

МОДЕЛИРОВАНИЕ КИНЕМАТИКИ ШАГАЮЩЕГО РОБОТА

В. В. Михайлов^а, доктор техн. наук, профессор

Т. Н. Соловьева^б, канд. техн. наук, доцент

В. П. Попов^б, канд. техн. наук, доцент

^аСанкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН, Санкт-Петербург, РФ

^бСанкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, РФ

Цель: для конструирования системы управления шагающей машиной необходимо наличие кинематической и динамической моделей этой машины. Целью исследования является разработка кинематической модели для действующего макета шестиногого шагающего робота, позволяющей получить визуальное представление о его перемещении в пространстве при создании алгоритмов управления. **Результаты:** найдено математическое описание кинематической модели шестиногого шагающего робота в виде систем уравнений для определения положения узлов робота при заданных углах разворота звеньев конечностей. Получена система разностных уравнений, позволяющая провести моделирование движений робота при управлении по вектору скорости. На основании разработанной модели выполнена визуализация различных типов перемещения робота в пакете MatLab. Изменение углов расположения конечностей робота осуществляется с помощью гидроприводов, в связи с этим получены уравнения, определяющие связь величины выдвигания штоков гидроприводов и углов расположения конечностей. Для оценки возможностей перемещения робота построена область достижимости ступни и найдены аналитические границы этой области. **Практическая значимость:** разработанная модель может быть использована как основа построения динамической модели при разработке и апробации алгоритмов управления движением машины, а также для управления макетом машины в режиме следящего привода.

Ключевые слова — шестиногий робот, шагающая машина, кинематическая модель, область достижимости, управление по вектору скорости.

Введение

Шагающие устройства обладают преимуществами перед любыми типами движителей при перемещении в условиях бездорожья, сложного рельефа и при преодолении препятствий. Конструктивные особенности таких устройств обеспечивают более простое (по сравнению с колесными или гусеничными машинами) решение задач герметизации и термостатирования в условиях глубокого вакуума, высоких давлений и больших градиентов температуры. Анализ характеристик шагающих движителей в сравнении с колесными и гусеничными приведен в работе [1].

Разработка математических моделей и действующих макетов шагающих роботов началась более 50 лет назад. В этих исследованиях принимали активное участие Д. Е. Охочимский, А. К. Платонов, В. Б. Ларин и другие советские и российские ученые. Их работы посвящены задачам управления шагающим аппаратом, вопросам статической и динамической устойчивости и классификации различных походок [2–4]. За рубежом одна из первых работ в области шагающих роботов принадлежит сербскому академику Миомиру Вукобратовичу [5]. Весомый вклад в развитие шагающих машин внесли и сотрудники ГУАП [1, 6, 7]. Однако условия для создания реальных конкурентоспособных машин такого рода сложились лишь сейчас в связи с потребностями космической отрасли, необходимостью

проведения работ на морском дне, мониторинга энергосетей и нефтегазовых трубопроводов, а также в результате развития информационных и машиностроительных технологий [8, 9].

Традиционно задачи водителей колесного или гусеничного транспорта состояли в выборе и задании направления и скорости движения в соответствии с целями движения и дорожной обстановкой. Предполагается, что оператор шагающего робота должен выполнять аналогичные функции. Управлять движением звеньев конечностей для перемещения машины в заданном направлении, координировать движение ног во время рабочего перемещения и свободного переноса, выбирать тип походки и величину клиренса с учетом устойчивости машины должна бортовая компьютерная система. На ручное управление оператор может переходить в сложных условиях при преодолении препятствий, но и в этом случае его роль должна ограничиваться выбором мест постановки ноги и ее переносом, а также заданием локального направления перемещения машины на очередном шаге с учетом устойчивости. Для инструментальной поддержки действий оператора при этом может использоваться микроманипулятор — имитатор конечности, а для контроля устойчивости — представленное на дисплее расположение центра тяжести машины относительно зоны устойчивости.

Таким образом, одной из основных задач проектирования шагающего робота является раз-

работка системы управления. Для построения и отладки алгоритмов управления необходимо создать адекватную модель робота. На первом этапе строится кинематическая модель, в которой не учитываются вес звеньев робота и динамические связи между ними. Здесь робот рассматривается как совокупность материальных точек (узлов), характеризующихся некоторыми координатами и скоростями. Такая модель удобна для разработки различных вариантов перемещения конечностей робота и его платформы. Кинематическая модель позволяет получить уравнения движения отдельных узлов робота в каждом из вариантов перемещения и оценить его статическую устойчивость. На втором этапе разработки системы управления необходимо построить динамическую модель, учитывающую массу отдельных звеньев робота и динамические связи между звеньями. Основная задача системы управления — обеспечить движение звеньев по полученным на первом этапе уравнениям движения за счет подачи соответствующих управляющих сигналов с учетом динамической устойчивости робота.

