

С. В. Харузин, инженер, s.haruzin@rtc.ru, **О. А. Шмаков**, начальник отдела, shmakov@rtc.ru, Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики, Санкт-Петербург

Визуальная оценка локомоционной эффективности реконфигурируемого мобильного робота¹

Проведена визуальная оценка локомоционной эффективности виртуальной модели реконфигурируемого мобильного робота при движении по полигону, составленному из типовых препятствий. Рассмотрены два варианта комплектации устройства: с гусеничной и колесной ходовыми частями. Предложена система управления и алгоритм, обеспечивающие движение устройства в пространственных интервалах между предварительно определяемыми путевыми точками. Приведены результаты виртуального моделирования.

Ключевые слова: мобильный робот, модульная сборка, мехатронный модуль, система управления, визуальный анализ, преодоление препятствий

Введение

Быстрое развитие прикладных технологий способствует внедрению робототехнических решений во многие сферы человеческой деятельности. Часть практических и исследовательских задач решается с помощью мобильных роботов (МР). Такие устройства используются при проведении инспекций объектов промышленного и гражданского значения, в строительстве, при транспортировке, при проведении спасательных операций и т. д. Определяющим фактором при их построении является возможность адаптации механической структуры МР к перспективным условиям применения. Поэтому разработка реконфигурируемого МР, подготовленного к выполнению рабочих операций в широком диапазоне условий, является одной из актуальных задач мобильной робототехники.

Оценка и прогнозирование локомоционной эффективности реконфигурируемого МР на ранних стадиях разработки позволяет составить рекомендации и требования к параметрам его исполнительных и пассивных систем, определить характер перемещений робота, составить требования к его системе управления. Одним из наиболее эффективных методов оценки локомоционных параметров МР является виртуальное моделирование кинематики и динамики с последующей визуальной оценкой полученных результатов. Авторы работы [1] моделировали динамику шестиколесного робота с трансформируемой подвеской при движении по ступеням. В докла-

дах [2–3] представлен визуальный анализ эффективности нечеткого алгоритма оценки текущего состояния колесно-шагающей платформы при преодолении уступа. В работе [4] проводилась визуальная оценка эффективности алгоритма преодоления препятствия с прямоугольным сечением четырехколесным роботом, передняя и задняя оси колес которого соединены активным шарниром, вращающимся относительно продольной оси устройства. Предварительная оценка эффективности алгоритмов преодоления уступов и рвов шестиногими колесно-шагающими роботами рассмотрена в статьях [5–6]. Визуализация движений виртуальных моделей змееподобных роботов выполнена в работах [7–9]. Моделирование динамики и визуализация движений шагающего робота с четырьмя ногами описаны в докладе [10].

В данной статье проведена визуальная оценка локомоционной эффективности виртуальной модели реконфигурируемого мобильного робота при движении по полигону, составленному из типовых препятствий. Рассмотрены два варианта комплектации устройства: с гусеничной и колесной ходовыми частями. Предложены система управления и алгоритм, обеспечивающие движение устройства в пространственных интервалах между предварительно определяемыми путевыми точками. Приведены результаты виртуального моделирования.

Виртуальные модели МР и полигона

Изображения 3D-CAD моделей реконфигурируемых МР в гусеничной и колесной комплектациях приведены на рис. 1. Каждое мобильное устройство составлено из набора типовых модулей, комбинирование которых позволяет

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках соглашения № 14.578.21.0124 о предоставлении субсидии на выполнение прикладных научных исследований и экспериментальных разработок. Уникальный идентификатор ПНИЭР — RFMEFI57815X0124.

