

УДК

*Т. Акинфиев, М. Армада, А. Рамирес*Институт промышленной автоматике Высшего Совета научных исследований
Испании, Мадрид

teodor@iai.csic.es, armada@iai.csic.es, aramirez@iai.csic.es

Разработка колесного робота с изменяемой структурой и адаптивной системой управления*

В статье рассматривается колесный робот с изменяемой структурой и его система управления. Робот способен работать в двух режимах – режиме непрерывного движения по достаточно хорошей поверхности и в режиме прерывистого движения по мягкой поверхности или по лестнице. В этом последнем режиме колеса робота попеременно играют роль опорных ног (заблокированные колеса) и роль свободно катящихся колес. Аналитически выявлены динамические особенности робота, решены задачи анализа, синтеза и оптимального управления. Изготовлен и испытан прототип робота.

Вступление

Хорошо известно, что шагающие роботы характеризуются достаточно сложной конструкцией, чрезвычайно низкой скоростью и высокими энергозатратами [1], однако они способны преодолевать препятствия, двигаться по грунту с низким коэффициентом трения, рыхлому грунту, такому как песок, пыль и т.д. В противоположность шагающим роботам, колесные мобильные роботы имеют простую конструкцию и достаточно высокую скорость при низких энергозатратах, однако они могут двигаться только по поверхности без существенных препятствий, легко застревают в песке или на мягкой поверхности. Известно несколько попыток создания комбинированных роботов, которые сочетают некоторые достоинства шагающих машин и колесных машин в одной конструкции [2-4]. Как правило, такие роботы представляют собой шагающие машины, на концах ног которых установлены колеса. Такие конструкции могут работать как шагающие машины или как колесные машины, в зависимости от типа поверхности, по которой движется робот. К сожалению, такие машины характеризуются еще большей сложностью конструкции и системы управления, чем традиционные шагающие машины.

Цель работы.

Цель настоящей работы – создание простой конструкции робота с простой системой управления, который способен работать как традиционный колесный робот на достаточно гладких поверхностях и в то же время иметь возможность преодолевать препятствия размером больше диаметра колеса, не застревать при движении по песку или по мягкой поверхности с низким коэффициентом трения [5].

* Авторы выражают благодарность Министерству образования и науки Испании за финансовую поддержку данной работы в рамках проекта «Теория оптимальных приводов с двойными свойствами для робототехники и автоматизации».

Постановка задачи.

Рассматривается задача разработки простого и дешевого колесного робота с изменяемой структурой, предназначенного для движения как по дороге с качественным покрытием в режиме традиционного колесного робота, так и для движения по мягкой поверхности с низким коэффициентом трения. Этот же робот должен иметь возможность преодолевать препятствия размером, превышающим диаметр колеса, и двигаться вверх и вниз по лестнице. Робот, обладающий такими свойствами, может быть использован как основа для создания кресла для инвалидов, способного обеспечить инвалиду значительно большую самостоятельность. Этот же робот может быть использован как подвижная платформа для поиска мин; возможны и другие приложения разрабатываемого робота.

Конструкция робота

Схема простейшего варианта такой конструкции представлена на рис. 1. Фактически такая схема основана на модификации традиционного колесного робота (трехколесного, четырехколесного или многоколесного). Робот состоит из тела (платформы), на котором жестко закреплена одна из колесных осей (в данном случае задняя ось). Ось передних колес закреплена на подвижном элементе, который установлен на теле робота с возможностью поступательного перемещения вперед – назад.

