

А. Ю. М а л ы х и н

ТИПОВЫЕ ДВИЖЕНИЯ МНОГОЗВЕННОГО ШАГАЮЩЕГО РОБОТА ДЛЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ПО ПРОИЗВОЛЬНО ОРИЕНТИРОВАННЫМ ПЛОСКОСТЯМ

Рассмотрены вопросы определения и формализации типовых движений многозвенового шагающего робота. Определены требования для типовых движений. Получены аналитические выражения законов изменения параметров и закона движения.

E-mail: mo_lex@mail.ru

Ключевые слова: многозвеновый шагающий робот, типовые движения, произвольно ориентированные плоскости, вакуумное захватное устройство, кинематическая схема, плоскость фиксации.

В Научно-учебном центре «Робототехника» МГТУ им. Н.Э. Баумана был разработан многозвеновый шагающий робот для перемещения по произвольно ориентированным плоскостям. Такой робот может использоваться для технической диагностики, доставки технологического оборудования в труднодоступные и опасные для человека места, в аварийных ситуациях и т. д.

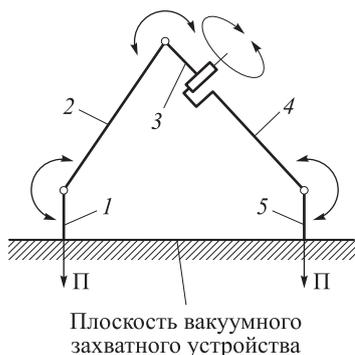


Рис. 1. Кинематическая схема пятизвенового шагающего робота

Робот представляет собой пятизвеновый механизм, состоящий из одинаковых звеньев, собранных в соответствии с кинематической схемой, представленной на рис. 1, где цифрами от 1 до 5 показана прямая последовательность звеньев, когда звено 1 зафиксировано. Для надежного удержания на рабочей поверхности в состав робота входят устройства вакуумной фиксации, расположенные на конце кинематической схемы. В информационно-сенсорную систему робота входят концевые датчики и абсолютные датчики углового положения во вращательных шарнирах, датчики ближней локации (для измерения расстояний от 10 до 200 мм), а также датчики давления и контроля уровня вакуума.

В отличие от конструкций, ранее предложенных в Институте проблем механики РАН [1], робот, разработанный в НУЦ «Робототехника», обладает определенными преимуществами: его конструкция имеет минимальное количество звеньев, необходимое для движения по плоскости, преодоления препятствий и перехода с одной поверхности на другую, а кроме того, оптимальную массу, что позволяет разместить на роботе дополнительное технологическое оборудование. Первоначально управление роботом осуществлялось в ручном режиме. Однако управление движением многозвенного шагающего робота в ручном режиме требует постоянного визуального контроля со стороны оператора, что трудно осуществить в реальных условиях эксплуатации. Поэтому и возникла задача обеспечения автоматического движения робота при задании оператором цели, способа и параметров движения.

Для автоматического движения многозвенного шагающего робота помимо датчиков сенсорной системы необходимо определить и формализовать типовые движения робота, комбинируя которые можно обеспечить перемещение робота в заданном направлении с заданной скоростью, самостоятельное преодоление препятствий и его адаптацию к особенностям опорной поверхности.

Типовые движения. Для пятизвенной кинематической схемы шагающего робота можно выделить четыре типовых движения: приставной шаг, шаг «акробатом», поворот на угол и переход с плоскости на плоскость.

Приставной шаг – основное типовое движение. Положение кинематической схемы робота при выполнении приставного шага приведено на рис. 2.

