УДК 621.865.8 DOI: 10.17587/mau.22.601-609

А. С. Самойлова, магистр, sas15m206@student.bmstu.ru,
С. А. Воротников, канд. тех. наук, доц., vorotn@bmstu.ru,
Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)

Система управления шагающим роботом, адаптивным к изменению кинематической схемы

В последнее время в робототехнике получили широкое распространение шагающие мобильные роботы (ШМР) различного назначения. Особенно актуально их использование в задачах экстремальной робототехники, а именно: для помощи при проведении поисково-спасательных операций; перемещения грузов по сильно пересеченной местности; построения карт. Данные роботы также служат для исследования и описания частично или полностью недетерминированного рабочего пространства, а также обследования территорий, опасных для жизни человека. Одним из важнейших требований к таким ШМР является робастность их систем управления, при которой обеспечивается сохранение работоспособности ШМР как при изменении характеристик опорной поверхности, так и при более серьезных проблемах, в частности связанных с потерей управляемости или повреждением опорной конечности (ОК). При создании системы управления ШМР авторами предлагается использовать принципы генетического программирования, позволяющие адаптировать робот к возможным изменениям его кинематической схемы, а также к характеристикам опорной поверхности, по которой он передвигается. Данный подход не требует сильных вычислительных мощностей и строгой формальной классификации возможных повреждений ШМР. В статье рассмотрены два основных режима управления ШМР: штатный, который соответствует исправной кинематической схеме, и аварийный, при котором один или несколько приводов ОК повреждены или потеряли управляемость. В качестве примера предложена структура системы управления ШМР, кинематическая схема которого частично разрушается в процессе движения. Разработан способ управления таким роботом, основанный на использовании генетического алгоритма совместно с автоматом Мили. Проведено моделирование режимов перемещения ШМР с шестью ОК в программе V-REP для двух случаев повреждения: конечность отсутствует и конечность перестала функционировать. Представлены результаты моделирования аварийных походок для этих конфигураций ШМР. Показана эффективность предложенного метода в случае повреждения кинематической схемы ШМР. Выполнено сравнение результатов работы генетического алгоритма для ШМР, имеющего повреждения, со штатным алгоритмом управления.

Ключевые слова: *ШМР, ОК, гексапод, штатный режим, аварийный режим, аварийная походка, генетический алгоритм, автомат Мили, эффективность походки*

Введение

В последнее время в области экстремальной робототехники все чаще возникает необходимость использования различных шагающих мобильных роботов (ШМР), предназначенных для участия в поисково-спасательных операциях при ликвидации техногенных катастроф, аварий и других чрезвычайных ситуаций, где требуется провести обследование территории, опасной для человека [1, 2]. Сопутствующими задачами при этом часто являются передвижение по пересеченной местности с заранее неизвестными препятствиями, изучение рельефа поверхности, построение карты и др. [3].

При построении системы управления ШМР важным условием является достижение высокой производительности алгоритмов движения с учетом обеспечения надежности их работы. Рабочая среда данного типа робота является недетерминированной [4]. При этом сам робот и его система управления должны сохранять работоспособность при изменении типа поверхности и ее свойств, а также при более значительных проблемах, вызванных, например, повреждением конструкции опорных конечностей (ОК) [5]. Заметим, что данные проблемы могут быть связаны как с потерей работоспособности отдельного привода конечности, так и с потерей управления всей ОК или даже несколькими конечностями. Большинство алгоритмов управления ШМР, у которых возникают повреждения опорно-двигательного аппарата в процессе движения, основаны на анализе этих повреждений и выборе соответствующего типа походки из априорно заданных [6]. Однако данный подход требует наличия большого числа специализированных датчиков для определения типа повреждения. Также необходимо заранее определить алгоритмы действий ШМР в различных экстренных ситуациях, а в некоторых случаях требуется вмешательство человека-оператора в процесс управления походкой робота.

В ряде публикаций также описаны методы управления ШМР в случае возникновения повреждений одной из ОК. Так, в работе [6] предложено создавать "карты эффективности" способа передвижения. Поврежденный робот выбирает один из априорных способов движения,

тестирует его и обновляет эффективность данного способа на "карте эффективности". Данный алгоритм повторяется до тех пор, пока предложенный авторами критерий успеха не достигает 90 %, после чего выбранный способ движения становится рабочим. Недостатком подхода является отсутствие контроля топологии ШМР в случае возникновения повреждения. Поэтому он становится неэффективным не только при серьезном повреждении конструкции ШМР, но и при возникновении на пути движения робота труднопроходимых препятствий.

Использование методов искусственного интеллекта и машинного обучения также является перспективным подходом для решения данного типа задач. Так, в статье [7] приведены результаты синтеза способа движения ШМР с помощью нейросети, параметры которой настраивались генетическим алгоритмом. Авторы показали способность генетического алгоритма обучить систему управления роботом высокоэффективному способу передвижения. Однако подобное решение также не позволяет учитывать изменение топологии ШМР в случае аварии. Кроме того, длительность настройки алгоритма оказывается недопустимой для реализации качественного управления роботом в условиях слабо детерминированной среды. Также для выполнения обучения нейросети требуется большой объем экспериментальных данных для каждого типа повреждения ШМР.