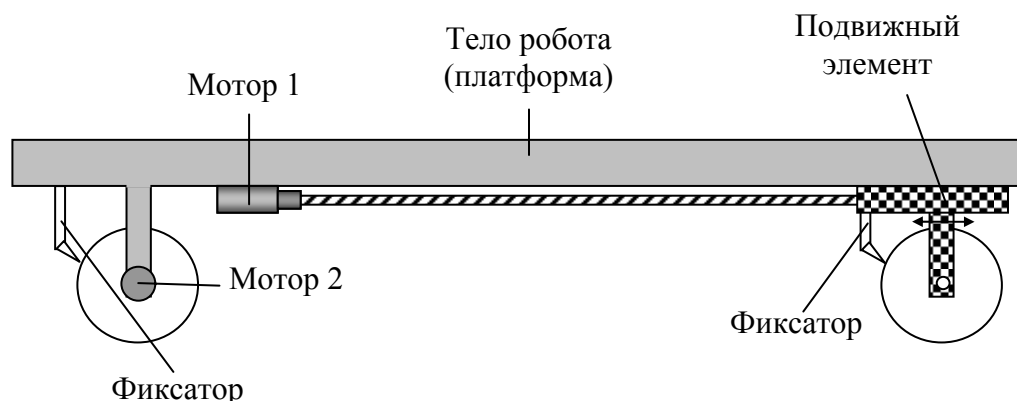


Рисунок 1 – Простейшая схема робота

Электромотор 1 закреплен на теле робота и кинематически связан с подвижным элементом. Предполагается, что эта кинематическая связь не является самотормозящейся. Робот содержит управляемый фиксатор каждого из колес. По крайней мере одно из колес робота снабжено электромотором 2.

Режимы работы робота

Робот может работать в двух принципиально разных режимах. Если поверхность, по которой движется робот, является достаточно прочной и не содержит больших препятствий, то мотор 1 выключен, фиксаторы колес выключены, а мотор 2 включен. Этот режим соответствует традиционному режиму движения колесного робота.

Второй режим используется в тех случаях, когда поверхность, по которой движется робот, является достаточно мягкой (песок) или содержит препятствия

большой высоты. В этом режиме мотор 2 отключен. Режим состоит из четырех фаз (рис. 2). На первой и второй фазе включены фиксаторы задних колес, что предотвращает их вращение, а фиксаторы передних колес выключены.

На первой фазе электромотор 1 через трансмиссию прикладывает направленную вперед силу к подвижному элементу. Под действием этой силы подвижный элемент перемещается вперед вместе с передними колесами, которые свободно катятся. Обратное усилие через мотор 1 передается на тело робота и далее на задние колеса, которые заперты фиксаторами и не могут вращаться. При этом между задними колесами и грунтом возникает сила трения, которая компенсирует обратное усилие и предотвращает движение корпуса робота.

Вторая фаза движения аналогична первой фазе, но вместо разгона подвижного элемента осуществляется его торможение (можно использовать рекуперативное торможение) и остановка.

На третьей и четвертой фазах движения фиксаторы задних колес выключены, а фиксаторы передних колес включены.

На третьей фазе электромотор 1 через трансмиссию прикладывает направленную назад силу к подвижному элементу. Под действием этой силы подвижный элемент не перемещается, так как он связан с передними колесами, которые заперты фиксаторами и не могут вращаться. При этом возникает сила трения между передними колесами и грунтом, которая и предотвращает скольжение передних колес. Сила, приложенная к мотору со стороны подвижного элемента, передается на тело робота и вызывает ускоренное движение вперед тела робота за счет свободного качения задних колес.

Четвертая фаза движения аналогична третьей фазе, но вместо разгона тела робота осуществляется его торможение (можно использовать рекуперативное торможение) и остановка.

После окончания четвертой фазы весь процесс повторяется. Таким образом, колесный мобильный робот осуществляет во втором режиме прерывистое движение в отличие от первого режима, где процесс движения был непрерывным и, естественно, более эффективным. В то же время, существенное достоинство второго режима заключается в том, что в этом режиме робот может перемещаться по песку или мягкой поверхности. Это связано с тем, что во втором режиме на колеса не подается вращающий момент от мотора, который обычно вызывает самокапывание колес и застревание робота. Отметим дополнительно, что во втором режиме благодаря специальной конструкции колес робот может преодолевать вертикальные препятствия, высота которых больше диаметра колеса.

Фактически можно сказать, что во втором режиме робот работает как комбинированный колесно-шагающий робот, у которого попеременно заперты фиксаторами передние или задние колеса играют роль ног, опирающихся на поверхность, а колеса, освобожденные от фиксаторов, осуществляют свободное качение.

Динамические свойства робота

Так как первый режим работы является традиционным, то в настоящей работе он не рассматривается.