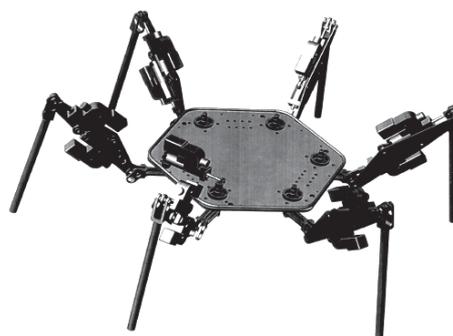
Данная статья посвящена разработке кинематической модели шестиногого робота. В частности, для достижения этой цели решаются задачи:

- выбора совокупности систем координат, связанных с узлами машины;
- разработки кинематической модели конечности робота;
- разработки кинематической модели гидропривода;
- построения области достижимости для отдельной конечности робота;
- построения векторов скоростей стоп ног при прямолинейном движении машины и ее вращении вокруг осей координат;
- моделирования и визуализации различных вариантов движения машины.

Разработка кинематической модели робота

Конкретным объектом моделирования является действующий макет шагающей машины (рис. 1), разработанный сотрудниками ГУАП и ЗАО «Арсенал-7» [1].

Платформа (корпус машины) представляет собой правильный шестиугольник, в вершинах которого расположены трехзвенные конечности (ноги машины). В отличие от живых организмов с шаровым бедренным суставом, шарниры бедренного сустава машины имеют одну степень свободы. Шарниры разнесены в пространстве, и между ними добавлено промежуточное звено. В точке крепления ноги к платформе происходит вращение вокруг вертикальной оси, а в точке крепления бедра к промежуточному звену — вра-



■ Рис. 1. Макет шагающей машины

щение вокруг горизонтальной оси. Коленный сустав имеет одну степень свободы — вращение вокруг горизонтальной оси. Для перемещения звеньев используются гидроприводы.

Возможны различные подходы к построению кинематической модели шагающей машины.

Например, в работе [1] представлено описание геометрической конструкции платформы шестиногого робота и кинематической структуры конечностей. Положение платформы робота в пространстве задается следующими уравнениями [1]:

$$\begin{aligned} (x_{ai} - x_{aj})^2 + (y_{ai} - y_{aj})^2 + (z_{ai} - z_{aj})^2 &= R^2; \\ (x_{ai} - x_{a0})^2 + (y_{ai} - y_{a0})^2 + (z_{ai} - z_{a0})^2 &= R^2; \\ Ax_{ai} + By_{ai} + Cz_{ai} &= 0, \end{aligned}$$

где $i = \overline{1, 6}$, $j = (i + 1) \bmod 6$; x_{ai} , y_{ai} , z_{ai} — координаты точек закрепления ног; x_{a0} , y_{a0} , z_{a0} — координаты центра платформы; A , B , C — параметры плоскости платформы; R — расстояние между точками крепления ног.

Переменными здесь являются координаты семи точек (центра платформы и точек закрепления ног) и три параметра плоскости платформы. Таким образом, общее количество переменных равно 24, а количество уравнений — 18. Наличие шести свободных переменных позволяет задать угловое положение плоскости платформы и положение ее центра (или любой другой точки).

Положение стоп ног машины определяется уравнениями

$$\begin{aligned} x_{ci} &= x_{ai} + (L_1 \sin \beta_1 + L_2 \sin(\beta_2 - \beta_1)) \cos \left(\beta_3 + \frac{(i-1)\pi}{3} \right); \\ y_{ci} &= y_{ai} + (L_1 \sin \beta_1 + L_2 \sin(\beta_2 - \beta_1)) \sin \left(\beta_3 + \frac{(i-1)\pi}{3} \right); \\ z_{ci} &= L_1 \cos \beta_1 - L_2 \sin(\beta_2 - \beta_1), \end{aligned}$$

где $i = \overline{1, 6}$; x_{ci} , y_{ci} , z_{ci} — координаты стоп ног; L_1 , L_2 — длины бедра и голени; β_1 — угол отклонения бедра от вертикальной оси; β_2 — угол поворота голени относительно бедра; β_3 — угол разворота бедра вокруг вертикальной оси.