В статье [8] рассмотрен способ управления шестиногим ШМР, основанный на алгоритме "проб и ошибок" (*Reset-free Trial-and-Error Algorithm*), позволяющем адаптироваться к возможным неисправностям исполнительных устройств робота, таким как потеря ОК или повреждение двигателя. Предложенный алгоритм не требует вмешательства человека при возникновении внештатных ситуаций, связанных с повреждениями робота во время его движения. Выбор компенсационного способа движения осуществляется с помощью метода поиска Монте-Карло в дереве решений. Однако и этот подход не гарантирует нахождения наилучшего способа передвижения для поврежденного робота, так как поиск осуществляется среди априорно-заданных методов для исходной модели робота, не имеющего повреждений.

Таким образом, для всех рассмотренных подходов общим является требование обязательной формализации и классификации всех возможных неисправностей ШМР, которое в реальных условиях оказывается недостижимым.

Одним из путей решения указанной проблемы является построение управления ШМР на основе принципов эволюционного (генетического) программирования [9]. Этот подход не требует наличия экспериментальной базы данных и сильных вычислительных мощностей, а также позволяет решать задачи оптимизации, для которых неэффективны стандартные градиентные методы [10]. В этом случае робот оснащается средствами контроля движения, оценивающими эффективность этого процесса, логическим аппаратом для выбора способа передвижения (походки) и использует генетический алгоритм, осуществляющий "тонкую настройку" выбранной походки [7]. С помощью данных средств ШМР должен сохранить способность перемещаться в заданном направлении даже в случае частичного разрушения его опорно-двигательного аппарата.

Конструкция и система управления ШМР

Целью исследования, представленного в данной статье, является разработка системы управления ШМР, которая способна формировать устойчивое движение робота при частичном нарушении его топологии, связанным с локальным разрушением конструкции или выходом из строя части приводов исполнительной системы.

В качестве кинематической схемы выбрана топология гексапода — ШМР с шестью ОК (рис. 1). Эта схема позволяет реализовать успешное перемещение робота даже при повреждении половины ОК [11]. Движение каждой ОК реали-

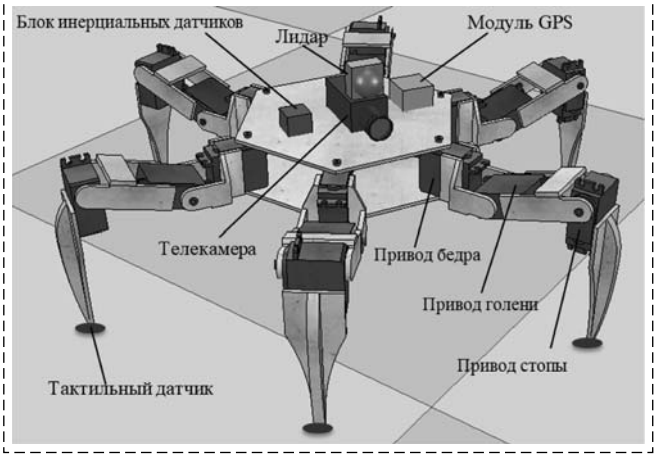

Рис. 1. Кинематическая модель ШМР
Fig. 1. WMR kinematic model

зуется с помощью трех приводов, установленных в бедренном суставе, голени и стопе, соответственно. Каждый выполненный шаг робота фиксируется с помощью тактильных датчиков, размещенных в основании каждой стопы ОК.

Систему управления ШМР предлагается строить по иерархическому принципу: *уровень управления движением* контролирует отработку входных воздействий на приводы ОК, используя данные, получаемые от энкодеров, а *уровень управления поведением* задает движение к целевой точке и анализирует состояние робота в процессе движения с помощью *блока контроля движения* (рис. 2). Важно отметить, что если при движении ШМР возникают проблемы, препятствующие его перемещению в пространстве, этот блок должен модифицировать закон управления ШМР таким образом, чтобы восстановить движение к целевой точке.

Информационный модуль с помощью *сенсорного контроллера* анализирует параметры ориентации ШМР в окружающей среде (на основе данных от *блока инерциальных датчиков* и *модуля GPS* [12]), а также препятствия на пути движения (посредством *лидара* и *телекамеры* [13]).

Транспортный модуль осуществляет непосредственное перемещение ШМР в рабочем пространстве с помощью шести ОК, входящих в состав *ходовой части*.

Важную задачу по контролю работоспособности ОК выполняет *блок анализа коллизий*.