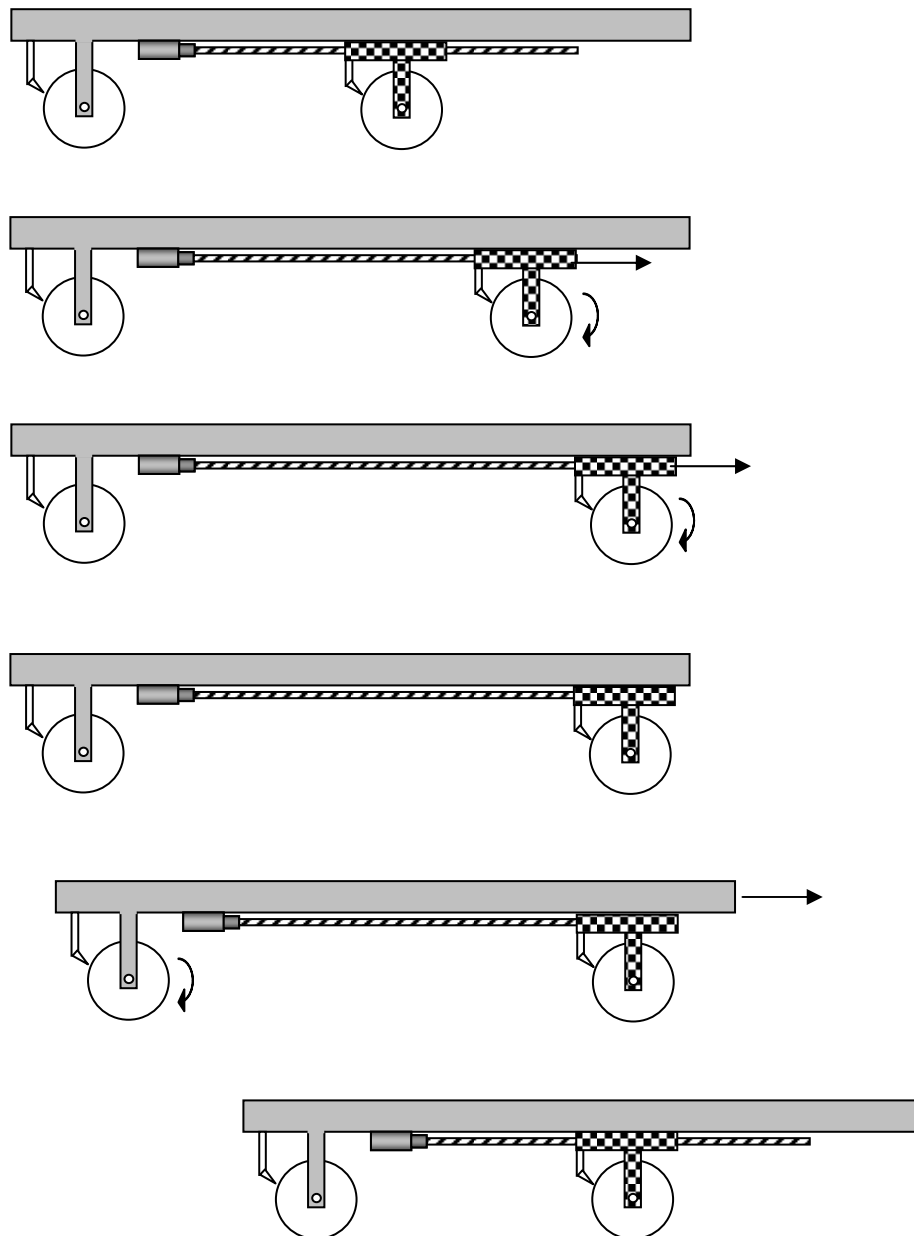


Рисунок 2 – Фазы движения робота

Аналитически решена проблема динамического анализа для каждой фазы второго режима работы робота. Показано, что усилие, прикладываемое к подвижному элементу со стороны привода, должно удовлетворять определенным ограничениям, различным на различных фазах движения. Так, на первой фазе движения это усилие имеет как верхний, так и нижний предел. Если это усилие

выше верхнего предельно допустимого значения, то возникает проскальзывание запертых фиксаторами задних колес по опорной поверхности. Если же это усилие ниже нижнего предельно допустимого значения, то этого усилия оказывается недостаточно для перемещения подвижного элемента из-за силы трения между ним и платформой (рис. 3).

Аналогичные ограничения, связанные с теми же причинами, возникают и на третьей фазе движения. На второй фазе тоже имеется ограничение на величину усилия, прикладываемого к подвижному элементу. Если к подвижному элементу приложено слишком большое тормозное усилие со стороны привода, то тоже возникает проскальзывание запертых фиксаторами задних колес. Аналогичное ограничение возникает и на четвертой фазе движения. Все эти ограничения должны учитываться при реализации алгоритма управления. На рис. 3 показана зависимость предельно достижимой скорости с учетом описанных выше ограничений на усилие, развиваемое приводом. Важно отметить, что эти ограничения никак не связаны со свойствами самого привода, который имеет ограниченную мощность. Эти ограничения возникают в связи с собственными свойствами рассматриваемого робота и действуют даже в том случае, когда привод имеет заведомо избыточную мощность.

