

РАЗРАБОТКА УЧЕБНОГО ШАГАЮЩЕГО МОБИЛЬНОГО РОБОТА**Н.В. Петров**

nick.petr8v@yandex.ru

SPIN-код: 4569-1533

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

Аннотация

Статья посвящена разработке шестиногого учебного шагающего мобильного робота, оснащенного системой датчиков «камера + дальномер». Решена задача кинематического синтеза, т. е. выбора размеров корпуса и конечностей, а также обратная задача кинематики для робота и его конечностей с целью передвижения одной из существующих стандартных походок. Разработаны и рассчитаны приводы конечностей и системы датчиков. Разработаны плата управления приводами и элементы конструкции. Построена 3D-модель робота в программе Solid Works, а также предложена модель робота в программе MATLAB Simulink. На модели отработан алгоритм обхода препятствий.

Ключевые слова

Шагающий робот, учебный робот, кинематический синтез, походка, обратная задача кинематики, расчет приводов, алгоритм движения, 3D-моделирование, MATLAB Simulink

Поступила в редакцию 02.07.2019

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019

Введение. С недавних пор во всем мире все большее внимание исследователей привлекают шагающие мобильные роботы. Они обладают рядом преимуществ по сравнению с колесными и гусеничными роботами:

- могут преодолевать препятствия с резким перепадом высоты (относительно размера робота);
- имеют возможность поворачиваться на месте;
- способны перемещаться с произвольным углом между направлением движения и продольной осью машины;
- обладают возможностью произвольной ориентации корпуса робота относительно поверхности, на которой он находится;
- имеют высокую грунтовую проходимость.

К недостаткам мобильных роботов относятся:

- относительно малая скорость перемещения;
- неравномерность, колебательность движений;
- сложность управления и координации конечностей;
- высокие энергозатраты на обеспечение передвижений.

Шагающие роботы имеют перспективы использования в условиях сложного рельефа, непреодолимого для колесных или гусеничных роботов. Они могут найти применение в исследовательской области, при аварийно-спасательных работах в экстремальных условиях, военном деле, сельском и

лесном хозяйстве с использованием перспективных почвосберегающих технологий [1]. В связи с этим очень важной является подготовка специалистов в области шагающих роботов, знакомых с их конструкцией, кинематикой, особенностями управления и движения. Однако для создания таких роботов, а также для управления ими до сих пор не существует четких алгоритмов и методик, что обусловлено недостаточностью теоретических наработок в этом направлении.

Как следствие, необходимы пособия и стенды для обучения работе с шагающими роботами.

В рамках выпускной курсовой работы (ВКР) автора статьи разрабатывался учебный робот-стенд, позволяющий изучать и экспериментально реализовывать наработки, связанные с различными типами походок шагающих роботов, организацией движения и планированием траекторий робота с шагающим шасси.

Требования к роботу. В рамках технического задания (ТЗ) к роботу были предъявлены следующие требования:

1) обеспечить перемещение робота по горизонтальной плоскости, на которой имеются препятствия-ступени (высотой не более 0,15 м, длиной и шириной не менее 0,25 м) со средней скоростью до 0,1 м/с;

2) обеспечить возможность обнаружения препятствий.

Для обнаружения препятствий было решено использовать систему датчиков «камера + дальномер». Основными задачами ВКР являлись:

1) разработка конструкции робота (выбор типа конечностей и размеров робота);

2) разработка модели робота, решение обратной задачи кинематики (ОЗК) и синтез походки;

3) разработка приводов системы наблюдения и приводов сочленений конечностей;

4) разработка платы управления роботом;

5) разработка алгоритмов управления движением.

Кинематический синтез. В результате рассмотрения существующих моделей и анализа литературы было принято решение о разработке шестиногого шагающего робота с насекомоподобными конечностями с тремя степенями свободы в каждой. Шестиногие шагающие роботы имеют большое количество вариантов походок и хороши в плане статической устойчивости, а три степени свободы в каждой ноге обеспечивают достаточную подвижность робота и отсутствие проскальзывания конечности относительно опорной поверхности при движении. Также были приняты кинематические ограничения для приводов сочленений (рис. 1):

– для 3-го — $-60...60^\circ$;

– для 1-го — $-90...90^\circ$;

– для 2-го — $30...180^\circ$.

