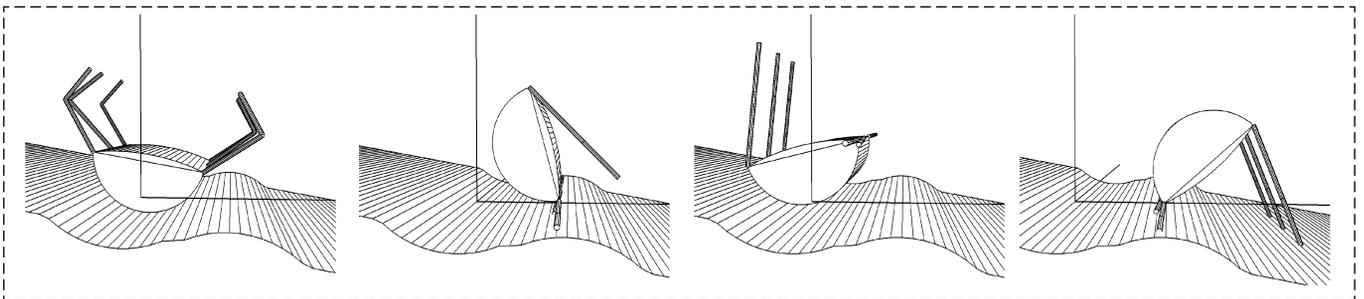


Рис. 2. Фрагменты движения: начальная позиция, типичный мах в сторону пассивных ног, обратный мах, позиция после завершения переворота

Fig. 2. Fragments of motion: initial position, typical swing toward the passive legs, back swing, position after the overturn

гут быть заданы относительно размеров корпуса, масса ноги — относительно его массы.

На рис. 3—6 приведены фрагменты моделирования в случае, когда опорная поверхность последовательно повернута вокруг двух осей. Порядок фрагментов везде тот же, что на рис. 2: начальная позиция (на рис. 5, 6 приведена позиция уже после распрямления ног),

типичный мах в сторону пассивных ног, обратный мах, позиция после завершения поворота. Поворот задается сначала вокруг горизонтальной оси, направленной вправо, на 15° , затем в повернутой системе координат — вокруг оси, сонаправленной с продольной осью робота, на 10° . Центр масс робота находится немного выше в процессе всего движения по

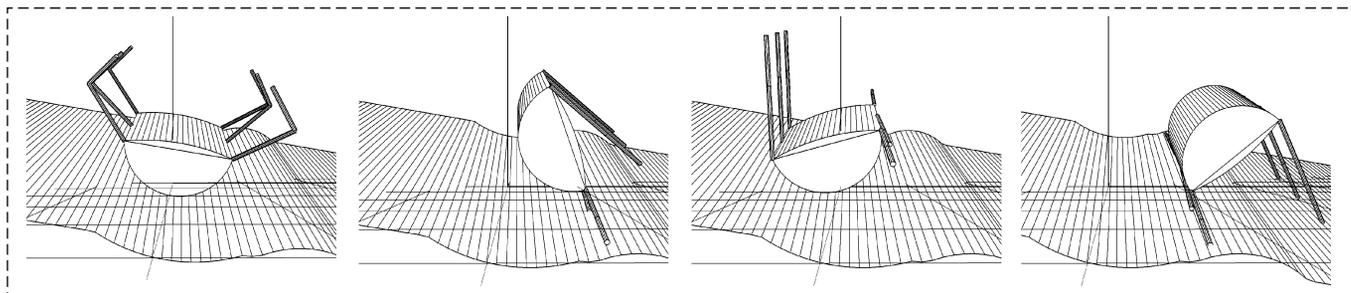


Рис. 3. Фрагменты движения, опора повернута дважды, радиус ямки увеличен без увеличения ее глубины
Fig. 3. Fragments of motion, the support is turned twice, pit's radius increased without increasing its depth