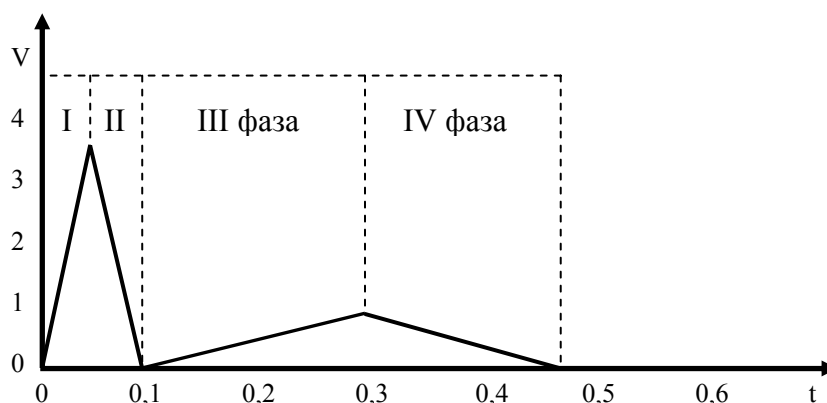


Рисунок 3 – Зависимость максимально возможной скорости перемещения подвижного элемента (фазы 1 и 2) или тела робота (фазы 3 и 4) от времени с учетом описанных ограничений на усилие, развиваемое приводом

На каждой из четырех фаз движения учтены также дополнительные ограничения на усилие, развиваемые приводом, связанные с возможностью опрокидывания робота вокруг запертых фиксаторами колес. При работе робота на горизонтальной поверхности эти ограничения представляют чисто академический интерес, однако при работе на наклонной поверхности или при движении по лестнице эти дополнительные ограничения могут быть весьма существенными.

Интересно отметить, что весьма критичным является соотношение между коэффициентом трения между подвижным элементом и платформой и коэффициентом трения между колесами и опорной поверхностью. Критическое значение этого соотношения зависит от положения центра тяжести робота, положения крайних точек позиционирования подвижного элемента, коэффициента трения качения и т.д. В частности, при пренебрежимо малом коэффициенте трения качения и при симметричном роботе с малой величиной хода подвижного элемента

по сравнению с длиной робота, показано, что критическая величина соотношения между коэффициентами трения равна единице. Это значит, что если коэффициент трения между подвижным элементом и платформой равен коэффициенту трения между колесами и опорной поверхностью, то движение робота невозможно. Этот факт необходимо учитывать при проектировании робота и использовать все возможности для уменьшения коэффициента трения между подвижным элементом и платформой.

Управление роботом

Решены задачи оптимального по времени управления роботом на этапах 1 – 2 и 3 – 4 с учетом ограничений, описанных выше. Выше было показано, что существенными для данного робота являются ограничения на усилие, прикладываемое со стороны трансмиссии к подвижному элементу, и как следствие – ограничения на величину тока в моторе 1. В этой связи представляется целесообразным вместо традиционного в робототехнике управления по скорости в зависимости от координаты использовать другой тип управления. Учитывая отсутствие информации о точных значениях некоторых параметров систем, таких, например, как наклон поверхности или как коэффициент трения между колесами и поверхностью, существенно зависящие от локальных свойств поверхности, по которой движется робот, желательно реализовывать оптимальное управление роботом с помощью адаптивного алгоритма. Следует отметить, что главная задача управления состоит в том, чтобы осуществить разгон и торможение подвижного элемента (фазы 1 – 2) или платформы (фазы 3 – 4) с остановкой в заданных точках; некоторые малые отклонения от заданного закона движения не имеют принципиального значения, а существенное значение имеет возможность поддержания такой величины тока в моторе, которая обеспечит движение без проскальзывания заблокированных колес. В качестве алгоритма адаптивного управления выбрана модификация алгоритма адаптивного управления, описанного в [6], соответствующая более общим принципам управления, описанным в [7].

Суть предлагаемого алгоритма адаптивного управления для подвижного элемента состоит в следующем.