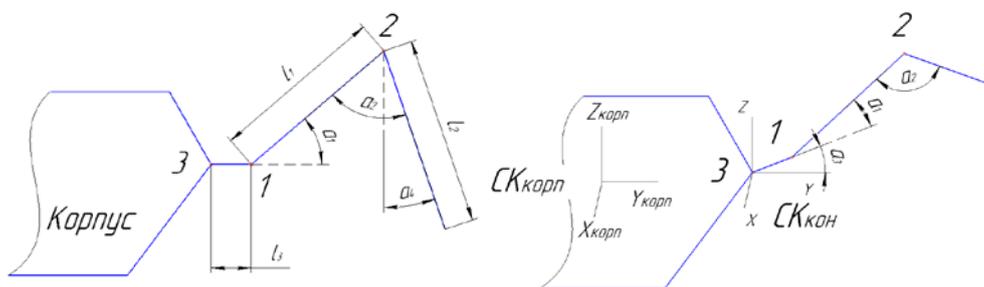


Рис. 1. Углы поворота сочленений конечности

Условная кинематическая схема с нумерацией соответствующих сочленений показана на рис. 2. Для звеньев принята аналогичная нумерация: 1 — промежуточное звено; 2 — контактирует с поверхностью, 3 — примыкает к корпусу.

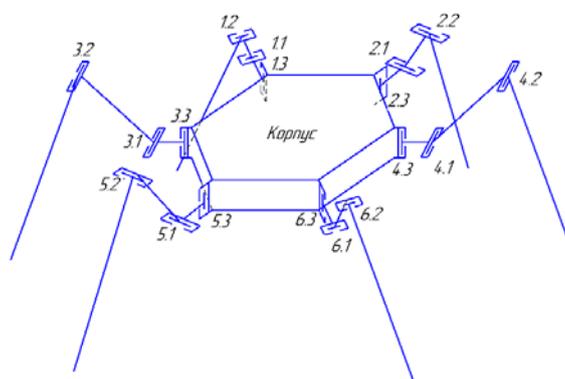


Рис. 2. Условная кинематическая схема

В соответствии с ТЗ проведен выбор размеров корпуса и длин конечностей робота исходя из условий возможности преодоления препятствий заданных размеров. В результате принята форма корпуса — правильный шестиугольник с длиной стороны 12 см, и суммарная длина звеньев ноги 1 и 2 — 24 см.

Также для выбора отношения длин звеньев конечности в среде MATLAB построены достижимые области конечности с учетом кинематических ограничений [2].

Выбран случай, когда отношение длин звеньев 1 и 2 составляло 1 : 1, т. е. длины звеньев 1 и 2 приняты равными 12 см, длина звена 3 условно принята равной 6 см (рис. 3).

Начало координат — точка крепления конечности к корпусу. Темным контуром показаны границы достижимой области конечности.

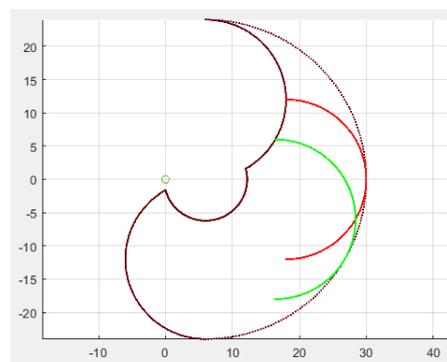


Рис. 3. Достижимая область конечности

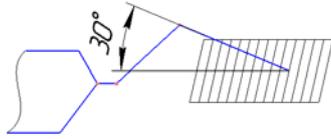


Рис. 4. Случай нормальной опоры на поверхность

Для исключения случаев, когда достижение какой-либо точки конечностью происходит «снизу», были введены ограничения на достижимую область (показаны зеленым), при которых угол между конечностью и опорной поверхностью составлял 30° — для обеспечения возможности опоры на поверхность (рис. 4).