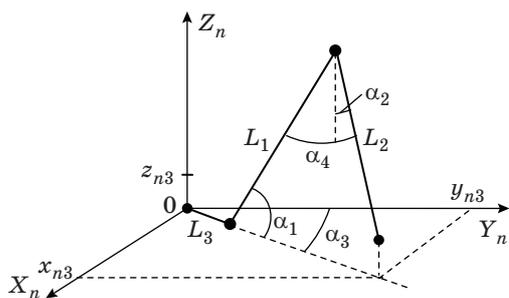
В уравнениях ног дополнительными переменными являются углы разворота звеньев и координаты стоп. Общее количество дополнительных переменных равно 36. Таким образом, в целом модель машины описывается системой из 36 уравнений с 60 переменными. Количество свободных переменных равно 24, из них 6 переменных необходимы для задания положения платформы. Оставшиеся 18 переменных позволяют задать расположение стоп ног в произвольных точках области, границы которой определяются конструктивными особенностями звеньев и шарниров конечностей. Если положения стоп всех шести ног и корпуса зафиксированы, то система становится жесткой, свободные переменные в ней отсутствуют. При известном законе перемещения платформы машины траектории движения вершин всех опорных ног относительно платформы будут однозначно определены. Если количество опорных ног меньше шести, то условие «жесткости» сохраняется, поскольку положение или траектория переноса каждой из «свободных» ног также должны быть заданы.

Полученная система алгебраических уравнений является весьма громоздкой. Перейдем к более простому описанию, исключив уравнения платформы машины. При построении модели будем использовать три координатные системы: систему координат конечностей, систему координат машины и неподвижную систему для отображения движения машины в пространстве.

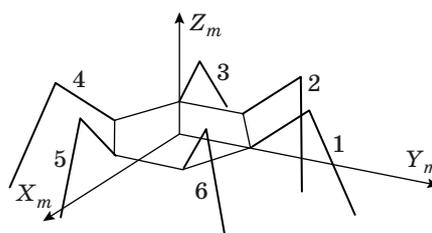
Центр системы координат конечности $X_n Y_n Z_n$ расположен в точке прикрепления ноги к платформе, плоскость $X_n Y_n$ совпадает с плоскостью платформы, ось Y_n направлена от центра платформы к точке крепления промежуточного звена к платформе, ось Z_n — вертикально вверх (рис. 2).

Центр координатной системы корпуса $X_m Y_m Z_m$ расположен в центре шестиугольной платформы. Плоскость $X_m Y_m$ совпадает с плоскостью платформы, ось Y_m направлена в точку крепления первой ноги, ось Z_m направлена вертикально вверх (рис. 3).

Неподвижная система координат XYZ служит для моделирования перемещения машины в пространстве. Все координатные системы — правые.



■ Рис. 2. Геометрическая модель конечности робота



■ Рис. 3. Система координат машины и нумерация ног

Общие геометрические характеристики машины следующие:

- расстояние между точками крепления ног — 25 см;
- длина бедра L_1 — 48 см;
- длина голени L_2 — 60 см;
- длина промежуточного звена L_3 — 14,7 см;
- допустимые значения угла подъема бедра — $-20^\circ < \alpha_1 < 70^\circ$;
- допустимые значения угла поворота голени относительно бедра — $50^\circ < \alpha_4 < 170^\circ$;
- допустимые значения угла разворота ноги — $-55^\circ < \alpha_3 < 55^\circ$.

Кинематическая (геометрическая) модель ноги машины (см. рис. 2) в проекциях на собственную систему координат имеет вид

$$\begin{aligned} x_{n3} &= (L_1 \cos \alpha_1 + L_2 \sin \alpha_2) \cos \alpha_3; \\ y_{n3} &= (L_1 \cos \alpha_1 + L_2 \sin \alpha_2 + L_3) \sin \alpha_3; \\ z_{n3} &= L_1 \sin \alpha_1 - L_2 \cos \alpha_2, \end{aligned} \quad (1)$$

где x_{n3}, y_{n3}, z_{n3} — координаты стопы; L_1, L_2, L_3 — длины бедра, голени и промежуточного звена соответственно; $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ — углы подъема бедра, подъема голени (относительно вертикальной оси) и разворота бедра соответственно.