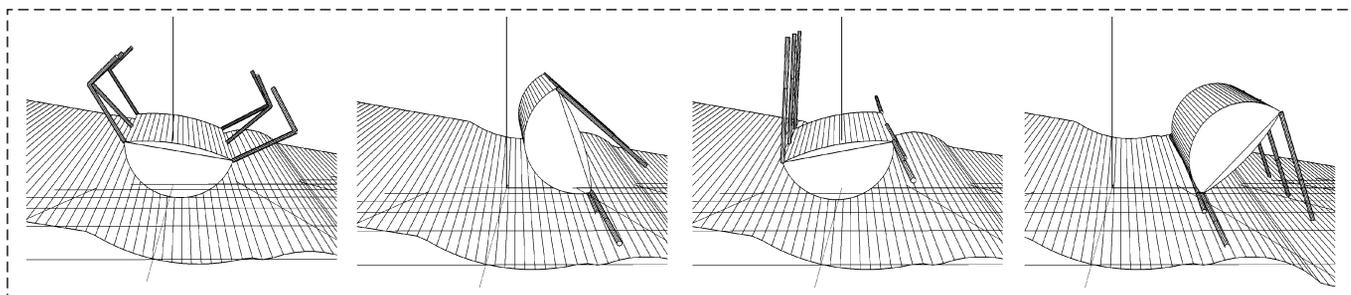


Рис. 4. Фрагменты движения, опора повернута дважды, радиус ямки увеличен без увеличения ее глубины (по сравнению с рис. 3), масса ног увеличена

Fig. 4. Fragments of motion, the support is turned twice, pit's radius increased without increasing its depth (in comparison with Fig. 3), the mass of the legs is increased

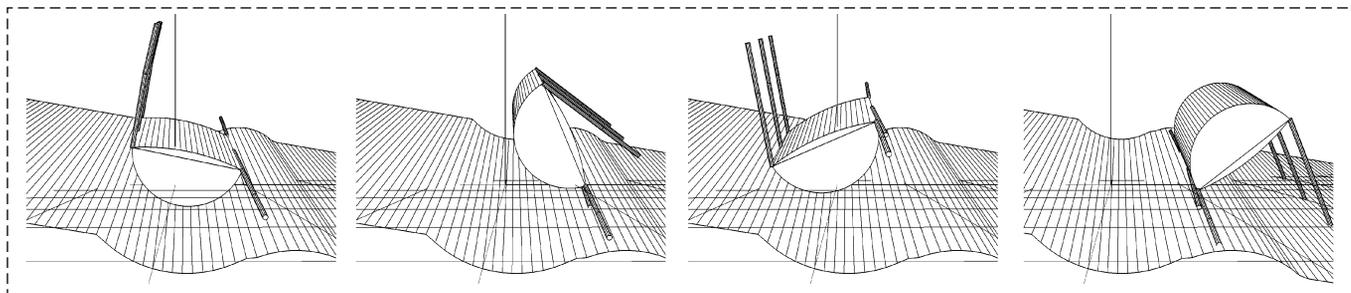


Рис. 5. Фрагменты движения, опора повернута дважды, глубина ямки увеличена

Fig. 5. Fragments of motion, the support is turned twice, pit's depth increased

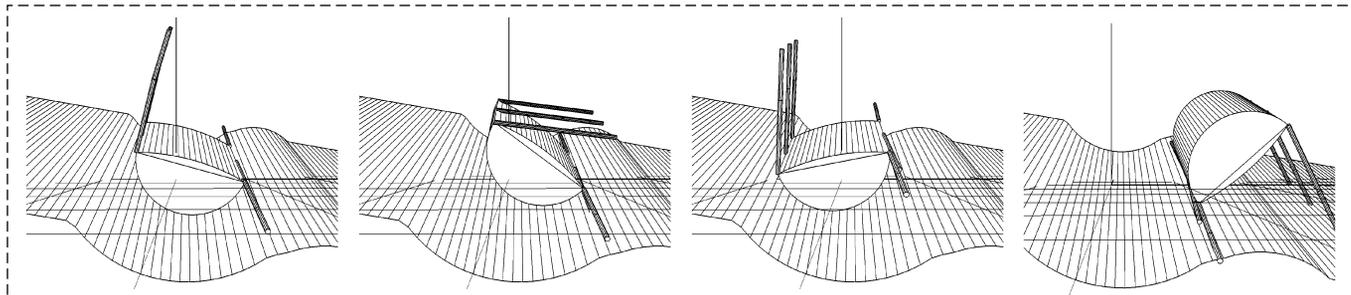


Рис. 6. Фрагменты движения, опора повернута дважды, глубина ямки увеличена по сравнению с рис. 5

Fig. 6. Fragments of motion, the support is turned twice, pit's depth increased in comparison with Fig. 5

сравнению с вариантом, когда первого поворота опоры нет, но при выбранных параметрах механической системы это мало влияет на раскачивание.