Таким образом, выбраны следующие параметры робота: форма корпуса — правильный шестиугольник, длина стороны — 12 см, трехзвенные конечности с длинами 6, 12 и 12 см.

Разработка модели. В пакете MATLAB Simulink разработана модель робота. На первом этапе собрана условная кинематическая модель, находящаяся на ровной горизонтальной опорной поверхности (рис. 5).

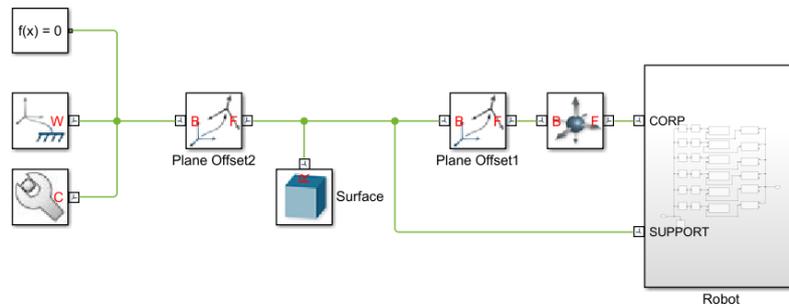


Рис. 5. Общая модель робота в MATLAB Simulink

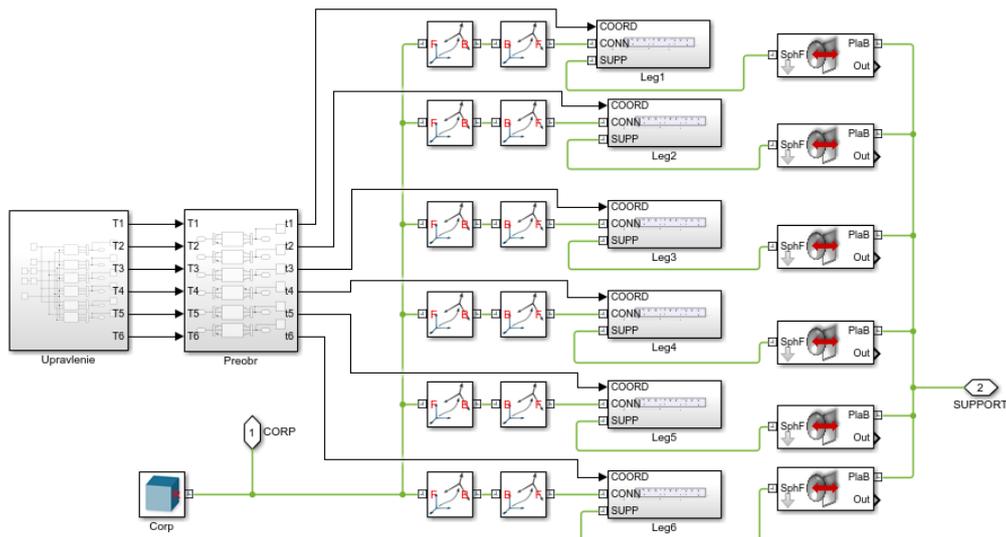


Рис. 6. Устройство блока Robot

Блок Robot представляет собой модель корпуса (на первом этапе — шестиугольник), соединенную с блоками конечностей с помощью блоков преобразования координат. Конечности, в свою очередь, входят в контакт с опорной поверхностью посредством блоков библиотеки Contact Forces. Состав блока Robot показан на рис. 6.

Состав блока конечности показан на рис. 7.

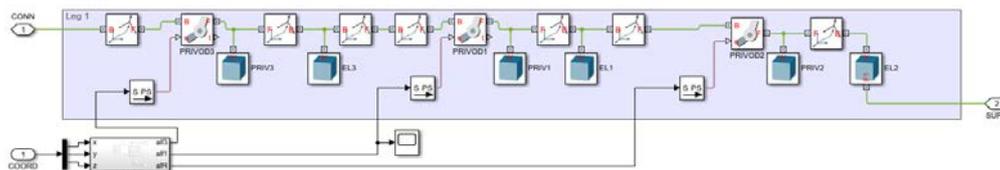


Рис. 7. Устройство блока конечности Leg

Конечность представляет собой три звена (на первом этапе — три цилиндрических тела), соединенных с вращательными шарнирами и блоками преобразования координат.