Угол α_4 поворота голени относительно бедра связан с углами α_1 и α_2 соотношением $\alpha_4 = \alpha_2 - \alpha_1 + 90^\circ$. Переход к углу α_2 связан исключительно с компактностью записи уравнений конечности.

Моделирование движения машины

Моделирование машины производится в пакете MatLab.

Для удобства проведения моделирования на основании (1) выполним дифференцирование этой системы уравнений. Результат в матричной форме имеет вид

$$\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{dx_{n3}}{dt} \\ \frac{dy_{n3}}{dt} \\ \frac{dz_{n3}}{dt} \end{bmatrix} = \mathbf{A} \begin{bmatrix} \frac{d\alpha_1}{dt} \\ \frac{d\alpha_2}{dt} \\ \frac{d\alpha_3}{dt} \end{bmatrix},$$

где v_x, v_y, v_z — составляющие вектора скорости дви-

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} -L_1 \sin \alpha_1 \cos \alpha_3 & L_2 \cos \alpha_2 \cos \alpha_3 \\ -L_1 \sin \alpha_1 \sin \alpha_3 & L_2 \cos \alpha_2 \sin \alpha_3 \\ L_1 \cos \alpha_1 & L_2 \sin \alpha_2 \\ -\sin \alpha_3 (L_1 \cos \alpha_1 + L_2 \sin \alpha_2) \\ \cos \alpha_3 (L_1 \cos \alpha_1 + L_2 \sin \alpha_2) \\ 0 \end{pmatrix}$$

Разрешив систему уравнений относительно производных по углам разворота звеньев, получим

$$\begin{pmatrix} \frac{d\alpha_1}{dt} \\ \frac{d\alpha_2}{dt} \\ \frac{d\alpha_3}{dt} \end{pmatrix} = \mathbf{A}^{-1} \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{pmatrix}$$

После интегрирования системы и перехода к конечным разностям по формуле Эйлера найдем уравнения для определения углов разворота звеньев при заданном векторе скорости стопы ноги в системе координат конечности:

$$\begin{pmatrix} \alpha_1(k+1) \\ \alpha_2(k+1) \\ \alpha_3(k+1) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha_1(k) \\ \alpha_2(k) \\ \alpha_3(k) \end{pmatrix} + \mathbf{A}(k)^{-1} \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{pmatrix} \delta, \quad (2)$$

где δ — шаг по времени.

Коэффициенты матрицы \mathbf{A} пересчитываются на каждом шаге в соответствии с новыми значениями углов разворота звеньев ноги.

Модель машины в целом включает уравнения движения всех шести ног в их собственной системе координат. Координация движения ног обеспечивается общим шагом счета и движением стоп опорных конечностей по согласованным векторам скорости.

Первоначально в системе координат машины определяются векторы скорости стоп конечностей, обеспечивающие тот или иной закон движения платформы. Затем рассчитываются значения этих величин в системах координат конечностей и по уравнениям (2) определяются углы разворота звеньев конечностей на очередном шаге счета. После этого по уравнениям (1) находятся координаты узлов звеньев конечностей для анимации модели.

Последовательность вычислений в компьютерной модели машины, реализованной в пакете MatLab, показана на рис. 4.

Движение машины будет складываться из поступательного перемещения платформы и вращений платформы вокруг своих координатных осей. Поступательное перемещение платформы в пространстве может быть задано вектором ско-

рости центра масс (или любой другой точки платформы).

Для вращения платформы вокруг координатных осей вектор скорости стоп должен пересчитываться на каждом шаге в соответствии с положением стоп относительно оси вращения машины и угловой скорости ее вращения. Во всех случаях стопы опорных конечностей в системе координат машины должны двигаться по вектору, противоположному вектору скорости машины.

Для простоты восприятия анимированных изображений при визуализации использовалась модель машины с совмещенными шарнирами верхних частей ног, т. е. принято $L_3 = 0$ (рис. 5).

