

Преобразуем базисные оси репера начального положения с помощью обратной матрицы M^T .

$$\begin{aligned} X_1 &= M^T X, \\ Y_1 &= M^T Y, \\ Z_1 &= M^T Z. \end{aligned}$$

Полученные в результате преобразования оси X_1 , Y_1 и Z_1 являются базисом начального положения репера, заданным относительно базиса конечного положения. Далее задача расчета углов Эйлера решается с использованием рассмотренного ранее алгоритма.

Заключение

Разработан алгоритм расчета углов Эйлера по координатам ортонормированного репера, ассоциированного с рабочим органом робототехнической системы. Представлены основные расчетные соотношения, позволяющие выполнить программную реализацию алгоритма. Показано, как использовать алгоритм расчета для общего случая задания базисов начального и конечного положений репера в глобаль-

ной системе координат, что существенно расширяет его сферу применения.

Список литературы

1. Математическая составляющая. Редакторы-составители Н. Н. Андреев, С. П. Коновалов, Н. М. Панюнин — 2-е изд., расш. и доп. — М.: Фонд «Математические этюды», 2019. 367 с.
2. *Khomchenko V.G.* Robot manipulator end-effector orientation setting methods. Journal of physics: conference series // XII international scientific and technical conference "Applied mechanics and systems dynamics" AMSD 2018. Omsk. Institute of Physics Publishing.
3. *Вермель В.Д., Зарубин С.Г., Илюхин Ю.В. и др.* Роботизированный технологический комплекс для прецизионной плазменной резки, плазменного упрочнения поверхности и нанесения защитных покрытий // Технология машиностроения. 2013. № 9. С. 48-53.
4. *Lascalza S., Gallo L. N., Carpenter J. E., Hughes R. E.* A method for measuring Euler rotation angles and helical axis of upper arm motion // Journal of applied biomechanics — Human Kinetics Publishers, Inc., 2002. Vol. 18. № 4. pp. 374-383.
5. *Бронштейн И.Н., Семендяев К.А.* Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. Изд. 13-е. М.: Наука, 1986. 544 с.

Николаев Прокопий Михайлович — д-р техн. наук, начальник отдела ФГУП «ЦАГИ».

E-mail: geom3d@gmail.com

Контактный телефон +79166563968.

DOI: 10.25728/avtprom.2020.06.04

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЕМ ГЕКСАПОДА НА БАЗЕ МИКРОКОНТРОЛЛЕРА STM

Э.Л. Греков, Е.С. Шелихов (ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет»)

Представлена универсальная математическая модель, описывающая одновременное поступательное движение в разные стороны и разворот робота-гексапода. Приведены методики определения координат перемещения и формирования задания на отклонение сервоприводов. Алгоритмы управления реализованы на основе микроконтроллера серии STM32F407 с использованием операционной системы реального времени FreeRTOS.

Ключевые слова: микроконтроллер, гексапод, алгоритм управления, кинематика перемещения, математическая модель.

Введение

Создание и разработка современных шагающих роботов является приоритетным направлением автоматизации во всем мире. Они используются на производствах для выполнения погрузочных, транспортных, диагностических и других видов работ. Главным преимуществом таких устройств является способность перемещаться по пересеченной местности с минимальными изменениями положения несущего корпуса относительно поверхности движения.

Проектированием и исследованием шагающих машин занимаются во всем мире: США (Massachusetts Institute of Technology, Boston Dynamics, Agility Robotics), Япония (Advanced Industrial Science and Technology), Китай (China North Industries Corporation, UBTECH), Россия (Андроидная техника, ООО Крейф, ВолГТУ и ФНПЦ «Титан-Баррикады», Кировский ВНИИ Сигнал) и др. [1-5].

Одним из таких устройств является шестиногий робот — гексапод. Постоянное наличие нескольких точек опоры при движении определяет его главную особенность — устойчивость, которая при условии повышенной проходимости делает их эффективными средствами транспортировки больших грузов. Несмотря на недостатки, такие как масса и скорость передвижения, они применяются в промышленности и их совершенствование в области кинематики и автоматизации актуальны и востребованы [6-7].