Угол поворота шарниров задается по углам, получаемым от блока решения обратной задачи кинематики OZK (рис. 8).

На вход блока приходят целевые координаты x, y, z опорной точки ноги в системе координат (СК) конечности. Уравнения для решения OZK конечности имеют следующий вид [3]:

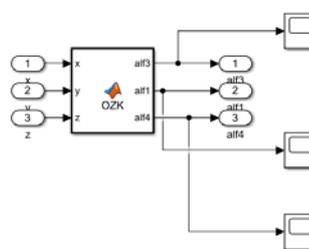


Рис. 8. Блок решения OZK конечности

$$k = \sqrt{x^2 + y^2}; \quad A = k - l_3; \quad d = \sqrt{A^2 + z^2};$$

$$\alpha_1 = \arctg\left(\frac{z}{A}\right) + \arccos\left(\frac{d^2 + l_1^2 - l_2^2}{2dl_1}\right); \quad \alpha_2 = \arccos\left(\frac{-d^2 + l_1^2 + l_2^2}{2l_1l_2}\right); \quad \alpha_3 = \arctg\left(\frac{x}{y}\right).$$

В формулах выше k, A, d — вспомогательные величины, необходимые для сокращения формул; l_1, l_2, l_3 — длины звеньев конечности; $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ — углы поворота звеньев.

Расположение углов в СК конечности, а также положение СК конечности относительно СК корпуса показано на рис. 9.

Для моделирования была выбрана походка «трешки», при ней робот движется с максимально возможной скоростью при условии статической устойчивости. При этом каждая тройка ног образует треугольник переноса неизменной формы, в вершинах которого находятся опорные точки конечностей. Для реализации «трешек» создан генератор походки, задающий последовательно изменяющиеся координаты вершин треугольников переноса в СК корпуса (в блоке Upravlenie). В блоке Preobr происходит преобразование этих координат из СК корпуса в СК конечностей (см. рис. 6).

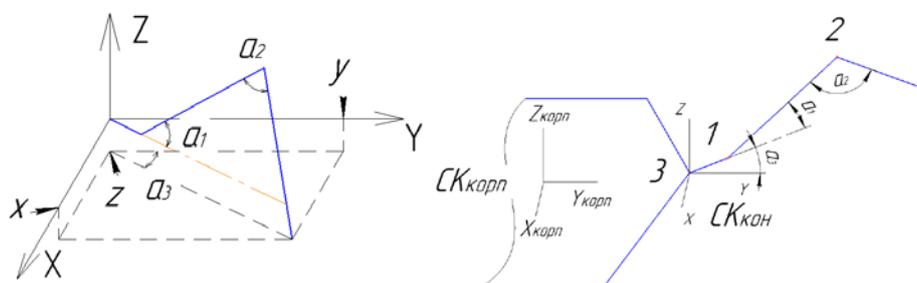


Рис. 9. Системы координат конечностей и корпуса

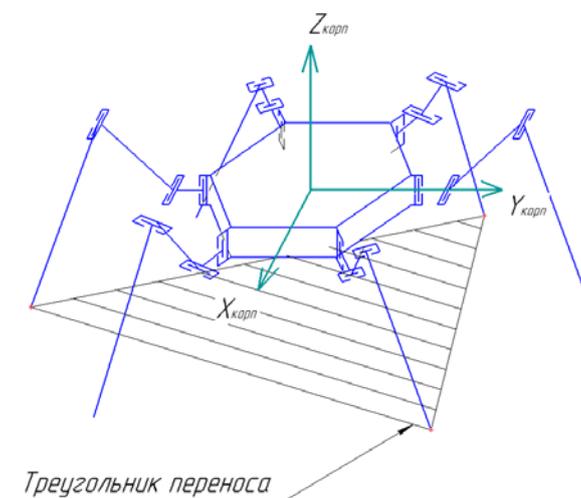


Рис. 10. Треугольник переноса в СК корпуса

Матрица координат опорной точки конечности i -й ноги в СК корпуса

$$T(i) = \begin{bmatrix} x_{\text{corp}}(i) \\ y_{\text{corp}}(i) \\ z_{\text{corp}}(i) \end{bmatrix};$$