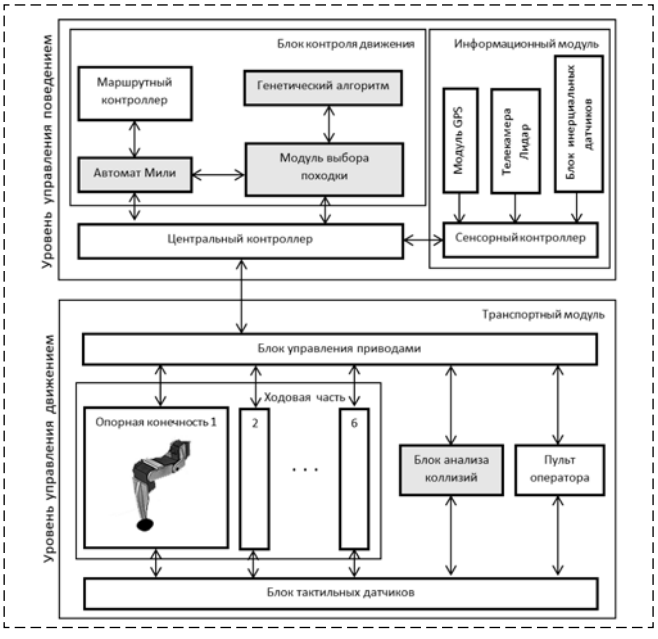

Рис. 2. Структура системы управления ШМР
Fig. 2. Structure of the WMR control system

В него поступают сигналы от энкодеров приводов и тактильных датчиков, установленных на стопе каждой ОК [14]. Отсутствие сигнала от одного из этих датчиков указывает на наличие повреждения конечности ШМР [15], которое фиксируется в *блоке управления приводами*.

Анализ состояния робота, формирование маршрута движения и выбор способа перемещения проводятся в *центральном контроллере*, который формирует команды управления ходовой частью ШМР на основе информации, получаемой от блока анализа коллизий и блока контроля движения.

В случае если подобное решение получить не удается, управление передается на *пульт оператора* для реализации ручного режима управления [16].

Блок контроля движения содержит следующие основные модули:

- *маршрутный контроллер* — для построения маршрута движения к целевой точке;
- *модуль выбора походки* — для принятия решения о способе перемещения с помощью соответствующего типа априорно заданных походок;
- *автомат Мили* — для выбора режима движения в зависимости от текущего состояния робота;
- *генетический алгоритм* — для настройки походки ШМР с частично нарушенной топологией.

Способ и алгоритм управления ШМР

При разработке способа управления ШМР были рассмотрены два режима движения: *штатный*, соответствующий исправной кинематической схеме, и *аварийный* (с нарушением топологии ШМР), при котором какие-либо из опорных конечностей являются частично или полностью неработоспособными. Способы движения в штатном режиме для гексапода хорошо известны: походка тройками, волновая и пульсирующая походки [17]; они в данной статье не рассматриваются.

О возникновении аварийной ситуации в процессе движения могут свидетельствовать следующие два обстоятельства:

1) отсутствуют сигналы обратной связи от тактильных датчиков соответствующих ОК;

2) обрываются сигналы от энкодеров приводов бедра и/или голени.

Для движения в аварийном режиме дополнительно введем два варианта походки:

- *движение с прихрамыванием* — ШМР потерял одну или несколько конечностей;
- *движение с волочением конечности* — один или несколько приводов ШМР перестали функционировать, и конечность потеряла управляемость.

Управление движением ШМР в штатном и аварийном режимах осуществляется с помощью конечного *автомата Мили* (рис. 3), на вход которого поступает информация от блока анализа коллизий и модуля выбора походки (см. рис. 2).

Блок анализа коллизий контролирует прохождение сигналов от тактильных датчиков и энкодеров ШМР и при возникновении аварийной ситуации определяет ее тип (состояние x_1 на рис. 3). Возможны два варианта потери работоспособности ОК: полная или частичная. Первый возникает, если в процессе движения робота отказывает одна или несколько ОК целиком, вплоть до механической потери ее звеньев, второй — при выходе из строя одного из приводов ОК. В первом случае ОК считается потерянной, а движение ШМР — "прихрамывающим", во втором — неуправляемой, и движение — "с волочением конечности".

Модуль выбора походки содержит алгоритмы реализации трех штатных и двух аварийных походок, причем настройка последних выполняется с помощью *генетического алгоритма*.

Эффективность каждой походки (состояние x_6 на рис. 3) оценивается коэффициентом E, который сравнивает текущую скорость движения V относительно максимальной скорости движения $V_{\max}^{\text{шт}}$ ШМР, доступной в штатном режиме [18]:

$$E = \frac{V}{V_{\max}^{\text{шт}}} \cdot 100\ \%. \qquad (1)$$

Рассмотрим работу автомата Мили подробнее. Если движение ШМР осуществляется в штатном режиме, то используется один из базовых режимов управления (состояние x_3). При возникновении аварийной ситуации (о ней сигнализирует блок анализа коллизий) автомат Мили выбирает одну из аварийных походок (состояние x_2) и запускает генетический алгоритм (состояния x_4 и x_5) для настройки соответствующего способа передвижения.