В данной работе представлен вариант алгоритмизации известной волновой походки шестиногого робота под названием «трешки», когда ноги распределены на две поочередно перемещающихся группы [8]. Новизна заключается в применении возможностей операционной системы реального времени FreeRTOS [9] разделять вычислительные ресурсы, реализующие управление механизмом в целом и решение за-

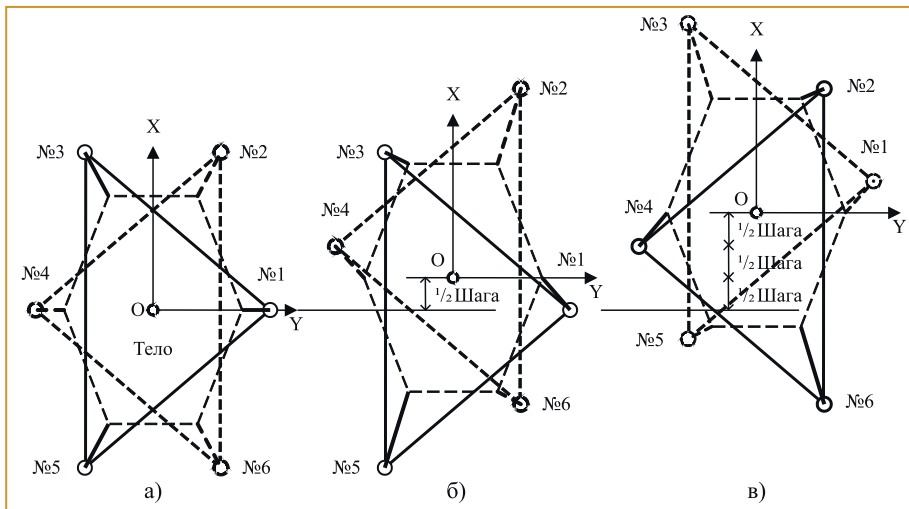


Рис. 1. Схема передвижения

дач формирования заданий сервоприводам. Данное разделение упрощает построение управляющих программ, а также позволяет построить базовую программно-аппаратную платформу для дальнейших исследований.

Оригинальность приведенного алгоритма формирования походки заключается в автоматическом чередовании опорных треугольников по тому, какой из них находится впереди тела по ходу движения. Приведенное математическое обеспечение позволяет осуществить одновременное движение робота по обеим осям с одновременным поворотом его тела.

Задачи автоматизированного управления перемещением робота-гексапода

Для реализации автоматизированного управления гексаподом необходимо учитывать устройство кинематической схемы и выбранный алгоритм передвижения.

Каждая конечность рассматриваемого робота приводится в движение группой из трех сервоприводов и имеет соответствующее количество степеней свободы (поворот вокруг точки крепления к телу, перемещение места касания земли в горизонтальной и вертикальной плоскостях) [8-10].

Наиболее распространенной является схема передвижения группами по три ноги – две с одного бока, одна - с другого, как показано на рис. 1.

Позиция (а) является исходной, когда робот опирается на все шесть конечностей. Опорным треугольником будет являться нога №1, №3 и №5. Тогда перемещение вперед осуществляется путем перестановки треугольника ног №2, №4 и №6 вперед относительно тела (позиция б). Опорный треугольник при этом остается неподвижным относительно пола, но перемещается назад относительно тела на половину шага. Поступательное движение робота осуществляется путем чередования позиций б) и в), то есть периодического перемещения треугольников ног относительно тела.

Программное обеспечение системы управления гексаподом реализовано на основе микроконтроллера серии STM32F4 и построено с использованием операционной системы реального времени (RTOS) FreeRTOS. Задачами автоматизированной системы выделим:

- сканирование органов управления (по аналоговым и цифровым каналам);
- определение координат опорного и движущегося треугольников;
- решение дифференциальных уравнений движения точек концов ног и формирования заданий на углы отклонения сервоприводов.

Для решения поставленных задач необходимо разработать математическую модель, которая позволит описать необходимые смещения и отклонения, а также составить универсальные алгоритмы для разработки соответствующего программного обеспечения.

Разработка математической модели перемещения робота-гексапода

Для упрощения формирования функций управления рассмотрим перемещение только центра треугольника. В состоянии покоя он совпадает геометрическим центром тела (точка О на рис. 1а). Расчет координат точек касания осуществляется относительно смещения центра треугольника, как показано на рис. 2.