Матрица координат опорной точки конечности i -й ноги в СК этой конечности:

$$t(i) = \begin{bmatrix} x_{\text{kon}}(i) \\ y_{\text{kon}}(i) \\ z_{\text{kon}}(i) \end{bmatrix};$$

Матрица перехода от СК корпуса к СК конечности:

$$\tau = \begin{bmatrix} \cos \gamma(i) & -\sin \gamma(i) & 0 \\ \sin \gamma(i) & \cos \gamma(i) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

где $\gamma(i)$ — это угол, учитывающий положение конечности относительно СК корпуса.

Переход от T к t осуществляется с помощью преобразования

$$t = \tau T - \begin{bmatrix} 0 \\ l_{\text{корп}} \\ 0 \end{bmatrix}.$$

Длина шага задается равной 20 см, время одного шага 2 с, таким образом обеспечивается скорость движения 0,1 м/с.

Разработка приводов. Были выбраны двигатели и редукторы для сочленений и системы датчиков [4]. Синтезированы параллельные корректирующие устройства. [5] Выбор и расчет приводов осуществлялся в соответствии с требованиями ТЗ. Привод третьего сочленения выбирали для самого нагруженного случая — продвижения корпуса вперед из положения, показанного на рисунке с помощью алгоритма походки «трешки». В этом случае опора происходит на три конечности, положение которых горизонтально, что соответствует наибольшей динамической нагрузке (рис. 11).

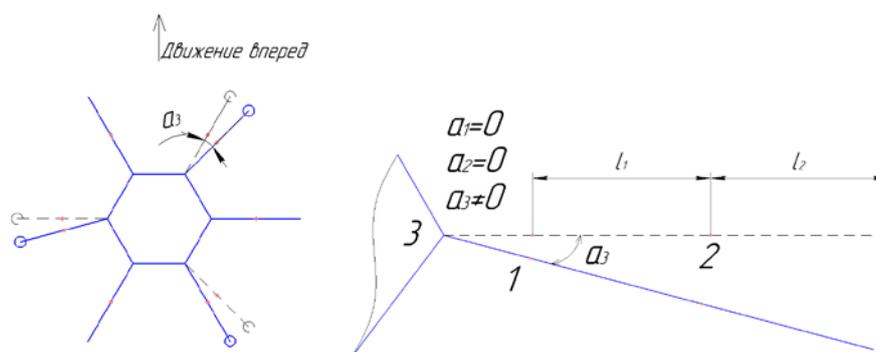


Рис. 11. Предельно нагруженный случай для расчета третьего привода

Приводы сочленений 1 и 2 выбирали для самого нагруженного случая, соответствующего их работе при горизонтальном положении конечностей, когда в фазе опоры находятся пять конечностей из шести, что соответствует крайнему случаю поочередной походки. В таком положении плечо действующей статической нагрузки максимально (рис. 12).

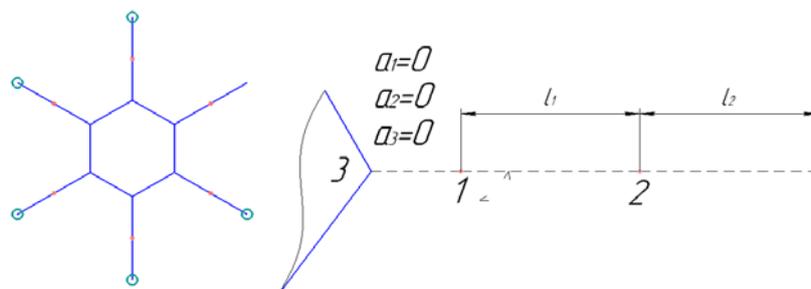


Рис. 12. Предельно нагруженный случай для расчета первого и второго приводов

Проведено моделирование походки «трешки» с интеграцией моделей приводов в модель робота, которое показало, что приводы и синтезированная коррекция успешно обрабатывают заданное движение.