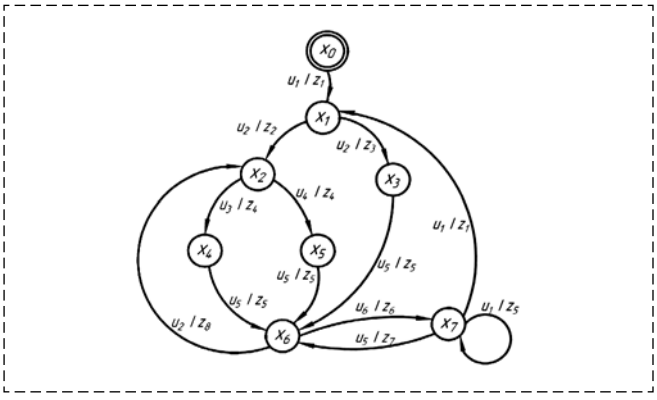

Рис. 3. Конечный автомат Мили (x_i — состояние, u_j, z_k — управляющий и выходной сигналы, соответственно)

Fig. 3. Mealy finite-state machine (x_i — state, u_j, z_k — transition and output functions respectively)

Генетический алгоритм

При работе *генетического алгоритма* выполняется процесс поиска наилучшего способа передвижения для текущей конфигурации ШМР. После завершения работы данного алгоритма формируется модифицированный вариант походки робота. Затем *автомат Мили* тестирует возможность движения ШМР с помощью данной походки и анализирует эффективность ее применения (состояние x_6 на рис. 3). Если модифицированная походка является эффективной (состояние x_7), то она сохраняется в модуле выбора походки, и ШМР продолжает движение с ее помощью. В противном случае автомат Мили запускает работу *генетического алгоритма* повторно (состояние x_2).

В общем случае генетический алгоритм представляет собой алгоритм поиска решения, основанный на принципах генетики и естественного отбора [8]. Главной задачей алгоритма является нахождение минимума целевой функции $f(\rho)$. Для данной задачи выберем целевую функцию в виде:

$$f(\rho) = (\sqrt{\mu_1 \Delta x^2 + \mu_2 \Delta y^2 + \mu_3 \Delta z^2})^{-1}, \qquad (2)$$

где Δx, Δy и Δz — перемещения ШМР вдоль соответствующих осей с помощью походки, синтезируемой генетическим алгоритмом; μ_1, μ_2 и μ_3 — весовые коэффициенты. Значения этих коэффициентов выбираются из диапазона [0...1] в зависимости от того, по какой поверхности перемещается робот: горизонтальной или наклонной.

Ядром генетического алгоритма является взаимодействие популяции генов, где каждый ген состоит из равного числа компонент — хромосом. В рамках данной задачи ген представлен в виде вектора $G = [q_1, q_2, q_3]$, который состоит из трех хромосом, определяющих углы поворота соответствующих приводов ОК. Так, например, при потере ШМР одной из ОК сигналы на ее приводы не подаются.

В общем виде работу генетического алгоритма можно представить как последовательность следующих действий:

1. Создается популяция из $N = 10$ генов с начальным значением хромосом, соответствующим имеющейся аварийной походке ШМР, причем значения углов поворота шарниров лежат в пределах, допустимых конструкционными особенностями данного робота.

2. Вычисляется значение целевой функции $f(\rho)$ для генов популяции по формуле (2).

3. Гены сортируются в порядке возрастания значений их целевой функции.

4. Формируется новое поколение генов как комбинация значений хромосом первых $m = 4$ генов ($m < N$). В создании нового поколения участвуют хромосомы только генов с наилучшим значением функции $f(\rho)$, полученных на предыдущем шаге. Гены с номерами от $m + 1$ до N отбрасываются как самые неподходящие, т. е. с худшим значением функции $f(\rho)$. При этом получаемые комбинации хромосом могут быть произвольными.

5. Для $k = 5$ ($k < N$) последних генов выполняется процедура мутации. Она заключается в добавлении случайных значений к хромосомам гена. При этом каждый последующий ген мутирует больше, чем предыдущий; это необходимо для их обновления. С помощью мутации исключается попадание решения в локальный минимум. Далее решение возвращается ко второму шагу.

Данный алгоритм может быть завершен при достижении необходимого значения целевой функции $f(\rho)$ или после выполнения заданного числа итераций.

Представленный выше алгоритм выполняется для всех шести ОК ШМР. В результате его работы определяются необходимые углы поворота для всех приводов, и, тем самым, модифицируется выбранный тип аварийной походки. Вообще говоря, этот алгоритм может быть запущен для настройки не аварийной, а базовой походки, но в таком случае процесс настройки займет больше времени.

Среда разработки и ограничения модели

Разработку и исследование модели ШМР проводили в среде V-REP, позволяющей учитывать физические свойства предметов и тел, их массоскоростные параметры и силу трения, генерировать показания датчиков, а также анализировать движение модели на виртуальной сцене [19].

Каждая опорная конечность ШМР в модели представлялась тремя составными частями, соединенными шарнирами друг с другом и с корпусом (рис. 4, *а*). В модели можно изменять число ОК (рис. 4, *б*) или отключать приводы соответствующих конечностей (рис. 4, *в*).