Радиус ямки в некоторых пределах можно увеличивать без увеличения ее глубины. На рис. 3 показан вариант $\zeta_{0pit} = 0,8$ м, $R_{pit} = 0,9$ м, $\xi_{0bump} = 0,8$ м. В численных экспериментах переворот робота продолжал срабатывать при уменьшении массы ноги до $m_{leg} = 1,32$ кг.

При выбранных параметрах дальнейшее увеличение радиуса ямки возможно только при увеличении массы ноги. На рис. 4 показан предельный в этом смысле вариант $\zeta_{0pit} = 0,9$ м, $R_{pit} = 1,0$ м, $\xi_{0bump} = 0,85$ м, $m_{leg} = 3,6$ кг.

Варианты с увеличениями глубины (радиуса) ямки без изменения положения ее центра показаны на рис. 5, 6. На рис. 5 $\zeta_{0pit} = 0,45$ м, $R_{pit} = 0,6$ м, $\xi_{0bump} = 0,75$ м, $m_{leg} \geq 1,8$ кг. На рис. 6 $\zeta_{0pit} = 0,45$ м, $R_{pit} = 0,7$ м, $\xi_{0bump} = 0,9$ м, $m_{leg} \geq 1,6$ кг. Приведенные неравенства для m_{leg} справедливы только если суммарная масса ног меньше, чем масса корпуса.

На рис. 7 представлены графики изменения по времени углов $\phi = \pi + \varphi$, ψ (рад) и угловой скорости $\dot{\phi}$ (рад/с) для варианта раскачивания, фрагменты которого приведены на рис. 6. Вертикальные линии показывают моменты начала и конца непосредственно раскачивания.

После завершения переворота корпуса происходит перестроение позиции робота в рабочее положение, из которого он может продолжить движение по поверхности. Перестроение происходит с помощью последовательного переноса

са троек ног, в каждой тройке переносится одна нога с одной стороны корпуса, и две с другой. После этого происходит выравнивание корпуса.

На рис. 7 приведены данные, соответствующие перестроению позы перед раскачиванием, самому раскачиванию и первому этапу (переносу первой тройки ног) перестроения в стандартную позицию.

Заключение

Представлено решение задачи о спасении автономного шагающего робота, аварийно лежащего на наклонной опорной поверхности на спине в положении "вверх ногами". Наклон опоры небольшой (примерно 15°), в сторону переворота. Опора может быть последовательно повернута вокруг двух разных осей. В области контакта может быть ямка, рядом с ней может быть бугорок. Для спасения робота предложена специальная форма корпуса в виде сложенных по плоскому сечению двух усеченных прямых круговых цилиндров. Разработан и аналитически обоснован [10] метод амплитудного раскачивания системы в окрестности положения аварийного равновесия, позволяющий использовать кинематические и динамические возможности робота для самостоятельного спасения.

Для выбранных параметров робота установлены приблизительные границы размеров неровностей (бугорка и ямки) и наклона опоры, при которых метод раскачивания продолжает работать.

Предложенные алгоритмы формирования движения робота при спасении из аварийной ситуации были отработаны средствами компьютерного моделирования в программной среде, реализующей расчет трехмерной полной динамической модели механической системы — робота, взаимодействующего с опорой.

Стабилизация движения шагающего робота в окрестности программного движения построена по принципу кусочно-формируемой с дискретностью шага интегрирования обратной связи. Обратная связь рассчитывается по рассогласованиям реальных и программных шарнирных углов с требованием минимальных значений угловых скоростей.