Разработка конструкции. В результате рассмотрения существующих конструкций принято решение использовать вместо выбранных приводов конечностей аналогичные по характеристикам сервоприводы. Для отработки навыков и знаний теории автоматического управления на роботе по-прежнему остается один привод с двигателем постоянного тока, вращающий систему датчиков в горизонтальной плоскости. Для контроля контакта с опорной поверхностью на роботе установлены концевые выключатели в опорной части каждой конечности.

Разработана конструкция для изготовления робота методом 3D-печати (рис. 13) [6].



Рис. 13. Конструкция робота

Для контроля всех приводов и управления движением разработан управляющий блок, представляющий собой плату с микроконтроллером (рис. 14) [7].

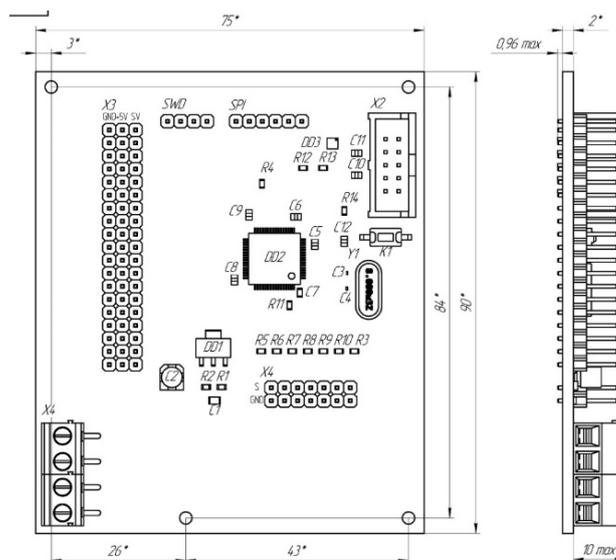


Рис. 14. Блок управления механической частью

Выбраны аккумулятор [8], блок преобразователя напряжения [9], бортовой управляющий компьютер [10].

Алгоритм обхода препятствия. В среде MATLAB Simulink протестирован и отработан пробный алгоритм движения в целевую точку с обходом прямоугольного препятствия (рис. 15).

Робот, двигаясь в сторону целевой точки, при обнаружении препятствия на своей траектории приближался к препятствию, поворачивал и следовал вдоль его границ, пока те не закончатся. Таким образом реализовывался обход препятствия с дальнейшим следованием в целевую точку. Результаты работы алгоритма приведены на рис. 16, красным обозначена траектория следования робота.