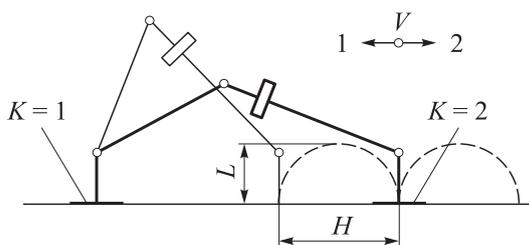


Рис. 2. Схема приставного шага

Приставной шаг характеризуется следующими параметрами: H – высота шага; L – длина шага; V – направление движения; K – конфигурация опор. Последний параметр указывает, какое вакуумное захватное устройство (ВЗУ) в данный момент является опорой и принимает целочисленные значения, соответствующие номеру опоры. Выбор длины и высоты шага зависит от взаимного расположения звеньев робота и направления движения.

Для определения закона движения необходимо сформулировать ряд требований. Во-первых, при движении приставным шагом нужно сохранять параллельность между перемещаемым ВЗУ и плоскостью фиксации. Для этого надо постоянно определять расстояние до плоскости фиксации с помощью датчиков ближней локации, а также использовать алгоритмы адаптации к характеру поверхности и идентификации препятствий.

Во-вторых, при задании оператором цели движения, т. е. конечной точки траектории робота, необходимо планировать движение таким образом, чтобы в конечной точке траектории скорость робота была равна нулю. Заметим, что при управлении по положению это требование накладывает определенные ограничения на закон движения.

Наконец, в-третьих, при подходе к конечной точке траектории направление движения должно быть перпендикулярно плоскости фиксации, для того чтобы исключить скольжение уплотнения ВЗУ по плоскости фиксации, в результате чего оно может быть повреждено.

Учитывая перечисленные требования, целесообразно математически описать закон движения при приставном шаге с использованием тригонометрических функций. При этом закон изменения расстояния от плоскости фиксации до ВЗУ (рис. 3, а) может быть выражен формулой

$$h(t) = \frac{H}{2}(1 - \cos(4t)), \quad (1)$$

где t – текущее время.

Тогда закон изменения расстояния между ВЗУ (рис. 3, б) примет вид

$$l(t) = \begin{cases} \frac{L}{2} \left(\cos\left(\frac{5t}{2} + \frac{7\pi}{8}\right) + 1 \right), & \frac{\pi}{20} \leq t \leq \frac{9\pi}{20}; \\ 0, & t < \frac{\pi}{20}; \\ L, & t > \frac{9\pi}{20}. \end{cases} \quad (2)$$

Разбиение функции $l(t)$ на интервалы обусловлено тем, что сначала происходит подъем ВЗУ, а уже затем синхронное изменение высоты и длины. Максимальная длина шага достигается раньше, чем

ВЗУ опустится на плоскость фиксации, в результате чего и обеспечивается его перпендикулярный подход к плоскости фиксации.