Центр треугольника смещается на величины $\Delta X = X_{On} - X_{On-1}$ вдоль тела (рис. 2а) для перемещений гексапода вперед/назад и на $\Delta Y = Y_{On} - Y_{On-1}$ поперек тела (рисунок 2б) для перемещений вбок. Также треугольник ног может вращаться относительно центра на величину $\Delta\beta$ (рис. 2в) при повороте. Точка О смещается по всем координатам (рис. 2г). Для нахождения координат точек касания введем обозначения соответствующих величин, как показано на рис. 3.

По рис. 3 найдены координаты точек касания 2, 4 и 6 ноги:

$$\begin{cases} X_2 = \Delta X + L_{y0} \cdot \sin \Delta\beta + H / 2 \cdot \cos \Delta\beta \\ Y_2 = \Delta Y + L_{y0} \cdot \cos \Delta\beta - H / 2 \cdot \sin \Delta\beta \\ X_4 = \Delta X - (W - L_{y0}) \cdot \sin \Delta\beta \\ Y_4 = \Delta Y - (W - L_{y0}) \cdot \cos \Delta\beta \\ X_6 = \Delta X + L_{y0} \cdot \sin \Delta\beta - H / 2 \cdot \cos \Delta\beta \\ Y_6 = \Delta Y + L_{y0} \cdot \cos \Delta\beta + H / 2 \cdot \sin \Delta\beta \end{cases}, \quad (1)$$

где L_{y0} – смещение центра треугольника ног относительно основания по оси Y; H – длина основания треугольника ног вдоль оси X; W – ширина треугольника вдоль оси Y.

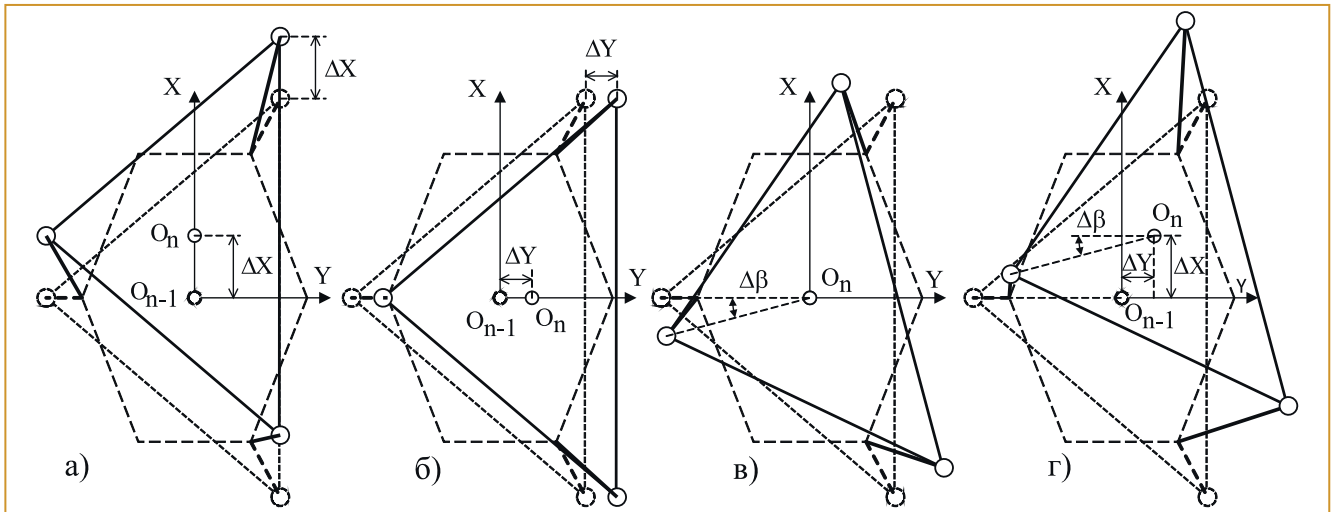


Рис. 2. Смещение треугольника ног относительно тела

Аналогично рассчитывается координаты точек касания 1, 3 и 5 ног:

$$\begin{cases} X_3 = \Delta X - L_{y0} \cdot \sin \Delta\beta + H / 2 \cdot \cos \Delta\beta \\ Y_3 = \Delta Y - L_{y0} \cdot \cos \Delta\beta - H / 2 \cdot \sin \Delta\beta \\ X_1 = \Delta X + (W - L_{y0}) \cdot \sin \Delta\beta \\ Y_1 = \Delta Y + (W - L_{y0}) \cdot \cos \Delta\beta \\ X_5 = \Delta X - L_{y0} \cdot \sin \Delta\beta - H / 2 \cdot \cos \Delta\beta \\ Y_5 = \Delta Y - L_{y0} \cdot \cos \Delta\beta + H / 2 \cdot \sin \Delta\beta \end{cases} \quad (2)$$

Координаты в осях, связанные с телом гексапода, пересчитываются в оси, связанные с осью вращения каждой ноги в точке соединения с телом. Расчет углов поворота сервоприводов производится на основе законов тригонометрии.

Программное обеспечение системы управления

Программное обеспечение системы управления роботом-гексаподом разделено на две задачи, выполняемые параллельно с использованием инструментов операционной системы:

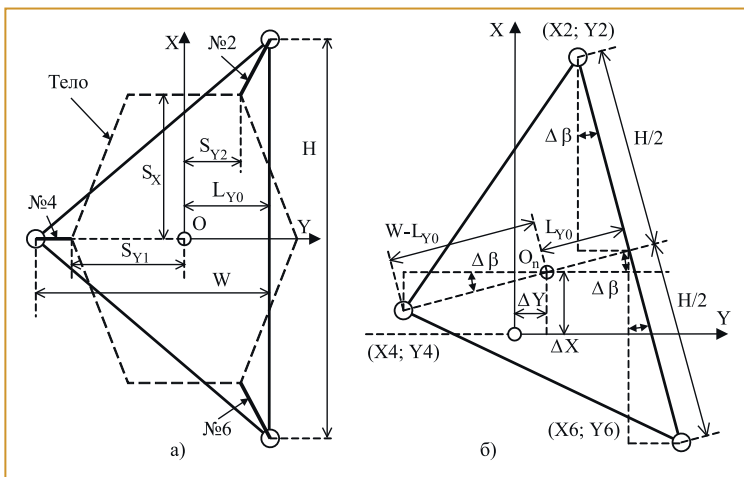


Рис. 3. К расчету координат точек касания ног

— первая задача предназначена для определения направления движения и координат точек касания ног опорного и движущегося треугольников;

— вторая — для решения дифференциальных уравнений движения во времени этих точек и управления сервоприводами ног.

Синхронизация между задачами обеспечивается семафором NewLegsMove и глобальной переменной Moving. Блок-схема работы программы для выполнения первой задачи приведена на рисунке 4.

При запуске системы происходит инициализация портов-вывода и периферийных устройств микроконтроллера (1 на рисунке 4). Реализуется ожидание новых задающих сигналов (2 на рисунке 4), при условии отсутствия движения ног (глобальная переменная Moving, 3 на рисунке 4) рассчитываются координаты в осях, связанных с телом, точек касания треугольников на один шаг вперед и назад (структуры Δ_{next}^{right+} и Δ_{next}^{right-} согласно формулам (1) и (2). Для упрощения расчет осуществляется на правую сторону.

Далее определяется пространственное расположение между собой треугольников. Для этого вычисляется суммарное расстояние между точками касания треугольника Δ_{next}^{right+} и сохраненных значений на предыдущем шаге правого Δ_{curr}^{right} и зеркального левого $\bar{\Delta}_{curr}^{left}$ (4 на рис. 4):

$$\begin{cases} L_1 = d(\Delta_{next}^{right+}; \Delta_{curr}^{right}) \\ L_2 = d(\Delta_{next}^{right+}; \bar{\Delta}_{curr}^{left}) \end{cases} \quad (3)$$

Так как опорный треугольник в конце цикла шагания будет находиться на половину шага позади тела (рис. 1), то какой из треугольников является опорным для следующего шага определяется по следующему принципу (4 - 7 на рис. 4):

— если расстояние $L_1 > L_2$, то правый треугольник на текущем шаге находится позади тела (то есть является опорным), следовательно для следующего шага опорным будет уже левый:

$$\begin{cases} \Delta_{curr}^{right} = \Delta_{next}^{right+} \\ \bar{\Delta}_{curr}^{left} = \Delta_{next}^{right-} \end{cases}; \quad (4)$$