В соответствии с этим алгоритмом траекторию движения делят на две части (фаза 1 – разгон, фаза 2 – торможение, причем длины эти выбирают исходя из результатов, полученных при решении задачи оптимального управления). На первой фазе осуществляют перемещение подвижного элемента с таким управляющим воздействием, которое поддерживает заранее заданный ток в обмотке мотора 1 (рис. 4). Во время этого движения осуществляют одновременную запись координат и соответствующих скоростей подвижного элемента или электромотора 1. На второй фазе движения производят «обобщенную симметризацию» движения подвижного элемента, а именно такое движение подвижного элемента, когда скорость в каждой точке второй фазы движения равна скорости в «обобщенно симметричной» точке первой фазы движения. Под точкой, «обобщенно симметричной» точке X_j на первой фазе движения, следует понимать такую точку X_j^* на второй фазе движения, которая отстоит от границы раздела фаз движения на расстояние, в d_1/d_2 раз меньшее, чем исходная точка на первой фазе движения. Фактически под «обобщенной симметризацией» понимают симметризацию с растяжением (или сжатием).

На второй фазе траектории на приводной двигатель подают такое напряжение, которое минимизирует рассогласование между реальной скоростью в данной точке и записанной на первом этапе скоростью в точке, «обобщенно симметричной» относительно границы раздела фаз движения, осуществляя, таким образом, «обобщенную симметризацию» закона движения. Так как движение началось без начальной скорости в начальной точке первой фазы движения, то и в конечной точке второй фазы движения («обобщенно симметричной» относительно границы фаз движения) подвижный элемент будет иметь нулевую скорость. Следует отметить, что в тот момент, когда скорость подвижного элемента равна нулю, включается фиксатор, препятствующий случайным отклонениям подвижного элемента от этого положения.

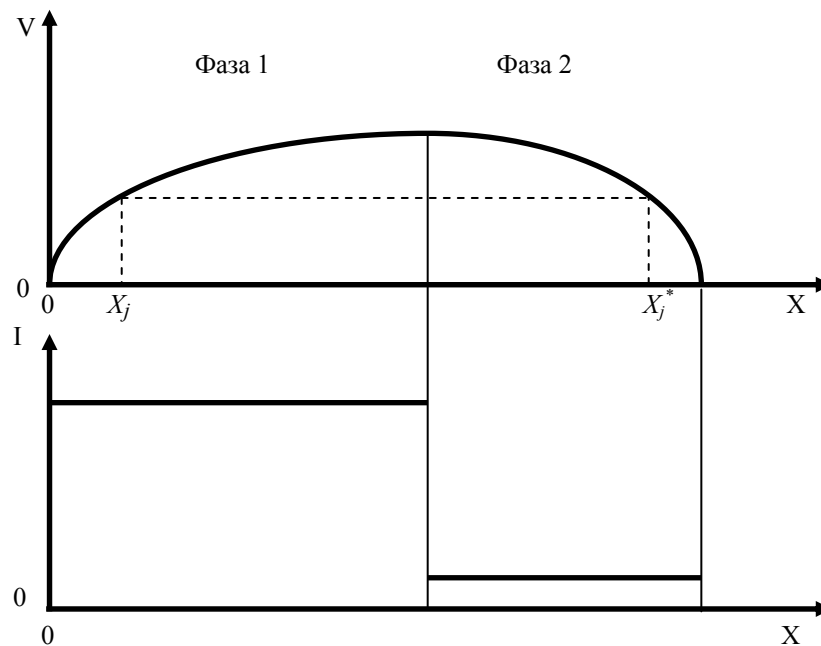


Рисунок 4 – Иллюстрация алгоритма управления. Зависимость скорости подвижного элемента и тока мотора 1 от координаты

Существенное достоинство этого алгоритма состоит в его универсальности. Для применения этого алгоритма нет необходимости иметь предварительную информацию о всех конструктивных параметрах системы. Фактически на первом участке движения система управления получает информацию о том, как надо управлять приводом. Этот метод похож на метод обучения, но отличается тем, что процесс обучения осуществляется непосредственно во время выполнения рабочего процесса, на первой фазе траектории. Дополнительное преимущество метода состоит в том, что в процессе движения система управления получает информацию о законе движения, а при наличии аналитического решения задачи динамики это дает возможность после каждого движения вычислять информацию о конструктивных параметрах привода и, таким образом, осуществлять встроенную диагностику.