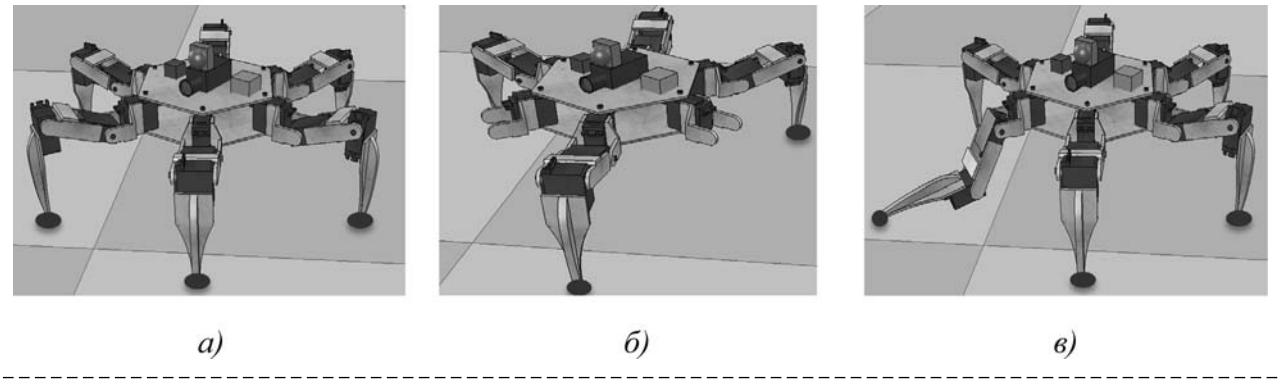

Рис. 4. Модель ШМР-гексапода в программе V-REP:
а — движение в штатном режиме; *б* — движение с прихрамыванием; *в* — движение с волочением конечности
Fig. 4. The WMR-hexapod model in the V-REP program:
а — movement in standard mode; *б* — limping movement; *в* — dragging movement

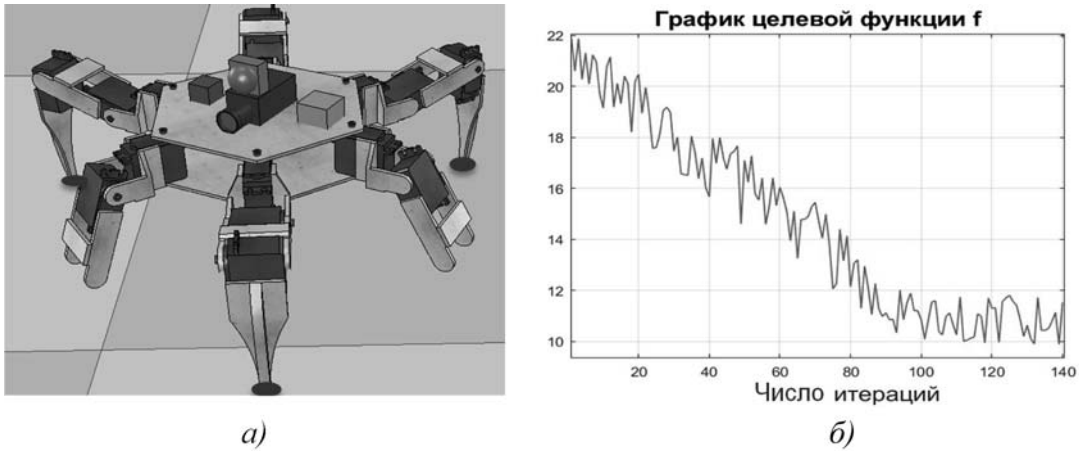

Рис. 5. Движение ШМР с прихрамыванием:
а — модель повреждения робота; *б* — график целевой функции
Fig. 5. Limping movement of WMR:
а — robot damage model; *б* — objective function plot

Данные изменения качественно отразятся на поведении ШМР на виртуальной сцене [20].

При моделировании движения ШМР вводилось допущение, что опорная поверхность является гладкой, расположенной в горизонтальной плоскости, а по своим физическим свойствам соответствует плотному грунту.

Результаты моделирования

При моделировании были рассмотрены два типа аварийного движения: с прихрамыванием и волочением конечности.

Движение с прихрамыванием. Для конкретности исследовали модель ШМР, у которого отсутствовали стопы двух не соседних между собой ОК (рис. 5, *а*). При этом у робота появлялась возможность в процессе движения опираться на голень соответствующей ноги.

Для данной конфигурации ШМР применен генетический алгоритм, результирующий график целевой функции которого изображен на рис. 5, *б*. Для данной реализации генетического алгоритма было задано выполнение 140 итераций, при этом по графику (рис. 5, *б*) видно, что минимум целевой функции достигается уже примерно на 100-й итерации.