— если расстояние $L_1 < L_2$, то левый треугольник на текущем шаге находится позади тела (то есть являлся опорным), следовательно для следующего шага опорным будет уже правый:

$$\begin{cases} \Delta_{curr}^{right} = \Delta_{next}^{right-} \\ \bar{\Delta}_{curr}^{left} = \Delta_{next}^{right+} \end{cases}. \quad (5)$$

Это правило обеспечивает автоматическое чередование опорных треугольников и движение гексапода в нужном направлении.

Для расчета действительных координат точек касания треугольник $\bar{\Delta}_{curr}^{left}$ зеркально отображается по продольной оси тела (поз. 8 на рис. 4). Далее освобождается семафор NewLegsMove для запуска второй задачи по перемещению ног гексапода (поз. 1 на рис. 5).

Для блокировки расчета нового шага выставляется глобальная переменная Moving. Рассчитываются приращения по каждой координате для каждой точки касания ног (поз. 2 на рис. 5):

$$\begin{cases} \Delta X_i = (X_i^{new} - X_i^{last}) \cdot \Delta t / T_{step}; \\ \Delta Y_i = (Y_i^{new} - Y_i^{last}) \cdot \Delta t / T_{step}; \\ \Delta Z_i = (Z_i^{new} - Z_i^{last}) \cdot \Delta t / T_{step}; \\ \Delta \phi_i = \pi \cdot \Delta t / T_{step}. \end{cases} \quad (6)$$

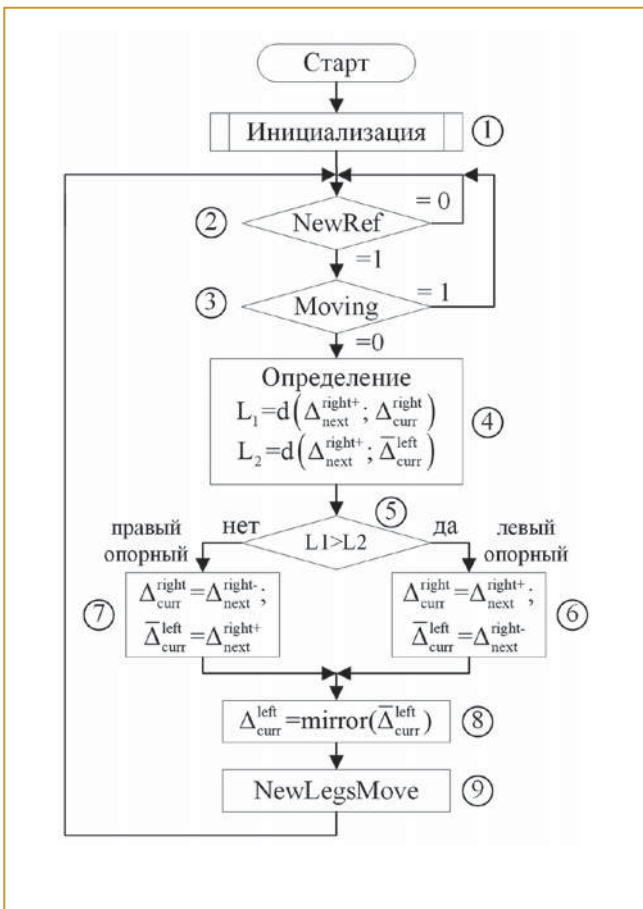


Рис. 4. Блок-схема выполнения первой задачи

где $i=1..6$ – индекс ноги; $X_i^{new}, Y_i^{new}, Z_i^{new}$ – новые координаты точек касания ног, определенные в первой задаче; $X_i^{last}, Y_i^{last}, Z_i^{last}$ – текущие координаты точек касания ног в конце цикла шагания; $\Delta \phi_i$ – приращение вспомогательного угла для расчета поднятия ног перемещаемого треугольника (угол за цикл изменяется на 180 градусов, поэтому концы ног описывают в пространстве половину эллипса); Δt – фиксированный шаг по времени выполнения цикла расчета задачи 2; T_{step} – время выполнения одного шага гексапода. При регулировании этого значения изменяется скорость движения тела.