Алгоритм управления движением тела робота (фазы 3 и 4) абсолютно аналогичен алгоритму управления движением подвижного элемента.

Тип привода

Показано, что использование передачи с постоянным передаточным отношением между мотором 1 и подвижным элементом не является оптимальным. Это связано с двумя различными причинами.

Одна причина состоит в том, что при старт-стопном движении привод с постоянным передаточным отношением дает низкий КПД электромотора и, кроме того, обеспечивает низкую среднюю скорость движения. На первой и последней частях траектории желательно обеспечить высокое ускорение (замедление). Для этого требуется привод с высоким передаточным отношением. На средней же части траектории, когда требуется обеспечить высокую скорость движения, желательно иметь привод с низким передаточным отношением. Для решения этой проблемы можно использовать привод с переменным передаточным отношением, что позволяет существенно увеличить КПД мотора и среднюю скорость движения.

Вторая причина состоит в том, что один и тот же привод должен осуществлять два различных типа движения. На первой и второй фазе привод осуществляет старт-стопное перемещение легкого подвижного элемента с передними колесами, а на третьей и четвертой фазе этот же привод осуществляет старт – стопное перемещение тяжелого тела робота. Естественно, что привод, оптимально настроенный на один тип движения, будет далеко не оптимальным для второго типа движения.

Для одновременного решения обеих проблем представляется целесообразным использовать разработанный ранее привод с переменным передаточным отношением и двойными свойствами (dual SMART drive) [6].

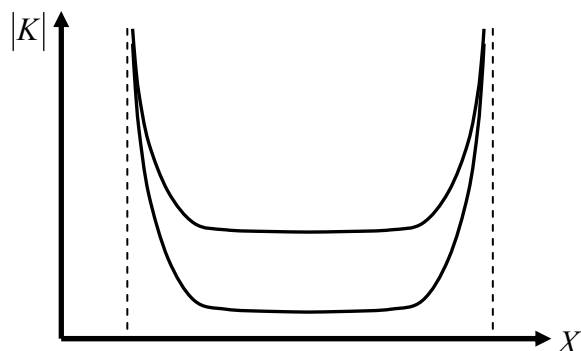


Рисунок 5 – Абсолютная величина передаточного отношения трансмиссии в зависимости от координаты перемещаемого рабочего элемента для привода с переменным передаточным отношением и двойными свойствами

Привод основан на использовании кривошипно-ползунного механизма и позволяет получать два различных закона изменения передаточного отношения в зависимости от координаты рабочего элемента (рис. 5), роль которого попеременно играют подвижный элемент или тело робота. Переход с одного режима работы привода на другой осуществляется в крайних точках простым переключением полярности напряжения, подаваемого на электромотор. За счет таких специфических свойств этот привод позволяет произвести независимую оптимизацию параметров для двух различных типов движения. При перемещении легкого подвижного элемента целесообразно использовать режим с меньшим передаточным отношением, а при перемещении тяжелого тела робота использовать режим с большим

передаточным отношением. Таким образом, этот привод с переменным передаточным отношением и двойными свойствами можно назвать интеллектуальным, так как он автоматически приспособливает передаточное отношение к тем требованиям, которые являются наиболее рациональными для каждой точки траектории, причем с учетом того, какую массу следует перемещать.

Был разработан, изготовлен и испытан прототип колесного робота с изменяемой структурой и приводом с переменным передаточным отношением и двойными свойствами (рис. 6). Привод содержит мотор-редуктор, кривошипно-ползунный механизм и ременную передачу. В качестве датчика положения использовался оптический датчик угла поворота мотора. Испытания показали работоспособность робота на различных типах поверхностей не только с адаптивной системой управления, но даже в том случае, когда использовалась простейшая система управления, когда на электромотор подавалось постоянное напряжение без всяких обратных связей.