Компьютерная модель позволяет имитировать и наблюдать различные сценарии движения: перемещение отдельной конечности при закреплении стопы или точки прикрепления бедра, движение корпуса машины при закрепленных стопах ног — покачивание, движение вверх-вниз, хула-хуп, вращение корпуса и др. Проблема реализации походок машины и формирования

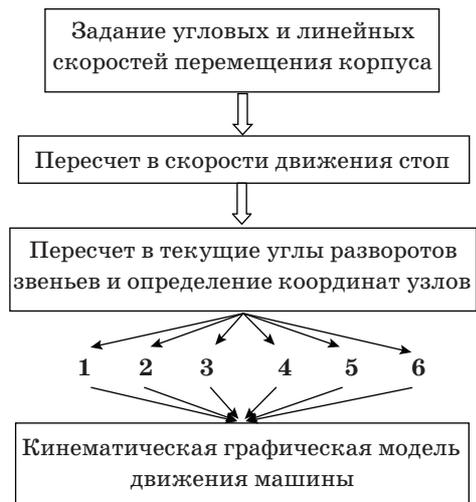


Рис. 4. Последовательность вычислений при моделировании движения машины

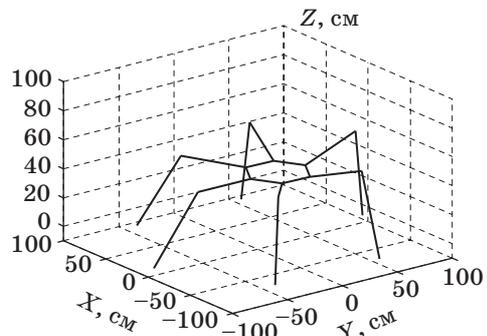


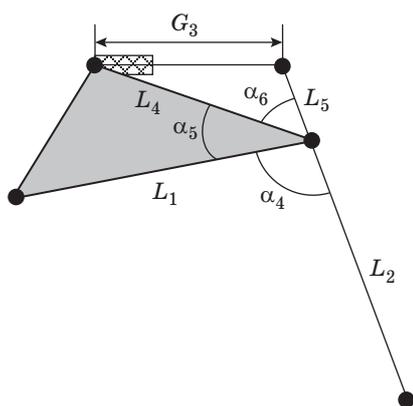
Рис. 5. Трехмерная модель робота

стереотипов движения является самостоятельной задачей и в данной работе не рассматривается.

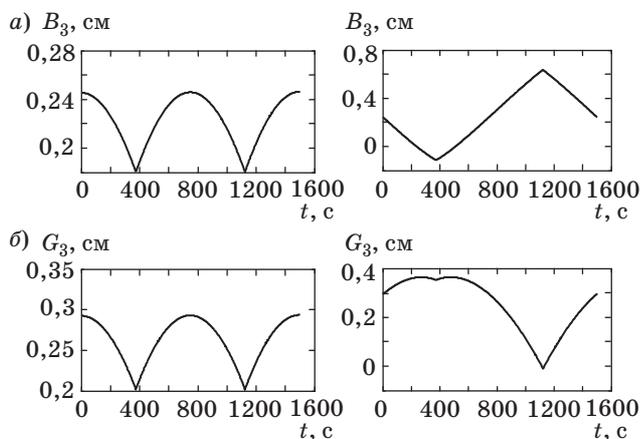
Кинематическая модель гидроприводов

Изменение положения конечностей робота в пространстве происходит за счет изменения углов между звеньями конечностей. В свою очередь величины углов зависят от величин выдвигания штоков гидроприводов. Кинематика работы гидроприводов звеньев ног также может быть представлена в форме геометрической модели. Такая модель для гидропривода голени показана на рис. 6, где $L_4 = 30$ см, $L_5 = 3$ см, $\alpha_5 = 10^\circ$ — конструкционные параметры; G_3 — величина выдвигания штока привода голени. Звенья L_2 и L_5 жестко связаны (звено L_2 является продолжением звена L_5).

По геометрическим моделям могут быть найдены зависимости величин выдвигания штоков



■ Рис. 6. Геометрическая модель гидропривода поворота голени



■ Рис. 7. Графики выдвигания штоков гидроприводов бедра (а) и голени (б) при покачивании корпуса машины (слева) и движениях вверх-вниз (справа)

от углов разворота звеньев ноги. Так, для гидропривода голени получим

$$G_3 = \sqrt{L_4^2 + L_5^2 - 2L_4L_5 \cos \alpha_6},$$

где $\alpha_6 = 180^\circ - \alpha_4 - \alpha_5$; L_4, L_5, α_5 — конструкционные параметры; α_4 — угол подъема голени.

Уравнение для величины выдвигания штока гидропривода бедра выглядит аналогично.