Последние координаты на предыдущем цикле шагания переопределяются как текущие (3 на рис. 5):

$$X_i = X_i^{last}; Y_i = Y_i^{last}; Z_i = Z_i^{last}; \phi_i = 0. \quad (7)$$

На каждом шаге цикла дифференциальные уравнения движения точек касания численно рассчитываются методом Эйлера 1-го порядка (4 на рис. 5):

$$\begin{cases} X_{i,n} = X_{i,n-1} + \Delta X_i \\ Y_{i,n} = Y_{i,n-1} + \Delta Y_i \\ Z_{i,n} = Z_{i,n-1} + \Delta Z_i \\ j_{i,n} = j_{i,n-1} + \Delta j_i \end{cases} \quad (8)$$

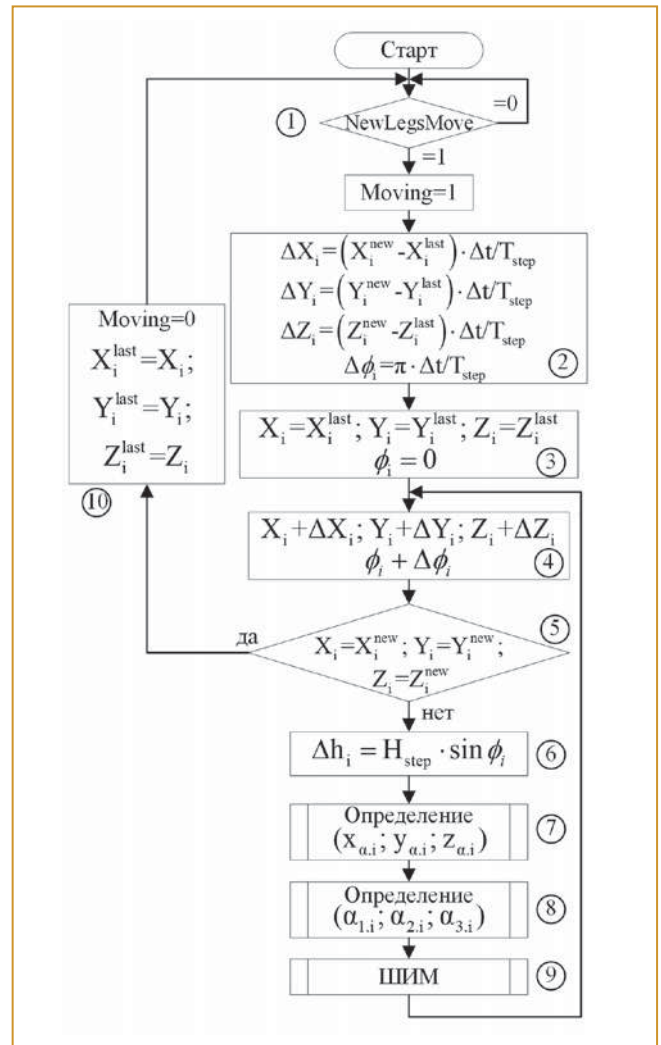


Рис. 5. Блок-схема выполнения второй задачи

Определяются координаты точек касания в осях, привязанных к ногам (7 на рис. 5), и углы поворота сервоприводов (8 на рис. 5). Для перемещаемого треугольника к координатам Z добавляется значение высоты поднятия:

$$\Delta h_i = H_{\text{step}} \cdot \sin \phi_i, \quad (9)$$

где H_{step} — максимальная высота поднятия ноги.

Полученные значения используются для изменения коэффициента заполнения ШИМ периферийных модулей. Окончание расчета цикла передвижения определяется по равенству текущих координат заданным (5 на рис. 5). При этом сохраняются текущие значения в качестве последних для расчета приращений на следующем цикле.

Заключение

В данной работе решены такие задачи автоматизированного управления перемещением гексапода на базе микроконтроллера STM, как сканирование органов управления, определение координат опорного и движущегося треугольников, решение дифференциальных уравнений движения точек концов ног и формирования заданий на углы отклонения сервоприводов.

Для решения поставленных задач была разработана и представлена математическую модель, позволяющая описывать изменения координат точек касания ног робота и углов поворота сервоприводов при движении, а также алгоритмы для реализации необходимого программного обеспечения для функционирования системы.