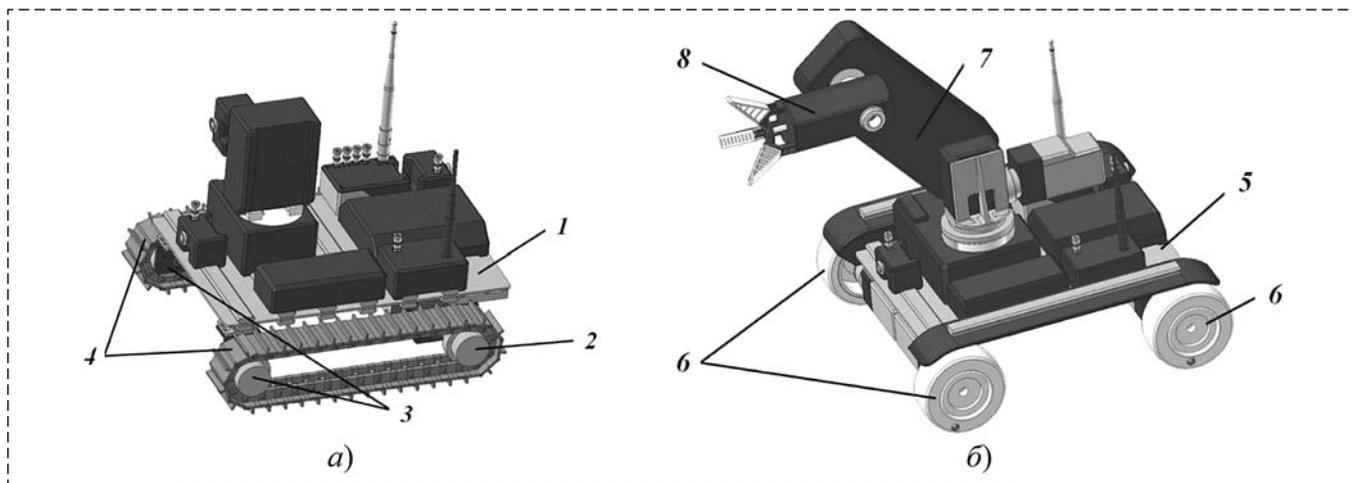


Рис. 1. Изображение 3D-CAD модели мобильной платформы в гусеничной (а) и в колесной (б) конфигурациях:
 1, 5 — несущие элементы МР; 2, 6 — ведущие колеса; 3 — ведомые колеса; 4 — гусеничные траки; 7, 8 — звенья манипулятора

собирают ходовые части и полезные нагрузки различных конфигураций. Несущие элементы проектируемых МР представлены каркасными конструкциями, выполненными в виде алюминиевых пластин 1 и 5 (рис. 1). К пластинам с двух сторон крепится массив из съемных планок Пикаттини. Планки предназначены для установки на них различных модулей и крепежных элементов. Крепление модулей осуществляется с помощью специальных фиксаторов, расположенных непосредственно на корпусах модулей. Сборка представленных в настоящей работе платформ осуществлялась из упрощенных 3D-CAD моделей типовых модулей приводов, датчиков, механических передач и модулей передачи данных. Все виртуальные представления модулей облада-

ют массогабаритными и инерционными характеристиками перспективных физических аналогов. Полезная нагрузка гусеничного МР представлена камерой, установленной на поворотном основании. Полезная нагрузка колесного МР представлена сборным манипулятором. Среди основных компонентов, из которых составлены платформы, можно выделить ведущие колеса 2 и 6, ведомые колеса 3, гусеничные траки 4 и два звена манипулятора 7, 8, одно из которых конструктивно совмещено со схватом. Массы обеих платформ составляют 7,5 кг.

Оценку локомоторной эффективности мобильных устройств проводили на полигоне, изображение которого приведено на рис. 2. Основным элементом полигона является подложка (1), на которой закреплены препятствия. В состав полигона входят препятствия: уклон и площадка (2, угол наклона составляет 15°), крутой уклон и ступени (3, угол наклона составляет 45°, высота ступени — 5 см), два набора препятствий типа камни (4 и 5), два препятствия типа планки (6 и 7, высота препятствий составляет 5 см), препятствие с волнистым сечением подстилающей поверхности (8) и уголок, составленный из трубок (9, диаметр трубки составляет 5 см).