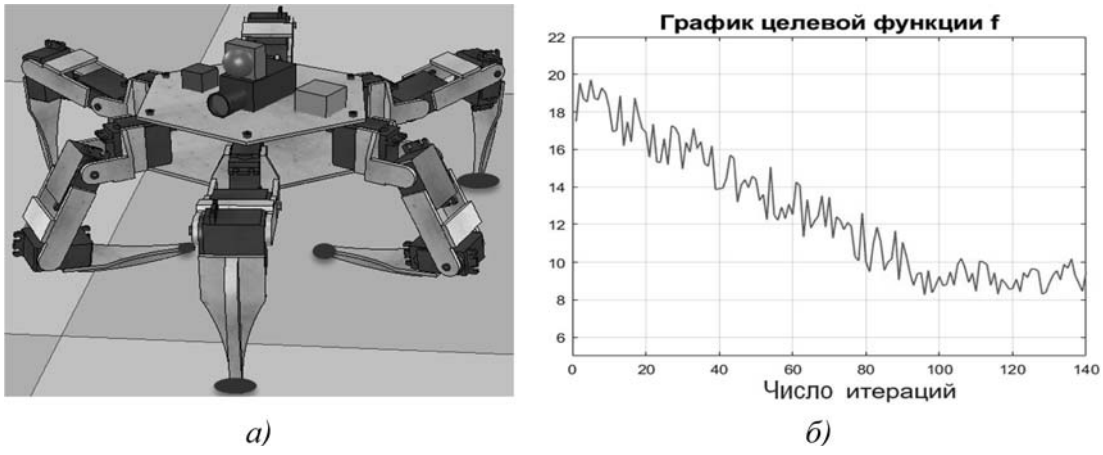

Рис. 6. Движение ШМР с волочением конечности:
а — модель повреждения робота; *б* — график целевой функции
Fig. 6. Dragging movement of WMR:
а — robot damage model; *б* — objective function plot

Следовательно, алгоритм успешно выполнил синтез походки для перемещения ШМР, несмотря на наличие у него повреждений [21]. Выбросы на графике свидетельствуют о некорректных значениях, которые были получены на стадии мутации. На следующем шаге алгоритма данный недостаток компенсируется.

После завершения цикла работы генетического алгоритма полученные значения управляющих воздействий приводов использовались для моделирования походки ШМР. Эффективность данной походки E, вычисленная по формуле (1), составила 78 %.

Движение с волочением конечности. Для конкретности была рассмотрена модель ШМР, у которой перестали функционировать приводы голени двух тех же не соседних ОК (рис. 6, *а*). При этом у робота оставалась возможность в процессе движения опираться на стопу соответствующей ноги.

В результате применения генетического алгоритма был получен график целевой функции для поврежденного ШМР, показанный на рис. 6, *б*. Так же, как и ранее, определялись значения управляющих воздействий приводов, которые использовались для моделирования походки ШМР. При реализации генетического алгоритма, как и ранее, было задано выполнение 140 итераций, причем здесь минимум целевой функции достигался примерно на 95 итерации (рис. 6, *б*). В данном случае настройка алгоритма произошла быстрее, чем в первом случае, но развиваемая роботом скорость оказалась ниже, вследствие отличия типов повреждений ШМР. Эффективность походки E при этом составила 74 %.

Таким образом, при использовании генетического алгоритма, реализованного для двух типов аварийных походок, достигается скорость движения ШМР более $0,7V_{\max}^{\text{шт}}$, что гарантирует успешное перемещение поврежденной модели ШМР на виртуальной сцене.

Заключение

В статье разработана структура системы управления ШМР с шестью ОК и предложен способ управления на основе конечного автомата Мили. При повреждениях робота, ведущих к частичному изменению его кинематической схемы, предложено использовать аварийные походки, а их настройку проводить с помощью генетического алгоритма. Выполнено исследование двух типов аварийных походок: "движение с прихрамыванием" и "движение с волочением конечности" в среде моделирование V-REP.

Полученные графики целевых функций для рассмотренных примеров аварийных походок имеют похожий вид и сходятся к минимальному значению быстрее, чем за 100 итераций. В результате этого скорость движения ШМР на виртуальной сцене после настройки походки достигает порядка $0,7V_{\max}^{\text{шт}}$.

Результаты проведенных исследований продемонстрировали возможности генетического алгоритма настраивать систему управления ШМР таким образом, что он становится адаптивным к некоторому изменению своей кинематической схемы, включая даже частичное разрушение собственной конструкции.

Было показано, что совместное использование конечного автомата Мили и генетического алгоритма является эффективным способом управления ШМР в экстремальных режимах эксплуатации и повышает робастность его системы управления в целом.

Список литературы

1. **Bartsch S.** Development, control, and empirical evaluation of the six-legged robot SpaceClimber designed for extraterrestrial crater exploration // Artificial intelligence. 2014. Vol. 28. P. 127—131. DOI:10.1007/s13218-014-0299-y.

2. **Назарова А. В., Мэйсинь Ч.** Проблемы использования робототехнических систем в операциях спасения `при землетрясениях // Робототехника и техническая кибернетика. 2018. № 3(20). С. 31—38. DOI 10.31776/RTCJ.6303.

3. **Roennau A., Heppner G., Nowickiand M., Dillmann R.** LAURON V: A Versatile Six-Legged Walking Robot with Advanced Maneuverability // International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. 2014. P. 82—87. DOI:10.1109/AIM.2014.6878051.

4. **Юревич Е. И.** Основы робототехники. СПб.: БХВ-Петербург, 2005. 416 с.

5. **Bongard J., Zykov V., Lipson H.** Resilient machines through continuous self-modeling // ScienceRobotics. 2006. 314 (5802), P. 1118—1121. DOI: 10.1126/science.1133687.

6. **Cully A., Clune J.** Robots that can adapt like animals // Nature. 2015. 521 (7553), P. 503—507. DOI:10.1038/nature14422.