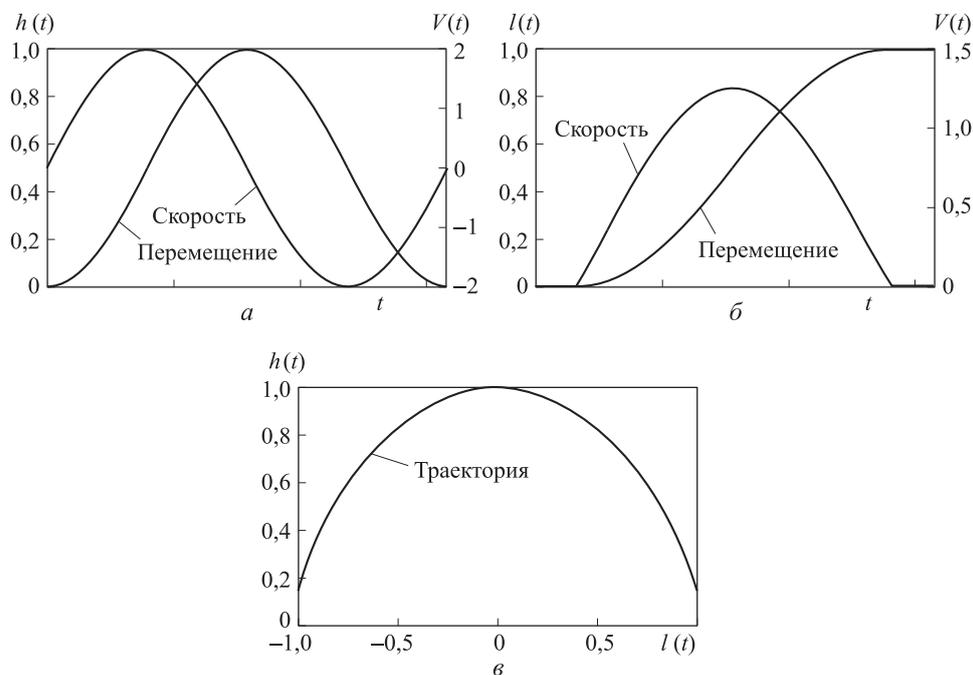


Рис. 3. Исследование приставного шага:

a – закон изменения высоты шага; b – закон изменения длины шага; v – закон движения

Коэффициенты уравнений (1), (2) подобраны таким образом, что увеличение расстояния между ВЗУ происходит за 80 % времени выполнения шага, а запаздывание составляет 10 % этого времени. Траектория движения приведена на рис. 3, v .

Шаг «акробатом». Данный вид шага является наиболее быстрым способом передвижения по плоскости. Схема его выполнения приведена на рис. 4.

В отличие от приставного шага при движении шагом «акробатом» ориентация ВЗУ должна изменяться в процессе его движения так, чтобы к концу движения плоскость ВЗУ стала параллельной плоскости фиксации. Закон изменения ориентации ВЗУ можно описать следующим образом:

$$x_{4x}(t) = u_{4x}(t) = -\cos(4t),$$

где x_{4x} и u_{4x} – ориентация соответствующего ВЗУ.

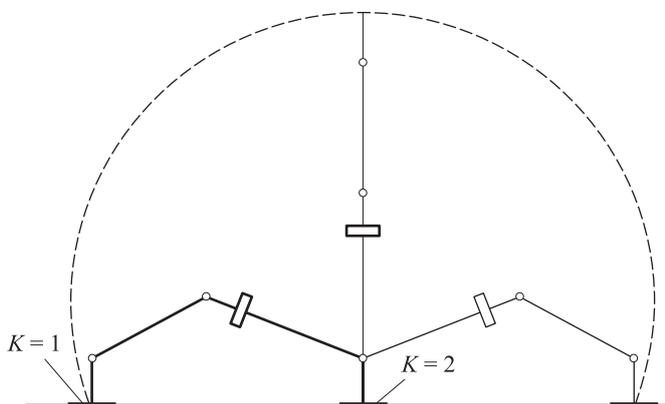


Рис. 4. Схема выполнения шага «акробатом»

Следует отметить, что длина шага равна расстоянию между ВЗУ до начала выполнения шага. Высота шага равна сумме длин всех звеньев робота. Если высота будет больше этого значения, обратная позиционная задача (задача об определении необходимого перемещения в степенях подвижности конструкции по заданному положению конца кинематической схемы) не будет иметь решения. Если высота будет меньше, возможно несколько решений обратной позиционной задачи, что приведет к необходимости выбора подходящего решения.

Как и в случае с приставным шагом, закон изменения расстояния от плоскости фиксации до ВЗУ будет определяться следующей формулой (рис. 5, а):

$$h(t) = \frac{H}{2}(1 - \cos(4t)) ,$$

где H – высота шага, которая фиксирована и равна сумме длин всех звеньев робота.

Закон изменения расстояния $l(t)$ между ВЗУ определяется по приводимой ниже формуле (рис. 5, б):

$$l(t) = \begin{cases} L \cos\left(\frac{5t}{2} + \frac{7\pi}{8}\right), & \frac{\pi}{20} \leq t \leq \frac{9\pi}{20}, \\ -L, & t < \frac{\pi}{20}, \\ L, & t > \frac{9\pi}{20}, \end{cases}$$

где L – фиксированная длина шага, равная расстоянию между ВЗУ перед началом шага.