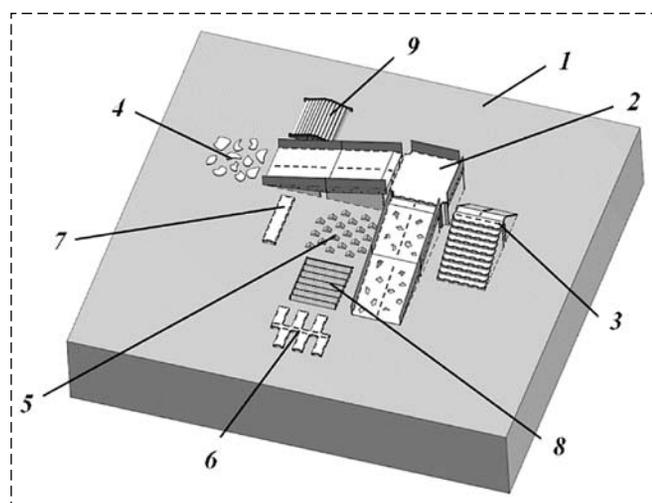


Рис. 2. Изображение 3D-CAD модели полигона для испытаний локомоторной эффективности МР:
 1 — подложка; 2 — уклон и площадка; 3 — крутой уклон и ступени; 4, 5 — препятствия типа камни; 6, 7 — препятствия типа планки; 8 — препятствие с волнистым сечением подстилающей поверхности; 9 — уголок из трубок

Структура системы управления

Обеспечивающая движение мобильных платформ в пространственных интервалах между путевыми точками система управления содержит блоки в соответствии со схемами на рис. 3, 4.

С виртуальной модели мобильного робота и рабочей среды в систему формирования управляющих сигналов поступают показания экстерорецептивных и проприорецептивных датчиков. В случае с гусеничной платформой проприоре-

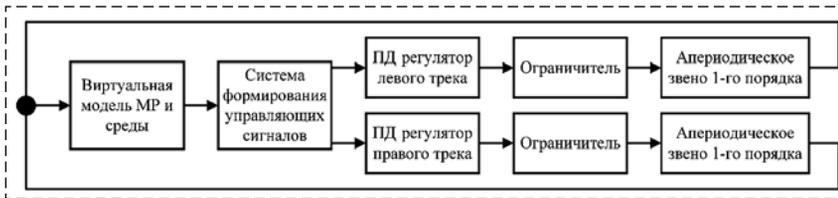


Рис. 3. Схема системы управления движением гусеничной платформы

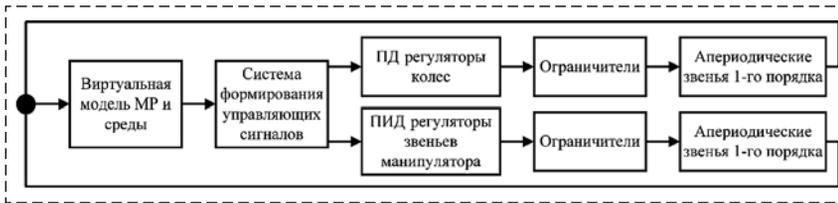


Рис. 4. Схема системы управления движением колесной платформы

цептивная информация представлена показаниями энкодеров, расположенных в двух ведущих колесах левой и правой гусеничных систем. Аналогичная информация для колесной платформы представлена показаниями энкодеров каждого из колес, а также показаниями абсолютных датчиков угла, установленных в сочленениях манипулятора. Экстерорецептивная информация представлена данными об абсолютном положении МР в глобальной системе координат и его ориентации в ней. Эта информация поступает на блок системы формирования управляющих сигналов, который с заданной частотой (во время виртуальных экспериментов частота составляла 100 Гц) сравнивает ее с текущим задаваемым положением МР (путевая точка) и используется при формировании заданий на вращение ведущих колес. Информация с энкодеров и угломеров используется для формирования рассогласований, которые затем подаются на входы ПД и ПИД регуляторов, играющих в этой системе стандартную роль по формированию значений вращающих моментов. Значение сформированного вращающего момента затем проходит через ограничитель, который имитирует физически максимально достижимое приводом значение вращающего момента, определяемое на основе характеристик реальных двигателей, предложенных к использованию в составе модульной платформы. Затем полученный сигнал проходит через передаточные функции аperiodических звеньев первого порядка, сглаживающих скачки вращающих моментов и функционирующих в соответствии с выражением

$$\frac{a}{bs + 1}$$

где $a = 1$, а значение коэффициента b выбиралось от 0,001 до 0,01.