Список литературы

1. Belter, D. A biologically inspired approach to feasible gait learning for a hexapod robot/D. Belter, P. Skrzypczynsky// International Journal of Applied Mathematics and Computer Science — Computational Intelligence in Modern Control Systems, vol. 20, issue 1, Number-March 2010, pp. 69-84.
2. Roy, S.S. Estimation of optimal feet forces and joint torques for on-line control of six-legged robot / S.S. Roy, A.K. Singh, D.K. Pratihari // Robotics and Computer-Integrated

Если мы хотим идти вперед, то одна нога должна оставаться на месте, в то время как другая делает следующий шаг. Это - первый закон всякого прогресса, одинаково применимый как к целым народам, так и к отдельным людям.

Йозеф фон Этвэш

3. Manufacturing, vol. 27 Issue 5, October, 2011, pp. 910-917.
4. Vidoni, R. Efficient force distribution and leg posture for a bio-inspired spider robot/R. Vidoni, A. Gasparetto//Robotics and Autonomous Systems, vol. 59, issue 2, February, 2011, pp. 142-150.
5. Yang Jung-Min. Omni directional walking of legged robots with a failed leg / Yang Jung-Min // Mathematical and Computer Modeling: An International Journal, vol. 47, issue 11-12, June, 2008, pp. 1372-1388.
6. Гуляев Н.А. Автономный шагающий робот повышенной проходимости / Н.А. Гуляев, Е.В. Казанцева, В.Ю. Швецов, А.И. Сидоренко, Е.В. Сыпин // Южно-сибирский научный вестник. 2016. №4(20). С. 185 - 189.
7. Игнатъев М.Б. Шагающие роботы — проблемы и перспективы / М.Б. Игнатъев, С.В. Владимиров, В.И. Сапожников, М.Б. Сергеев, Д.В. Кузьмин, В.Н. Соловьев, А.В. Рыжов, Я.А. Липинский // Инноватика и экспертиза, 2016. С. 128-137.
8. Брискин Е.С. Динамика и управление движением шагающих машин с цикловыми двигателями: монография/Е.С. Брискин, В.В. Жога, А.В. Малолетов, В.В. Чернышов. — Машиностроение, 2009. — 189 с.
9. Лапшин В.В. Механика и управление движением шагающих машин / В.В. Лапшин. — М.: Изд-во МГУ им. Н.Э. Баумана, 2012. — 199 с.
10. Richard Barry. Mastering the FreeRTOS™ Real Time Kernel: A Hands-On Tutorial Guide, 2020. — 399 с.
11. Павловский В.Е. Модели и алгоритм управления движением малого шестиногого робота / В.Е. Павловский, А.В. Панченко // Мехатроника, автоматизация, управление. 2012. № 11. С. 23 - 28.

Греков Эдуард Леонидович — канд. техн. наук, заведующий кафедрой,

Шелихов Евгений Сергеевич — канд. техн. наук, доцент кафедры автоматизированного электропривода, электромеханики и электротехники ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет».

E-mail: aeptpm@mail.ru shelevgen@mail.ru

VR Concept делает виртуальную реальность более реальной

Российский разработчик программного обеспечения для коллективной работы с CAD и BIM данными в виртуальной реальности VR Concept выпустил обновление, которое расширяет возможности взаимодействия с виртуальными объектами.

Теперь взаимодействие с виртуальными объектами стало еще реалистичнее: пользователи могут ронять объекты, класть их друг на друга, катать по поверхности и даже вешать на крючки. Для этого пользователю достаточно выбрать новое свойство для конкретных объектов. Новые возможности

взаимодействия с виртуальными объектами в VR Concept повышают эффективность проверки эргономики будущего проекта, делая этот процесс более наглядным, что важно, например, при тестировании проходимости объектов через дверные проемы в помещениях или при оценке более оптимальной компоновки, облегчающей монтаж и обслуживание.

Кроме того, в новой версии VR Concept появились новые варианты замеров. Теперь помимо расстояния между двумя точками, можно быстро измерить диаметр окружности, а также ширину и высоту по перпендикуляру.

[Http://www.vrconcept.net](http://www.vrconcept.net)