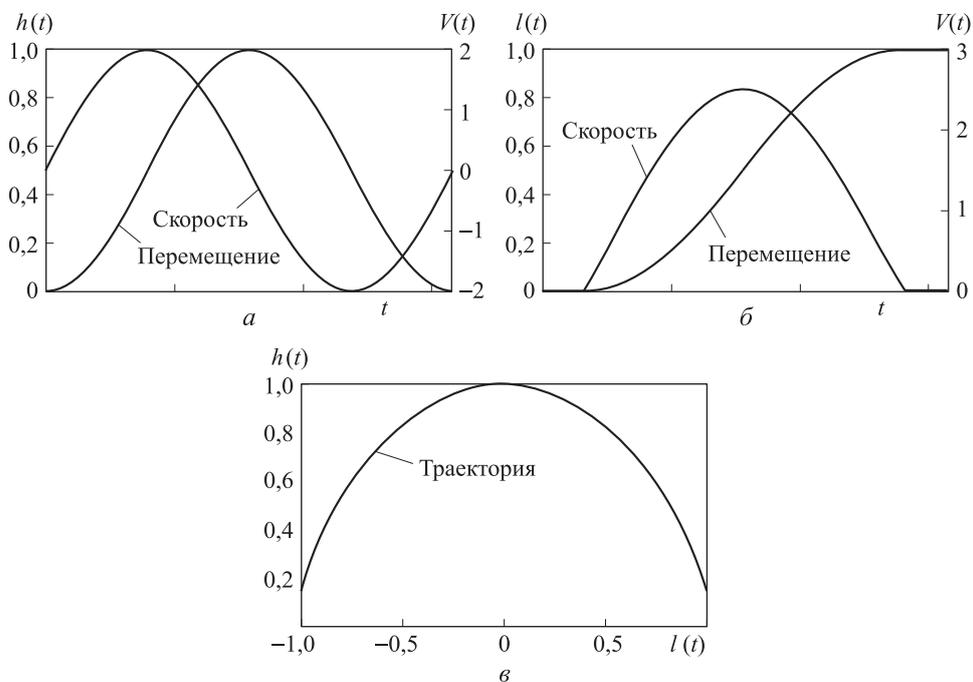


Рис. 5. Исследование шага «акробатом»:

a – закон изменения высоты шага; *б* – закон изменения длины шага; *в* – закон движения

Траектория движения приведена на рис. 5, *в*.

Поворот. Поворот робота на заданный угол является важным элементом движения, поскольку без возможности изменения движения робот будет существенно ограничен в своих действиях, в частности, он не сможет обойти препятствия, а также подойти к плоскости перехода с одной поверхности на другую под нужным углом. Схема поворота на угол α представлена на рис. 6.

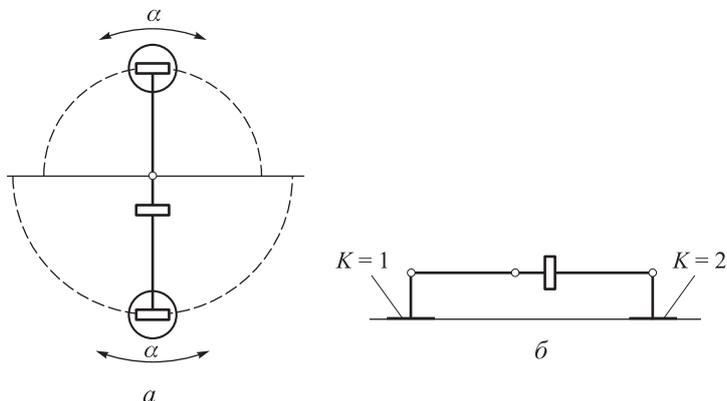


Рис. 6. Схема поворота робота на заданный угол

Поворот на угол совершается в несколько этапов:

- 1) с использованием приставного шага достигается конфигурация, показанная на рис. 6, б;
- 2) в зависимости от значения параметра K осуществляется подъем свободного ВЗУ на угол 15° с тем, чтобы его не повредить во время поворота;
- 3) обеспечивается поворот на заданный угол α (рис. 6, а);
- 4) ВЗУ опускается на плоскость и фиксируется;
- 5) цикл повторяется со второго этапа для другого значения K .

Способы перехода с плоскости на плоскость. Самым сложным типовым движением шагающего робота является переход с одной плоскости на другую. Возможны два варианта перехода с плоскости на плоскость: с использованием приставного шага (рис. 7, а) и с помощью шага «акробатом» (рис. 7, б).

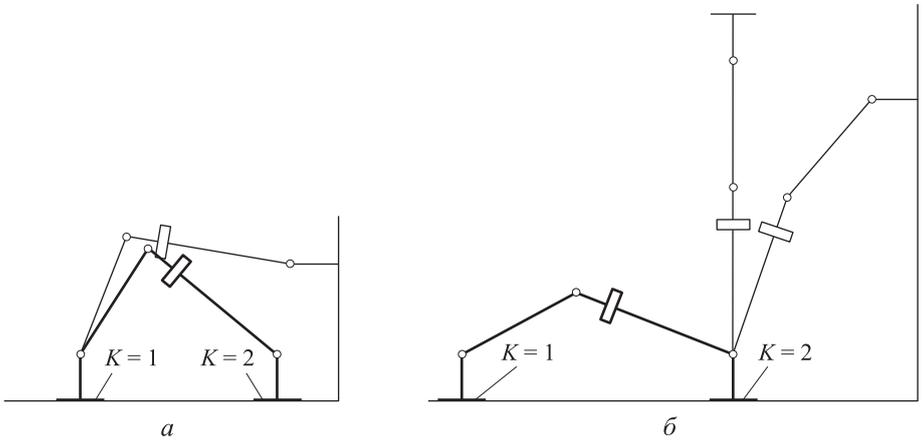


Рис. 7. Схема перехода с плоскости на плоскость

В первом случае ближайшее к плоскости перехода ВЗУ поднимается на высоту H , высота изменяется по следующему закону (рис. 8, а):

$$h(t) = \begin{cases} \frac{H}{2}(1 - \cos(4t)), & t \leq \frac{\pi}{4}, \\ H, & t > \frac{\pi}{4}. \end{cases}$$

При этом его ориентация изменяется соответственно формуле (рис. 8, б):

$$x_{4x}(t) = u_{4x}(t) = \begin{cases} -\cos(2t), & t \leq \frac{\pi}{4}, \\ 0, & t > \frac{\pi}{4}. \end{cases}$$