Предложенный алгоритм движения МР в пространственных интервалах между путевыми точ-

ками реализуется системой формирования управляющих сигналов. Под путевой точкой понимается плоская координата, через малую окрестность которой (во время виртуальных экспериментов окрестность была ограничена окружностью диаметром 3 см) должен пройти маркер, жестко связанный с каркасом МР. По достижении координаты происходит ее переключение на следующую из предварительно определенного списка. Если же достигнута последняя координата, то происходит формирование команды остановки МР.

На вход системы формирования управляющих сигналов поступает информация о текущих скоростях вращения ведущих колес, текущее время моделирования, временной интервал, через который происходит расчет параметров (имитирует время отклика бортового вычислителя), абсолютные углы поворота звеньев манипулятора (если он включен в комплектацию), координаты устройства в глобальной системе координат, углы ориентации устройства в глобальной системе координат (имитация показаний компаса и инклинометров), массив координат путевых точек. Выходами системы являются рассогласования задаваемых и текущих скоростей вращения колес и положений звеньев манипулятора.

Алгоритм формирования рассогласований по скоростям вращения колес реализуется в три этапа. На первом этапе происходит определение направления на следующую путевую точку (относительно системы координат, связанной с каркасом МР). Затем происходит оценка полученного угла. Если абсолютное значение угла превышает 10° , то на выход системы поступают величины, приводящие к развороту платформы на месте (по кратчайшему направлению к путевой точке). Если абсолютное значение угла лежит в диапазоне от 1 до 10° , то блок формирует рассогласования, соответствующие движению МР в сторону путевой точки с одновременным разворотом. Если абсолютное значение полученного угла лежит в диапазоне от 0 до 1° , то формируемые сигналы способствуют движению МР вперед. На третьем этапе происходит оценка расстояния до путевой точки. Если оно становится меньше порогового значения (в рассматриваемом случае — 10 см), то задаваемая скорость вращения колес уменьшается (т. е. происходит торможение).

Виртуальный эксперимент

Во время виртуального эксперимента платформы осуществляли последовательный обход

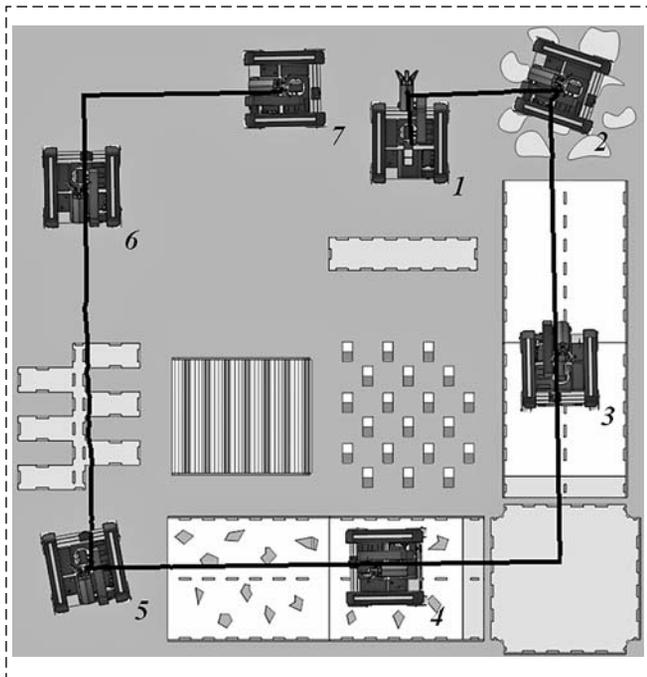


Рис. 5. Схема движения колесного МР по полигону

препятствий в соответствии с предварительно определенным набором путевых точек. При этом параметры контактного взаимодействия между исполнительными системами МР и средой выбирались следующим образом: динамический коэффициент трения составлял 0,4; статический коэффициент трения составлял 0,5.