7. **Мунасыпов Р. А., Москвичев С. С.** Методика синтеза стратегии движения автономного мобильного робота на основе эволюционных процессов // Вестник УГАТУ. 2012. Т. 16, № 3. С. 56—62.

8. **Chatzilygeroudis K., Vassiliades V., Mouret J.** Reset-free Trial-and-Error Learning for Robot Damage Recovery // Robotics and Autonomous Systems. 2018. Vol. 100. P. 236—250. DOI:10.1016/j.robot.2017.11.010.

9. **Бураков М. В.** Генетический алгоритм: теория и практика: учеб. пособие. СПб.: ГУАП, 2008. 164 с.

10. **Гасников А. В.** Современные численные методы оптимизации. Метод универсального градиентного спуска: Учеб. пособие. М.: МФТИ, 2018. 291 с.

11. **Ramdya P., Thandiackal R., Cherney R.** Climbing favours the tripod gait over alternative faster insect gaits // Nature Communications. 2017. 8 (1), 14494. DOI: 10.1038/ncomms14494.

12. **Михайлова В. В., Соловьева Т. Н., Попов В. П.** Моделирование кинематики шагающего робота // Информационно-управляющие системы. 2015. № 6 (79). С. 50—56.

13. **Перов А. И., Харисов В. Н.** ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования. М.: Радиотехника, 2010. 800 с.

14. **Гречишкин М. Н.** Система технического зрения для обнаружения движения в видеопотоке // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2015. № 9. С. 66—70.

15. **Воротников С. А.** Информационные устройства робототехнических систем: Учеб. пособие / Под ред. С. Л. Зенкевича, А. С. Ющенко. М: Изд. МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2005. 383 с.

16. **Антонов А. В., Воротников С. А., Выборнов Н. А.** Система управления трехопорным колесно-шагающим роботом // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. 2016. № 2 (34). С. 58—69.

17. **Ющенко А. С.** Маршрутизация движения мобильного робота в условиях неопределенности // Мехатроника, автоматизация, управление. 2004. № 1. С. 31—38.

18. **Erazo A. S.** Terrain Adaptive Gaits for Hexapod Robots // Electronic Engineer in Automation and Control. 2014. V. 10. P. 513—528.

19. **Бжихатлов И. А.** Моделирование робототехнических систем в программе V-REP: учеб. пособие. СПб.: Университет ИТМО, 2018. 59 с.

20. **Eric Rohmer, Surya P. N. Singh.** CoppeliaSim (formerly V-REP): a versatile and scalable robot simulation framework // Proc. of The International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). 2013. URL: https://www.coppeliarobotics.com/coppeliaSim_v-rep_iros2013.pdf, 6 p.

21. **Самойлова А. С., Груничев П. А., Воротников С. А.** Система управления шагающим мобильным роботом с использованием генетического алгоритма // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. № 10. С. 153—162.

The Walking Robot Control System that is Adaptive to Changes in the Kinematics

A. S. Samoylova, sas15m206@student.bmstu.ru, **S. A. Vorotnikov**, vorotn@bmstu.ru,
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation

Corresponding author: **Vorotnikov S. A.,** Cand. Sc.
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation,
e-mail: vorotn@bmstu.ru

Accepted on July 27, 2021

Abstract

The walking mobile robots (WMR) have recently become widely popular in robotics. They are especially useful in the extreme cases: search and rescue operations; cargo delivery over highly rough terrain; building a map. These robots also serve to explore and describe a partially or completely non-deterministic workspace, as well as to explore areas that are dangerous to human life. One of the main requirements for these WMR is the robustness of its control system. It allows WMR to maintain the operability when the characteristics of the support surface change as well as under more severe conditions, in particular, loss of controllability or damage of the supporting limb (SL). We propose to use the principles of genetic programming to create a WMR control system that allows a robot to adapt to possible changes in its kinematics, as well as to the characteristics of the support surface on which it moves. This approach does not require strong computational power or a strict formal classification of possible damage to the WMR. This article discusses two main WMR control modes: standard, which accord to a serviceable kinematics, and emergency, in which one or more SL drives are damaged or lost controllability. As an example, the structure of the control system of the WMP is proposed, the kinematics of which is partially destroyed in the process of movement. We developed a method for controlling such robot, which is based on the use of a genetic algorithm in conjunction with the Mealy machine. Modeling of modes of movement of WMR with six SL was carried out in the V-REP program for two cases of injury: absent and not functioning limb. We present the results of simulation of emergency gaits for these configurations of WMP and the effectiveness of the proposed method in the case of damage to the kinematic scheme. We also compared the performance of the genetic algorithm for the damaged WMR with the standard control algorithm.

Keywords: *WMR, SL, hexapod, standard mode, emergency mode, emergency gait, genetic algorithm, Mealy machine, gait effectiveness*

For citation:

Samoylova A. S., Vorotnikov S. A. The Walking Robot Control System that is Adaptive to Changes in the Kinematics, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2021, vol. 22, no. 11, pp. 601—609.