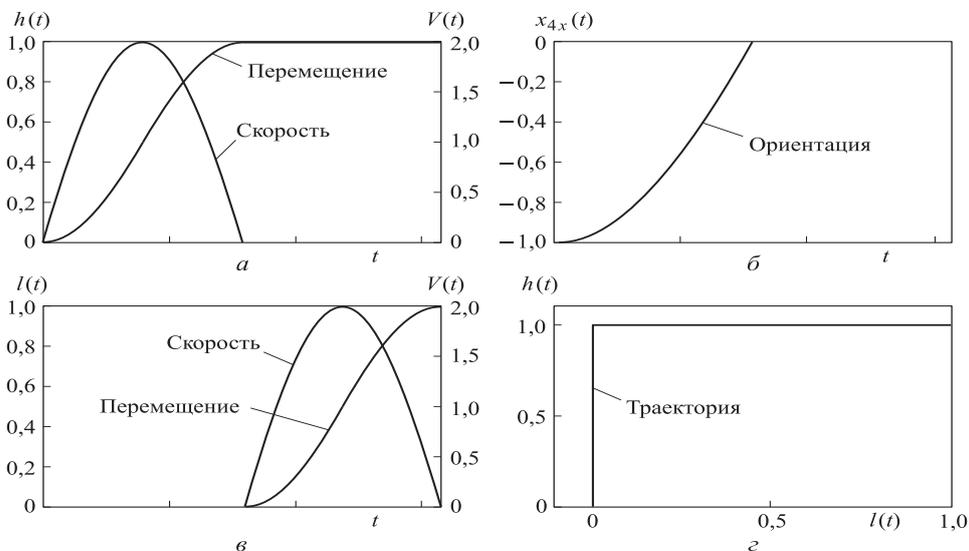


Рис. 8. Исследование перехода с плоскости на плоскость с помощью приставного шага:

a – закон изменения высоты шага; *б* – закон изменения ориентации опоры; *в* – закон изменения длины шага; *з* – закон движения

Затем движение продолжается параллельно исходной плоскости до плоскости перехода на расстояние L . Изменение расстояния (рис. 8, в) описывается формулой

$$l(t) = \begin{cases} \frac{L}{2}(1 + \cos(4t)), & t \leq \frac{\pi}{4}, \\ 0, & t > \frac{\pi}{4}. \end{cases}$$

Соответствующая траектория движения показана на рис. 8, з.

При использовании шага «акробатом» дальше от плоскости перехода ВЗУ сначала поднимается в положение, когда все звенья выстроены в одну линию, а затем опускается в положение, определяемое следующими параметрами: H_1 – высота от исходной плоскости до вакуумного захватного устройства и L_1 – расстояние между ВЗУ. В процессе этого движения ориентация ВЗУ изменяется по следующему закону (рис. 9, в):

$$x_{4x}(t) = u_{4x}(t) = \begin{cases} -\cos(3t), & t \leq \frac{\pi}{2}, \\ 0, & t > \frac{\pi}{2}. \end{cases}$$

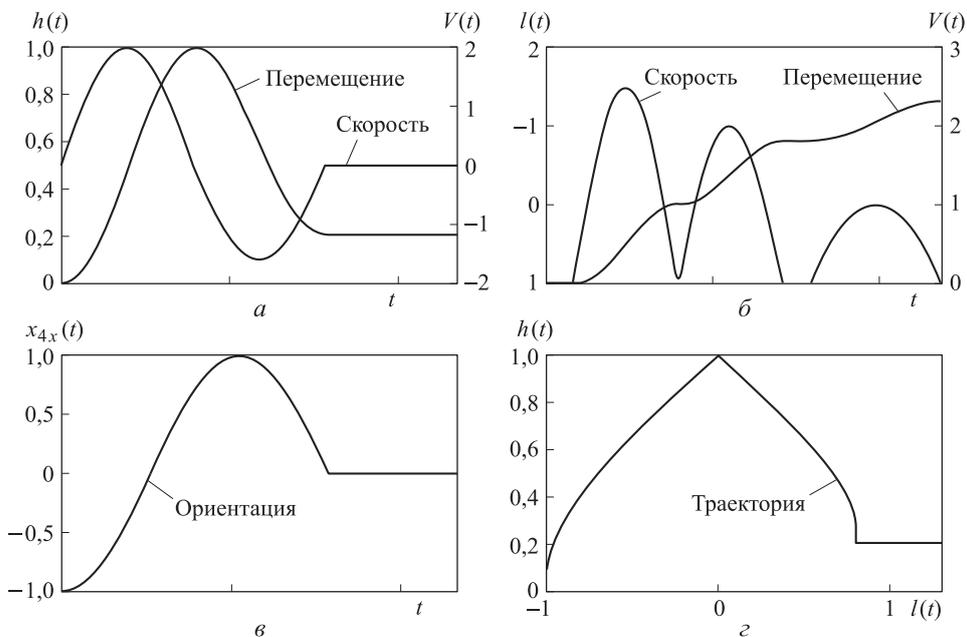


Рис. 9. Исследование перехода с плоскости на плоскость с помощью шага «акробатом»:

a – закон изменения высоты шага; *б* – закон изменения длины шага; *в* – закон изменения ориентации опоры; *г* – закон движения