Схема движения колесного МР по полигону в одном из сценариев моделирования приведена на рис. 5. Движение начинается из позиции 1, в которой МР предварительно складывает манипулятор в целях смещения центра масс устройства ближе к подстилающей поверхности (что положительно сказывается на маневренности устройства и снижает риск его опрокидывания при преодолении препятствий). Затем МР осуществляет обход препятствий в следующей последовательности: камни (2), уклон и площадка (3 и 4), планки (6 и 7).

Соответствующая рассмотренной схеме движения кинограмма анимации результатов виртуального моделирования с изометрическим расположением камеры приведена на рис. 6 (см. вторую сторону обложки).

МР с колесной ходовой частью успешно преодолевает препятствия типа камни, взбирается на пологий уклон и безостановочно совершает перемещение по планкам и волнистой поверхности. Движение без опрокидывания при спуске со ступеней, движение по крутому уклону и препятствию, составленному из трубок, возможно только при сложном манипуляторе. Наибольшее затруднение при преодолении вызывают такие препятствия, как крутой уклон и лестница. Вви-

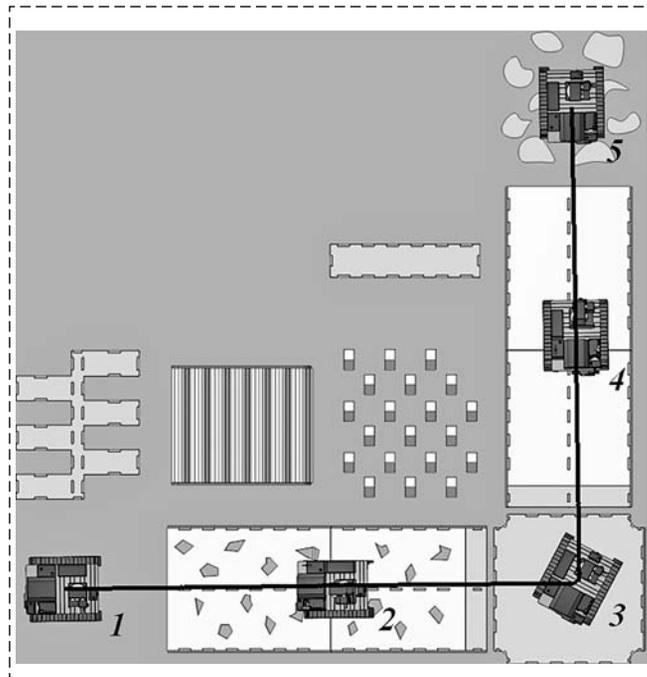


Рис. 7. Схема движения гусеничного МР по полигону

ду малой площади контакта колес и поверхности преодоление препятствий возможно только при увеличении коэффициентов динамического/статического трения до 0,7/0,8 соответственно.

Схема движения гусеничного МР по полигону в одном из сценариев моделирования приведена на рис. 7. Движение начинается из позиции 1. МР осуществляет обход препятствий в следующей последовательности: уклон/площадка (2–4) и камни (5).

Соответствующая рассмотренной схеме движения кинограмма анимации результатов виртуального моделирования с изометрическим расположением камеры приведена на рис. 8.

МР с гусеничной ходовой частью успешно преодолевает все представленные препятствия, за исключением камней, исполненных в виде массива призматических компонентов (в ряде экспериментов платформа цеплялась каркасом и/или корпусами исполнительных модулей). Низкое расположение центра масс МР обеспечивает движение без опрокидывания при подъеме и спуске со ступеней, преодолении крутого уклона.