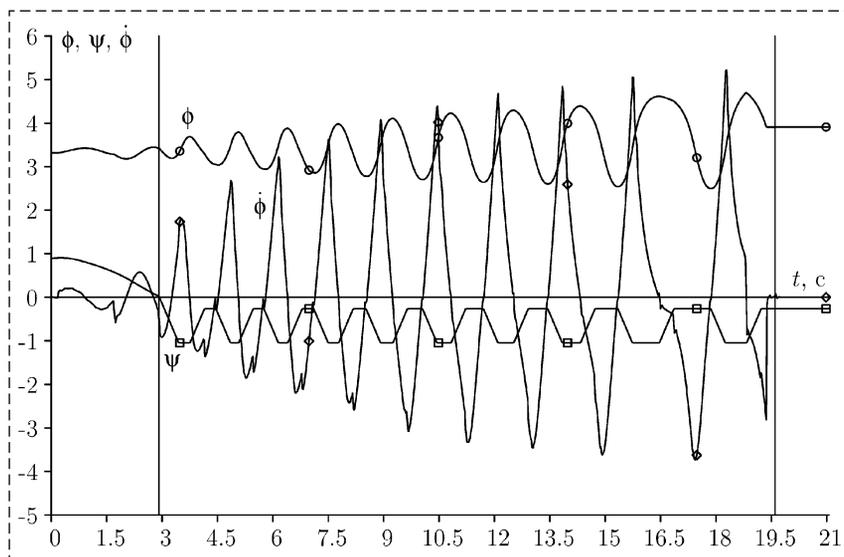


Рис. 7. Зависимость основных параметров движения от времени для варианта раскачивания с рис. 6

Fig. 7. Dependence of the main parameters of motion on time for the swinging variant from Fig. 6.

Список литературы

1. Голубев Ю. Ф., Корянов В. В. Экстремальные локомоционные возможности инсектоморфных роботов. М.: ИПМ имени М. В. Келдыша, 2018. 212 с.
2. Как переворачивается жук (бронзовка). URL: <https://www.youtube.com/watch?v=nbExQQ5uqqk>.
3. Frantsevich L. Righting kinematics in beetles (Insecta: Coleoptera) // *Arthropod Struct. Dev.* 2004. Vol. 33, Iss. 3. P. 221–235.
4. Domokos G., Várkonyi P. L. Geometry and self-righting of turtles // *Proc. R. Soc. B.* 2008. Vol. 275, Iss. 1630. P. 11–17.
5. Peng S., Ding X., Yang F., Xu K. Motion planning and implementation for the self-recovery of an overturned multi-legged robot // *Robotica.* 2017. Vol. 35, Iss. 5. P. 1107–1120.
6. Saranlı U., Rizzi A. A., Koditschek D. E. Model-based dynamic self-righting maneuvers for a hexapedal robot // *Int. J. Robot. Res.* 2004. Vol. 23, Iss. 9. P. 903–918.
7. Kessens C. C., Smith D. C., Osteen P. R. A Framework for Autonomous Self-Righting of a Generic Robot on Sloped Planar Sur-

faces // *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2012)*. Saint Paul, MN. May 14–18, 2012. P. 4724–4729.

8. Guanghua Z., Zhicheng D., Wei W. Realization of a Modular Reconfigurable Robot for Rough Terrain // *IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*. Luoyang, China. June 2006. P. 289–294.

9. Robot Kingdom. URL: https://www.youtube.com/watch?v=W9DOG47_xJk.

10. Голубев Ю. Ф., Корянов В. В., Мелкумова Е. В. Приведение инсектоморфного робота в рабочее состояние из аварийного положения "вверх ногами" // *Известия РАН. Теория и системы управления*. 2019. № 6. С. 163–176.

11. Голубев Ю. Ф., Корянов В. В., Мелкумова Е. В. Поведение шестиногого робота в аварийной ситуации // *Инженерный журнал: наука и инновации*. 2020. № 3. С. 1–10.

12. Универсальный механизм. Моделирование динамики механических систем. URL: <http://www.umlabor.ru> (дата обращения: 10.02.2020).