DOI: 10.17587/mau. 22.601-609

References

1. **Bartsch S.** Development, control, and empirical evaluation of the six-legged robot SpaceClimber designed for extraterrestrial crater exploration, *Artificial intelligence*, 2014, vol. 28, pp. 127—131, DOI:10.1007/s13218-014-0299-y.

2. **Nazarova A. V., Meixin Zhai.** Problems of using robotic systems in earthquake rescue operation, *Robotics and Technical Cybernetics*, 2018, no. 3(20), pp. 31—38. DOI 10.31776/RTCJ.6303.

3. **Roennau A., Heppner G., Nowickiand M., Dillmann R.** LAURON V: A Versatile Six-Legged Walking Robot with Advanced

Maneuverability, *International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, 2014, pp. 82—87, DOI:10.1109/AIM.2014.6878051.

4. **Yurevich E. I.** Fundamentals of robotics, St. Petersburg, BHV-Petersburg, 2005, 416 p.

5. **Bongard J., Zykov V., Lipson H.** Resilient machines through continuous self-modeling, *ScienceRobotics,* 2006, 314 (5802), pp. 1118—1121. DOI: 10.1126/science.1133687.

6. **Cully A., Clune J.** Robots that can adapt like animals, *Nature*, 2015, 521 (7553), pp. 503—507. DOI: 10.1038/nature14422.

7. **Munasypov R. A., Moskvichev S. S.** Evolutionary-based synthesis of locomotion strategy of an autonomous mobile robot, *Bulletin UGATU*, 2012, vol. 16, no. 3, pp. 56—62.

8. **Chatzilygeroudis K., Vassiliades V., Mouret J.** Reset-free Trial-and-Error Learning for Robot Damage Recovery, *Robotics and Autonomous Systems*, 2018, vol. 100, pp. 236—250. DOI: 10.1016/j.robot.2017.11.010.

9. **Burakov M. V.** Genetic algorithm: theory and practice, Saint Petersburg, GUAP, 2008, 164 p.

10. **Gasnikov A. V.** Modern numerical optimization methods. The method of universal gradient descent: training manual, Moscow, MIPT, 2018, 291 p.

11. **Ramdya P., Thandiackal R., Cherney R.** Climbing favours the tripod gait over alternative faster insect gaits, *Nature Communications*, 2017, 8 (1), 14494. DOI:10.1038/ncomms14494.

12. **Mikhailova V. V., Solovyova T. N., Popov V. P.** Kinematic modeling of a walking machine, *Information and Control Systems*, 2015, no. 6 (79), pp. 50—56.

13. **Perov A. I., Kharisov V. N.** GLONASS. Principles of construction and functioning, Moscow, Radio Engineering, 2010, 800 p.

14. **Grechishkin M. N.** Computer vision system for motion detection in a video stream, *Izvestiya Tula State University. Technical sciences*, 2015, no. 9, pp. 66—70.

15. **Vorotnikov S. A.** Information devices of robotic systems: Study guide, Edited by S. L. Zenkevich, A. S. Yushchenko, Moscow, Publishing house of the Bauman Moscow State Technical University, 2005, 383 p.

16. **Antonov A. V., Vorotnikov S. A., Vybornov N. A.** The control system of a three-point wheel-legged robot, *Caspian Journal: management and high technologies,* 2016, no, 2 (34), pp. 58—69.

17. **Yushchenko A. S.** Routing the movement of a mobile robot in conditions of uncertainty, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2004, no. 1, pp. 31—38.

18. **Erazo A. S.** Terrain Adaptive Gaits for Hexapod Robots, *Electronic Engineer in Automation and Control,* 2014, vol. 10, pp. 513—528.

19. **Brzikhatlov I. A.** Modeling of robotic systems in the V-REP program: training manual, St. Petersburg, ITMO University, 2018, 59 p.

20. **Eric Rohmer, Surya P. N. Singh.** CoppeliaSim (formerly V-REP): a versatile and scalable robot simulation framework, *Proc. of The International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS*), 2013, available at: https://www.coppeliarobotics.com/coppeliaSim_v-rep_iros2013.pdf, 6 p.

21. **Samoylova A. S., Grunichev P. A., Vorotnikov S. A.** Control system of a walking mobile robot using a genetic algorithm, *Izvestiya Tula State University. Technical sciences*, 2020, no. 10, pp. 153—162.

9 декабря в Тульском ГУ состоится

Четвертая всероссийская научно-техническая конференция

МЕХАТРОННЫЕ СИСТЕМЫ

(теория и проектирование)

Посвящается
100-летию со дня рождения профессора Б. М. Подчуфарова
и 65-летнему юбилею кафедры "САУ" ТулГУ»

Научная программа конференции

Секция №1. Системы управления техническими объектами.
Секция №2. Автоматические приводы и их элементы.
Секция №3. Интеллектуальные мехатронные системы.
Секция №4. Мехатронные системы в робототехнике.
Секция №5. Мехатронные системы в тренажерных комплексах.
Секция №6. Проблемы проектирования и производства мехатронных систем и модулей.

Адрес оргкомитета

300012, Тула, пр. Ленина 92, ТулГУ, кафедра "САУ".
Телефон: (4872)35-38-35, E-mail: info@sau.tsu.tula.ru