Заключение

В целях оценки локомоционной эффективности колесной и гусеничной компоновочных схем в перспективных сценариях применения реконфигурируемого МР данные схемы апробированы на виртуальных динамических моделях. Визуальная оценка анимации результатов моде-

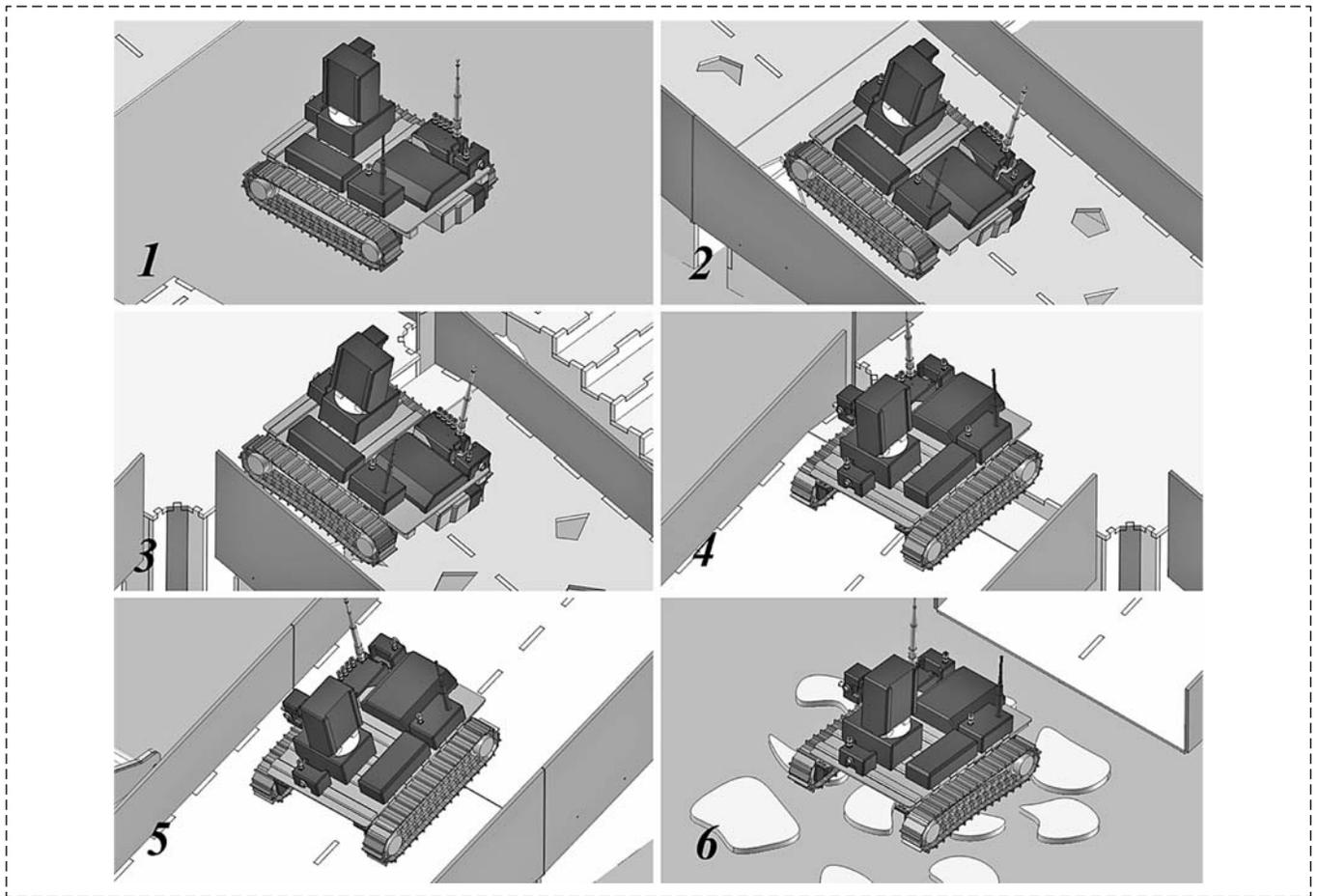


Рис. 8. Кинограмма анимации результатов виртуального моделирования движения гусеничного МР по полигону

лирования позволяет сделать вывод о том, что устройства способны осуществлять движение по пересеченной местности с небольшими препятствиями, осуществлять подъем на уклоны различной крутизны. Дальнейшими направлениями работы являются разработка компоновочных схем, обеспечивающих непрерывное движение по более широкому классу препятствий, оценка силомоментных характеристик исполнительных систем устройств, исследование влияния различных компоновок полезной нагрузки на локомоторную эффективность МР.