Rescue of the Walking Robot from an Emergency Position on the Back in the Presence of Uneven Support

Yu. F. Golubev^{1,2}, golubev@keldysh.ru, V. V. Koryanov¹, korianov@keldysh.ru, E. V. Melkumova², elena_v_m@mail.ru,
¹ Keldysh Institute of Applied Mathematics RAS, Moscow, 125047, Russian Federation,
² Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991, Russian Federation

Corresponding author: Koryanov V. V., PhD., Senior Researcher, Keldysh Institute of Applied Mathematics RAS, Moscow, 125047, Russian Federation, e-mail: korianov@keldysh.ru

Accepted on June 09, 2022

Abstract

A method of swinging of the six-legged robot to ensure its overturn from the "upside down" position is proposed. As a support, we consider an inclined plane with a slight slope towards the flip, with a pit and optionally with a bump next to it. The position of the fixed support can be set by sequential rotations around two different axes. It is shown that the overturn is possible with the help of cyclic movement of the legs, if the body has an upper shell in the form of a truncated cylinder. The legs on the pre-chosen edge of the body through which the flip should occur, are passive, and straightened along the body so that they do not interfere with the flip. The legs on the opposite edge are active; they perform synchronous movement in a plane perpendicular to the longitudinal axis of the body, with a fixed angle in the knee. The results of simulation of the full dynamics of the robot in contact with the support by means of the "Universal mechanism" software package are presented. Specifics of swinging due to the slope, the pit and the bump are shown. For a typical set of robot parameters, the results of numerical experiments for pits of approximately the largest admissible sizes in cases where the support surface is rotated around one axis, around two axes, and for different types of pits, deep and shallow. In all cases, there is a bump next to the pit.

Keywords: six-legged robot, flipping of the robot's body, rocking, uneven support

For citation:

Golubev Yu. F., Koryanov V. V., Melkumova E. V. Rescue of the Walking Robot from an Emergency Position on the Back in the Presence of Uneven Support, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2022, vol. 23, no. 9, pp. 481–485.

DOI: 10.17587/mau.23.481-485

References

1. Golubev Yu. F., Koryanov V. V. Extreme locomotion capabilities of insectomorphic robots, Keldysh Institute of Applied Mathematics, RAS, Moscow, 2018, 212 p. (in Russian)
2. How the beetle flips over (bronze), available at: <https://www.youtube.com/watch?v=nbExQQ5uqqk>, last accessed 2021/04/28.
3. Frantsevich L. Righting kinematics in beetles (Insecta: Coleoptera), *Arthropod Struct. Dev.*, 2004, vol. 33, iss. 3, pp. 221–235.
4. Domokos G., Várkonyi P. L. Geometry and self-righting of turtles, *Proc. R. Soc. B.*, 2008, vol. 275, iss. 1630, pp. 11–17.
5. Peng S., Ding X., Yang F., Xu K. Motion planning and implementation for the self-recovery of an overturned multi-legged robot, *Robotica*, 2017, vol. 35, iss. 5, pp. 1107–1120.
6. Saranlı U., Rizzi A. A., Koditschek D. E. Model-based dynamic self-righting maneuvers for a hexapedal robot, *Int. J. Robot. Res.*, 2004, vol. 23, iss. 9, pp. 903–918.
7. Kessens C. C., Smith D. C., Osteen P. R. A Framework for Autonomous Self-Righting of a Generic Robot on Sloped Planar

Surfaces, *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2012)*, Saint Paul, MN (May 14–18, 2012), pp. 4724–4729.

8. Guanghua Z., Zhicheng D., Wei W. Realization of a Modular Reconfigurable Robot for Rough Terrain, *IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, Luoyang, China, June 2006, pp. 289–294.

9. Robot Kingdom, available at: https://www.youtube.com/watch?v=W9DOG47_xJk.

10. Golubev Yu. F., Koryanov V. V., Melkumova E. V. Bringing an insectomorphic robot to a normal position from an abnormal upside down position, *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2019, 58(6), pp. 1018–1030.

11. Golubev Yu. F., Koryanov V. V., Melkumova E. V. Behavior of the six-legged robot in emergency situation, *Engineering Journal: Science and Innovation*, no. 3, 2020, pp. 1–10.

12. Universal mechanism. Modeling the dynamics of mechanical systems, available at: <http://www.umlabor.ru/pages/index.php?id=3> (date of access: 2020/10/02).