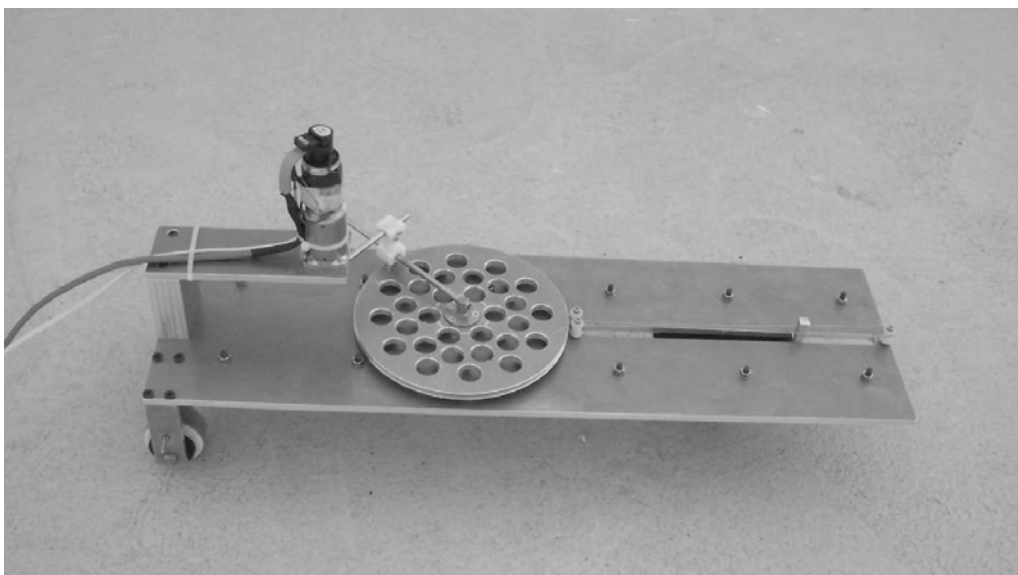


Рисунок 6 – Прототип колесного робота с изменяемой структурой и приводом с переменным передаточным отношением и двойными свойствами

Выводы

Разработан, изготовлен и испытан прототип рассматриваемого робота. Испытания робота показали высокую эффективность работы робота на мягком песчаном грунте, где традиционный колесный робот не может двигаться из-за самозакапывания колес.

Разработанный принцип построения колесного робота может быть эффективно использован для роботов-миноискателей и при некоторой модификации обеспечивающей непрерывное движение, в качестве кресла для инвалидов, способного подниматься и спускаться по лестнице.

Литература

1. Walking Machine Catalogue. – <http://www.walking-machines.org/>
2. Leppanen I., Salmi S., Halme A. Workpartner – HUT Automations new hybrid walking machine // CLAWAR 98, Brussels.
3. Matsumoto O., Kajita S., Saigo M., Tani K. Biped – type leg – wheeled robot // Advanced Robotics. – Vol 13, № 3, P. 235-236.
4. Adachi H., Koyachi N., Arai T., Shimuzu A., Nogami A. Mechanism and control of leg – wheel hibrud mobile robot // Proc. of the IEEE/RSJ International Conference on Robotics and Automation. – 1999. – P. 1792 – 1797.
5. Akinfiev T., Fernandez R., Armada M. and Ramirez A. Device for people or payload transportation and it control method. Patent application P200503060, Spain, 2005.
6. Акинфиев А., Фернандес Р., Армада М. Привод с переменным передаточным отношением и двойными свойствами и управление этим приводом // Интеллектуальные и многопроцессорные системы ИМС2005. – Том 3. – С. 26-30.
7. Akinfiev T. Patent USA4958113. Method of controlling of mechanical resonance hand.

T. Akinfiev, M. Armada, A. Ramirez

Development of wheeled robot with changeable structure and adaptive control

In the paper, a wheeled robot is discussed with changeable structure and its control system. The robot can work in two modes: a continuous movement along a sufficiently solid surface and discontinuous movement along a soft surface or upstairs. In the latter mode the wheels of the robot alternately act as supporting legs (blocked wheels) and as freely rolling wheels. Specific dynamic properties of the robot have been discovered using analytical methods. Problems of analysis, synthesis and optimal control have been solved. The robot prototype has been made and tested.

T. Акінфієв, М. Армада, А. Рамирес

Розробка колісного робота зі змінюваною структурою і адаптивною системою керування

У статті розглядається колісний робот зі змінюваною структурою і його система керування. Робот здатен працювати у двох режимах – режим безперервного руху по м'якій поверхні або по драбині. У цьому останньому режимі колеса робота поперемінно виконують роль опорних ніг (заблоковані колеса) і роль коліс, що вільно котяться. Аналітично виявлені динамічні особливості робота, розв'язані задачі аналізу, синтезу і оптимального керування. Виготовлений і використаний прототип робота.

Статья поступила в редакцию 06.07.2006.