Список литературы

1. Min X., Runhuai Y., Yong C., Hongcheng X. Kinematics Modeling and Step Climbing Study of an All-Terrain Wheeled Mobile Robot on Uneven Terrains // Proc. of the 2011 IEEE International Conference on Electronic & Mechanical Engineering and Information Technology. 2011. P. 2725–2728.
2. Kyeong B. L., Jeong-Hoon K., Yong-San Y., Sang H. L., Shincheon K. Obstacle-Overcoming Algorithm for Unmanned Ground Vehicle with Actively Articulated Suspensions on Unstructured Terrain // Proc. of the 2008 IEEE International Conference on Control, Automation and Systems. 2008. P. 324–328.
3. Kyeong B. L., Jeong-Hoon K., Yong-San Y., Sang H. L., Shincheon K. Behavior planning of an unmanned ground vehicle

with actively articulated suspension to negotiate geometric obstacles // Proc. of the 2009 International Conference on Intelligent Robots and Systems. 2009. P. 821–826.

4. Shuro N. Concept of Adaptive Gait for Leg-wheel Robot, RT-Mover // Proc. of the 2012 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. 2012. P. 293–300.
5. Kyeong B. L., Sun J. K., Yong-San Y. Deliberative Planner for UGV with Actively Articulated Suspension to Negotiate Geometric Obstacles by Using Centipede Locomotion Pattern // Proc. of the 2010 IEEE International Conference on Control, Automation and Systems. 2010. P. 1482–1486.
6. Weidong W., Dongmei W., Wei D., Chun X., Pengfei S. The Optimization of Obstacle-Crossing and the Simulation in ADAMS of the Composite Six-wheeled-legged Robot // Proc. of the 2012 IEEE International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery. 2012. P. 2422–2426.
7. Motoyasu T., Fumitoshi M. Modeling and Control of a Snake Robot with Switching Constraints // Proc. of the 2008 SICE Annual Conference. 2008. P. 3076–3079.
8. Wei S. C., Jason T. Simultaneous Evolutionary-Based Optimization of Controller and Morphology of Snake-like Modular Robots // Proc. of the 2014 IEEE International Conference on Artificial Intelligence with Applications in Engineering and Technology. 2014. P. 38–42.
9. Pal L., Oyvind S., Kristin Y. P. Modular Pneumatic Snake Robot: 3D Modelling, Implementation and Control // Modeling, Identification and Control. 2008. Vol. 29. P. 21–28.
10. Manuel S., Ramiro B., Tomas C. Multi-Legged Walking Robot Modelling in MATLAB/SimMechanics and its Simulation // Proc. of the 2013 IEEE EURO-SIM Congress on Modelling and Simulation. 2013. P. 226–231.

Visual Estimation of the Reconfigurable Mobile Robot Locomotion Effectiveness

S. V. Kharuzin, s.haruzin@rtc.ru, O. A. Shmakov, shmakov@rtc.ru,
Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics,
Saint-Petersburg, 194064, Russian Federation

Corresponding author: **Kharuzin S. V.**, engineer,
Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics,
Saint-Petersburg, 194064, Russian Federation, e-mail: s.haruzin@rtc.ru