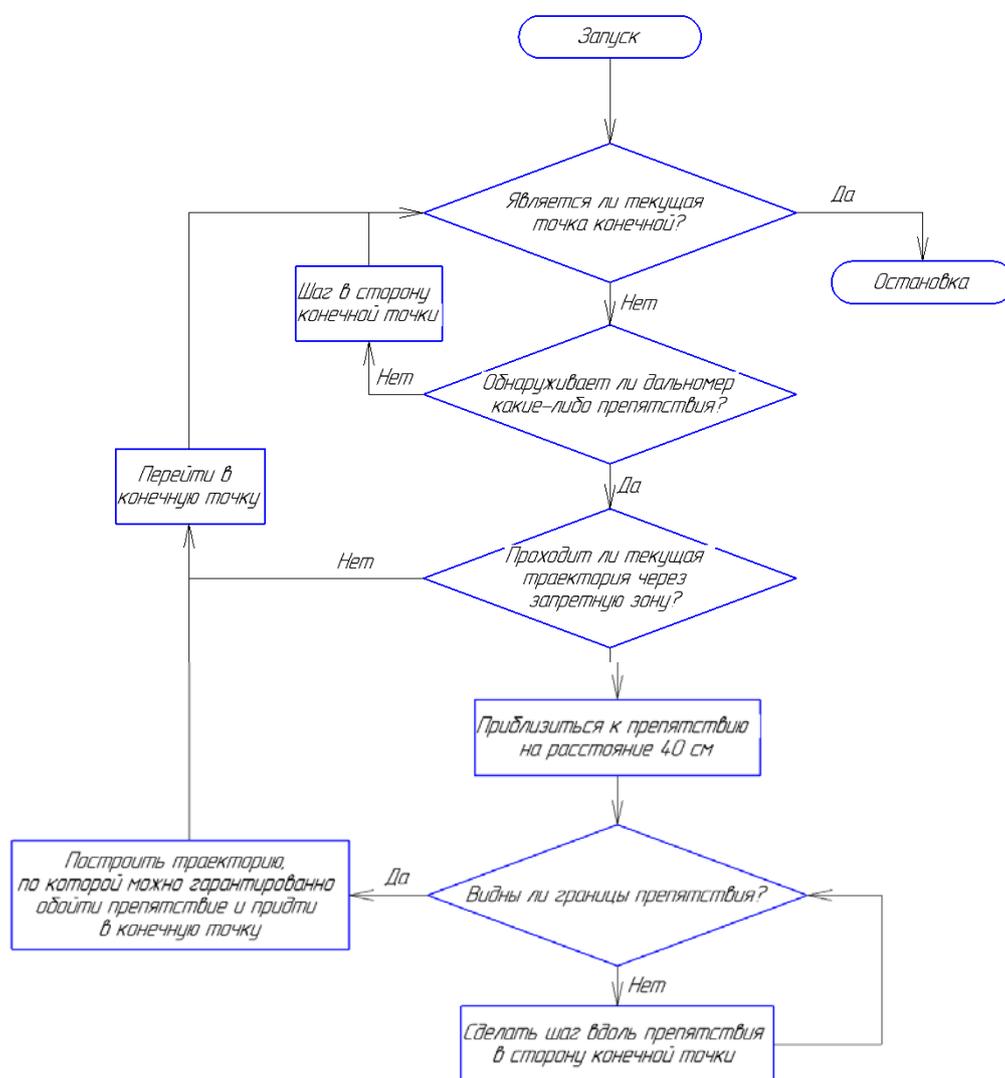


Рис. 15. Алгоритм движения с обходом препятствия



Рис. 16. Результат работы алгоритма обхода препятствия

Заключение. В результате работы была создана модель учебного шагающего мобильного робота — проведен кинематический синтез, рассчитаны приводы и разработана конструкция робота. Создан блок управления, выбрана внутренняя компоновка с учетом всех блоков и устройств, необходимых для функционирования. Промоделирована походка «трешки», выбраны ее параметры. Протестирован пробный алгоритм движения с обходом препятствий.

Работа позволила получить практические результаты, необходимые для изготовления прототипа робота.

Литература

- [1] Павловский В.Е. О разработках шагающих машин. *Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша*, 2013, № 101.
- [2] Герман-Галкин С.Г. *Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК*. СПб., КОРОНА-Век, 2008.
- [3] Лапшин В.В. *Механика и управление движением шагающих машин*. М., Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012.
- [4] Попов Е.П. *Теория линейных систем автоматического регулирования и управления*. М., Наука, 1989.
- [5] Кокорев Ю.А., Жаров В.А., Торгов А.М. *Расчет электромеханического привода*. М., Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1995.

- [6] Гузненков В.Н., Журбенко П.А., Бондарева Т.П. SolidWorks 2016. Трехмерное моделирование деталей и выполнение электронных чертежей. М., Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018.
- [7] STM32F103RFT6. *st.com: веб-сайт*. URL: <http://www.st.com/en/microcontrollers/stm32f103rf.html> (дата обращения: 21.10.2017).
- [8] Спецификация на Li-ion перезаряжаемый элемент питания. *robiton.ru: веб-сайт*. URL: <https://www.robiton.ru/sites/default/files/P00131495N13485.pdf> (дата обращения: 21.10.2017).
- [9] Импульсные источники вторичного электропитания. *mmp-irbis.ru: веб-сайт*. URL: <http://www.mmp-irbis.ru/catalog2018.pdf> (дата обращения: 01.04.2019).
- [10] Raspberry Pi 3 model B+. *static.raspberrypi.org: веб-сайт*. URL: <https://static.raspberrypi.org/files/product-briefs/Raspberry-Pi-Model-Bplus-Product-Brief.pdf> (дата обращения: 01.04.2019).