В качестве примера на рис. 7 показаны графики выдвигания штоков гидроприводов бедра и голени для конечности, ориентированной в направлении вектора скорости платформы. Графики слева соответствуют поступательному перемещению платформы машины в исходного положения влево, затем вправо и снова влево, в исходное положение. Графики справа соответствуют движению платформы из исходного положения вверх, затем вниз и снова вверх, в исходное положение.

Отметим, что данные о динамике выдвигания штоков гидроприводов, рассчитанные на компьютерной модели, могут быть непосредственно использованы для управления движением механического макета машины в режиме следящего привода.

Область достижимости ступни робота

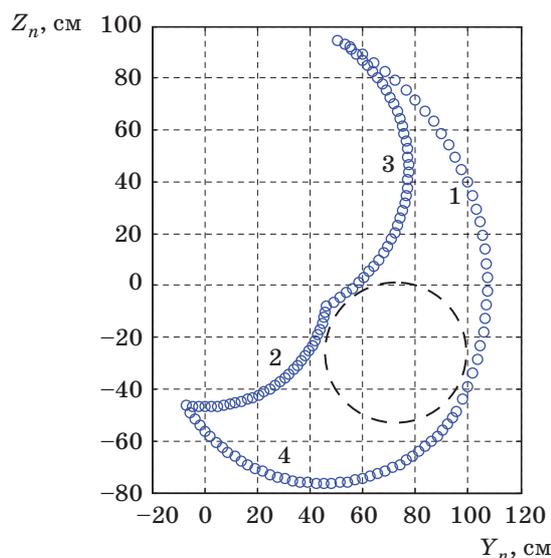
Одной из задач, возникающих на кинематическом уровне, является задача построения области достижимости для ступни ноги робота. Область достижимости ступни определяется длинами звеньев ноги (длиной бедра и голени), а также допустимыми углами отклонения, указанными выше.

Углы α_1 и α_4 (см. рис. 2) задают возможные движения ступни в плоскости ноги. Границы допустимой области в этой плоскости могут быть получены путем поочередного закрепления одного из углов в предельном положении и варьирования второго угла в рамках допустимых значений (рис. 8).

Область достижимости ступни в плоскости ноги представляет собой криволинейный четырехугольник, стороны которого — дуги окружностей. Рассмотрим эти окружности.

Дуга 1 представляет собой траекторию ступни при повороте максимально выпрямленной ноги (угол между бедром и голенью $\alpha_4 = 170^\circ$) вокруг оси X_n в пределах допустимых значений α_1 . Центр соответствующей окружности $Y_n^2 + Z_n^2 = R_1^2$ будет лежать в начале координат, а ее радиус

$$R_1 = \sqrt{L_1^2 + L_2^2 - 2L_1L_2 \cos \alpha_4} = \sqrt{48^2 + 60^2 - 2 \cdot 48 \cdot 60 \cdot \cos 170^\circ} \approx 107,6 \text{ см.}$$



■ Рис. 8. Разрез области достижимости ступни

Дуга 2 представляет собой траекторию ступни при повороте максимально согнутой ноги (угол между бедром и голенью $\alpha_4 = 50^\circ$) вокруг оси X_n в пределах допустимых значений α_1 . Центр соответствующей окружности $Y_n^2 + Z_n^2 = R_2^2$ также будет лежать в начале координат, а ее радиус

$$R_2 = \sqrt{48^2 + 60^2 - 2 \cdot 48 \cdot 60 \cdot \cos 50^\circ} \approx 46,92 \text{ см.}$$

Дуга 3 представляет собой траекторию ступни при сгибании максимально поднятой ноги (угол подъема бедра $\alpha_1 = 70^\circ$) в пределах допустимых значений α_4 . Центр соответствующей окружности $(Y_n - Y_{n3})^2 + (Z_n - Z_{n3})^2 = L_2^2$ является точкой расположения колена при максимально поднятом бедре $Y_{n3} = L_1 \cos 70^\circ \approx 16,42$ см, $Z_{n3} = L_1 \sin 70^\circ \approx 45,11$ см, а ее радиус будет равен L_2 .

Дуга 4 представляет собой траекторию ступни при сгибании максимально опущенной ноги (угол подъема бедра $\alpha_1 = -20^\circ$) в пределах допустимых значений α_4 . Центр соответствующей окружности $(Y_n - Y_{n4})^2 + (Z_n - Z_{n4})^2 = L_2^2$ является точкой расположения колена при максималь-

но опущенном бедре $Y_{n4} = L_1 \cos(-20^\circ) \approx 45,11$ см, $Z_{n4} = L_1 \sin(-20^\circ) \approx -16,42$ см, а ее радиус будет равен L_2 .