Accepted on November 17, 2017

In this paper we suggest estimation results for the reconfigurable mobile robot locomotion effectiveness. All estimations are performed via visual analysis of the virtual modelling results. In virtual modelling scenarios mobile robot were traversing through a space with consequently assembled obstacles of five main types: slope, ledge, step, stones, and tube array. Further we describe two robotic platform configurations: tracked and wheeled. Each mobile device is assembled from a set of specialized modules. Combining of these modules allows building different mobile (wheeled, tracked, leg-wheeled and etc.) and payload systems (sensor, manipulative). All modular subsystems have virtual representations with identical to their physical analogues mass and inertial properties. We propose two different payload types: payload for wheeled vehicle (represented with modular manipulation system) and payload for tracked vehicle (represented with video camera mounted on rotation module). Furthermore we describe control system that allows virtual model of mobile robot to move between preliminary defined waypoints. As a final result we provide sequences and following descriptions of the virtual modelling animation results. Research conclusions are made as follows: based on performed visual analysis we submit that both devices are able to traverse through rough terrain with relatively small obstacles or to climb slopes with different incline angles; our further work is focused on developing more effective mobile robot configurations and expanding the class of traversable obstacles.

Keywords: mobile robot, reconfigurable robot, modular design, mechatronic unit, control system, visual analysis, obstacle negotiation

Acknowledgements: This research is supported by the Ministry of Education and Science of Russia (an agreement № 14.578.21.0124 on granting for the implementation of applied scientific research and experimental development). Unique identifier of ASRED — RFMEFI57815X0124.

For citation:

Kharuzin S. V., Shmakov O. A. Visual Estimation of the Reconfigurable Mobile Robot Locomotion Effectiveness, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*. 2018, vol. 19, no. 3, pp. 169—174.

DOI: 10.17587/mau.19.169-174

References

1. **Min X., Runhuai Y., Yong C., Hongcheng X.** Kinematics Modeling and Step Climbing Study of an All-Terrain Wheeled Mobile Robot on Uneven Terrains, *Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Electronic & Mechanical Engineering and Information Technology*, 2011, pp. 2725—2728.
2. **Kyeong B. L., Jeong-Hoon K., Yong-San Y., Sang H. L., Shincheon K.** Obstacle-Overcoming Algorithm for Unmanned Ground Vehicle with Actively Articulated Suspensions on Unstructured Terrain, *Proceedings of the 2008 IEEE International Conference on Control, Automation and Systems*, 2008, pp. 324—328.
3. **Kyeong B. L., Jeong-Hoon K., Yong-San Y., Sang H. L., Shincheon K.** Behavior planning of an unmanned ground vehicle with actively articulated suspension to negotiate geometric obstacles, *Proceedings of the 2009 International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2009, pp. 821—826.
4. **Shuro N.** Concept of Adaptive Gait for Leg-wheel Robot, RT-Mover, *Proceedings of the 2012 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, 2012, pp. 293—300.
5. **Kyeong B. L., Sun J. K., Yong-San Y.** Deliberative Planner for UGV with Actively Articulated Suspension to Negotiate Geometric Obstacles by Using Centipede Locomotion Pattern, *Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Control, Automation and Systems*, 2010, pp. 1482—1486.
6. **Weidong W., Dongmei W., Wei D., Chun X., Pengfei S.** The Optimization of Obstacle-Crossing and the Simulation in ADAMS of the Composite Six-wheeled-legged Robot, *Proceedings of the 2012 IEEE International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery*, 2012, pp. 2422—2426.
7. **Motoyasu T., Fumitoshi M.** Modeling and Control of a Snake Robot with Switching Constraints, *Proceedings of the 2008 SICE Annual Conference*, 2008, pp. 3076—3079.
8. **Wei S. C., Jason T.** Simultaneous Evolutionary-Based Optimization of Controller and Morphology of Snake-like Modular Robots, *Proceedings of the 2014 IEEE International Conference on Artificial Intelligence with Applications in Engineering and Technology*, 2014, pp. 38—42.
9. **Pal L., Oyvind S., Kristin Y. P.** Modular Pneumatic Snake Robot: 3D Modelling, Implementation and Control, Modeling, Identification and Control, 2008, vol. 29, pp. 21—28.
10. **Manuel S., Ramiro B., Tomas C.** Multi-Legged Walking Robot Modelling in MATLAB/SimMechanics and its Simulation, *Proceedings of the 2013 IEEE EUROSIM Congress on Modelling and Simulation*, 2013, pp. 226—231.