После достижения заданной точки, как и в первом случае, движение продолжается параллельно исходной плоскости до плоскости перехода на расстояние L_2 . Закон изменения переменных $h(t)$ (рис. 9, *a*) и $l(t)$ (рис. 9, *б*) при этом может быть описан следующим образом:

$$h(t) = \begin{cases} \frac{H}{2}(1 + \cos(4t)), & t \leq \frac{\pi}{4}, \\ \frac{H}{2}(1 + \cos(4t)) + H - H_1, & \frac{\pi}{4} < t \leq \frac{\pi}{2}, \\ H - H_1, & t > \frac{\pi}{2}; \end{cases}$$

$$l(t) = \begin{cases} -\frac{L}{2}\left(1 + \cos\left(5t - \frac{\pi}{4}\right)\right), & \frac{\pi}{20} \leq t \leq \frac{\pi}{4}, \\ \frac{L_1}{2}\left(1 + \cos\left(5t - \frac{\pi}{4}\right)\right) + H - H_1, & \frac{\pi}{4} < t \leq \frac{9\pi}{20}, \\ -L, & t < \frac{\pi}{20}, \\ L_1, & \frac{9\pi}{20} < t < \frac{\pi}{2}, \\ \frac{L_1}{2}(1 - \cos(4t)) + L_1, & t > \frac{\pi}{2}. \end{cases}$$

Траектория движения показана на рис. 9, з.

Следует отметить, что ранее переход с плоскости на плоскость был рассмотрен в идеальном случае, когда робот подходит строго перпендикулярно к плоскости перехода, а базовая плоскость и плоскость перехода расположены под углом 90° относительно друг друга. В реальных условиях всегда имеются отклонения, поэтому движение корректируется по датчикам локации, расположенным на роботе.

Рассмотренные типовые движения шагающего робота и их математическое описание позволили сформировать алгоритмы управления, с помощью которых можно совершать сложные движения в автономном режиме, что дает возможность не только существенно облегчить работу оператора, но и выполнить операции, которые были бы невозможны в ручном режиме, в частности при уходе робота из зоны прямого наблюдения оператором.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Градецкий В. Г., Вешников В. Б., Калиниченко С. В., Кравчук Л. Н. Управляемое движение мобильных роботов по произвольно ориентированным в пространстве поверхностям. – М.: Наука, 2001. – 359 с.
2. Градецкий В. Г., Калиниченко С. В. и др. Методы движения и системы управления мобильных роботов, перемещающихся по произвольно ориентированным в пространстве поверхностям // Экстремальная робототехника – 2003: материалы научной молодежной школы. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2003. С. 16–23.
3. Малыхин А. Ю. Моделирование движения многозвенной робототехнической системы для перемещения по произвольно ориентированным плоскостям: труды XIX Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Экстремальная робототехника». – СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2008. – С. 140–143.
4. Малыхин А. Ю. Управление позиционированием многозвеного шагающего робота // Экстремальная робототехника. Нано-, микро- и макророботы: труды Международной конференции. – СПб.: Политехника-сервис, 2009. – С. 252–254.
5. Назарова А. В., Малыхин А. Ю. Проектирование программно-аппаратной системы управления автономным роботом для перемещения по произвольно ориентированным плоскостям: труды Международной научно-технической конференции «Экстремальная робототехника». – СПб.: Политехника-сервис, 2010. – С. 112–114.

Статья поступила в редакцию 28.06.2012