Петров Никита Владимирович — студент магистратуры кафедры «Робототехнические системы и мехатроника», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — Зеленцов Виктор Валентинович, старший преподаватель кафедры «Робототехнические системы и мехатроника», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

DEVELOPMENT OF A TRAINING WALKING MOBILE ROBOT

N.V. Petrov

nick.petr8v@yandex.ru

SPIN-code: 4569-1533

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The article is devoted to the development of a training six-legged walking mobile robot equipped with a camera + range sensor system. The problem of kinematic synthesis has been solved, i.e. the choice of body and limbs size, as well as the inverse kinematics problem for the robot and its limbs in order to move in one of the existing standard gaits. Limb drives and sensor systems have been developed and calculated. The drive control board and structural elements have been developed. A 3D model of the robot was built in the Solid Works program, and a robot model in the MATLAB Simulink program was also proposed. The model worked out an obstacle avoidance algorithm.

Keywords

Walking robot, training robot, kinematic synthesis, gait, inverse kinematics problem, calculation of drives, motion algorithm, 3D modeling, MATLAB Simulink

Received 02.07.2019

© Bauman Moscow State Technical University, 2019

References

- [1] Pavlovskiy V.E. For elaboration of walking machines. Preprinty IPM im. M.V. Keldysha [Keldysh Institute Preprints], 2013, no. 101 (in Russ.).
- [2] German-Galkin S.G. Matlab & Simulink. Proektirovanie mekhatronnykh sistem na PK [Matlab & Simulink. Mechatronic system engineering on PC]. Sankt-Petersburg, KORONA-Vek Publ., 2008 (in Russ.).
- [3] Lapshin V.V. Mekhanika i upravlenie dvizheniem shagayushchikh mashin [Mechanics and motion control on walking machines]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2012 (in Russ.).
- [4] Popov E.P. Teoriya lineynykh sistem avtomaticheskogo regulirovaniya i upravleniya [Theory of linear systems for automated regulation and control]. Moscow, Nauka Publ., 1989 (in Russ.).
- [5] Kokorev Yu.A., Zharov V.A., Torgov A.M. Raschet elektromekhanicheskogo privoda [Electromechanical drive calculation]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 1995 (in Russ.).
- [6] Guznenkov V.N., Zhurbenko P.A., Bondareva T.P. SolidWorks 2016. Trekhmernoe modelirovanie detaley i vypolnenie elektronnykh chertezhey [SolidWorks 2016. 3D parts modelling and making electronic drawings]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2018 (in Russ.).
- [7] STM32F103RFT6. st.com: website. URL: <http://www.st.com/en/microcontrollers/stm32f103rf.html> (accessed: 21.10.2017).
- [8] Spetsifikatsiya na Li-ion perezaryzhaemyy element pitaniya [Specification on Li-on rechargeable battery]. robiton.ru: website (in Russ.). URL: <https://www.robiton.ru/sites/default/files/P00131495N13485.pdf> (accessed: 21.10.2017).
- [9] Impul'snye istochniki vtorichnogo elektropitaniya [Pulsed sources of secondary electric power]. mmp-irbis.ru: website (in Russ.). URL: <http://www.mmp-irbis.ru/catalog2018.pdf> (accessed: 01.04.2019).

- [10] Raspberry Pi 3 model B+. static.raspberrypi.org: website. URL: <https://static.raspberrypi.org/files/product-briefs/Raspberry-Pi-Model-Bplus-Product-Brief.pdf> (accessed: 01.04.2019).

Petrov N.V. — Student, Department of Robotics and Mechatronics, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Scientific advisor — Zelentsov V.V., Senior Lecturer, Department of Robotics and Mechatronics, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.