Полная область достижимости ступни в трехмерном пространстве образуется поворотом полученного криволинейного четырехугольника вокруг вертикальной оси в пределах допустимых значений α_3 .

Живые организмы при перемещении почти никогда не используют всю область достижимости конечностей. Движение происходит в зоне, наиболее удобной для согласования рабочих и холостых перемещений конечностей и оптимальной с энергетических позиций. В качестве такой зоны в модели машины могут быть приняты сфера или эллипсоид максимального радиуса, вписанные в трехмерную область достижимости (вертикальный разрез такой сферы показан пунктиром на рис. 8). Перемещение стопы прекращается при достижении поверхности сферы. Центр сферы является точкой, в которой находятся стопы работа перед началом перемещения, и конечной точкой положения стоп при завершении движения в заданном направлении. Холостой перенос ног может выполняться по поверхности сферы.

Заключение

Получена кинематическая модель шестиногого шагающего робота в виде системы уравнений. Для организации моделирования различных движений робота построена система разностных уравнений. Найдены уравнения, связывающие величины выдвигания штоков гидроприводов и углы расположения конечности. Построена область достижимости ступни робота и найдены ее аналитические границы. Выполнена реализация полученной кинематической модели в пакете MatLab.

На следующем этапе работы предполагается рассмотреть динамические задачи управления движением шестиногого шагающего робота, а также задачи формирования походок и интеллектуализации управления при движении по сложному рельефу.

Литература

1. Игнатъев М. Б. Кибернетическая картина мира. Теория сложных систем. — СПб.: ГУАП, 2011. — 448 с.
2. Охоцимский Д. Е., Голубев Ю. Ф. Механика и управление движением автоматического шагающего аппарата. — М.: Наука, 1984. — 310 с.
3. Охоцимский Д. Е., Платонов А. К., Кирильченко А. А., Лапшин В. В. Шагающие машины: пре-

принт. — М.: ИПМ АН СССР, 1989. № 87. — 36 с.

4. Ларин В. Б. Управление шагающим аппаратом. — Киев: Наукова думка, 1980. — 168 с.
5. Vukobratović M. Legged Locomotion Robots and Anthropomorphic Mechanisms. — Mihailo Pupin Institute, 1975. — 541 p.
6. Ignatev M. B., Kulakov F. M., Mikhailov V. V., Jurevitch E. I. Control Algorithms of Adaptive Walking Machine // Proc. of the 4th Symp. on Autom. Contr.

in Space, Dubrovnik, 6–10 September 1971. Beograd, 1971. P. 175–184.

7. Ястребов В. С., Игнатьев М. Б., Кулаков Ф. М., Михайлов В. В. Подводные роботы. — Л.: Судостроение, 1977. — 368 с.

8. Лапшин В. В. Механика и управление движением шагающих машин. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2012. — 199 с.

9. Павловский В. Е. О разработках шагающих машин: препринт. — М.: ИПМ РАН, 2013. № 101. — 32 с.

UDC 621.865.8

doi:10.15217/issn1684-8853.2015.6.50

Kinematic Modeling of a Walking Machine

Mikhailov V. V.^a, Dr. Sc., Tech., Professor, mwwcari@gmail.com

Solov'eva T. N.^b, PhD, Tech., Associate Professor, al2tn@yandex.ru

Popov V. P.^b, PhD, Tech., Associate Professor, valery-popov2009@yandex.ru

^aSaint-Petersburg Institute for Informatics and Automation of RAS, 39, 14 Line, V. O., 199178, Saint-Petersburg, Russian Federation

^bSaint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67, B. Morskaja St., 190000, Saint-Petersburg, Russian Federation

Purpose: Developing control systems for walking machines requires their kinematic and dynamic models. The goal of this research is the development of a kinematic model for an active dummy of a hexapod walking machine, getting a visual representation of its movement in space. **Results:** A mathematical description is suggested for a kinematic model of a hexapod as systems of equations to determine the coordinates of the machine units with preset angles between the limb links. A system of difference equations has been obtained which allows you to model the robot motion, controlled by velocity vector. On the base of the model, various types of robot motion were simulated in MATLAB software package. Angles of the robot's limbs are operated via hydraulic drives, and special equations were obtained which determine the relation between the drive rod positions and the angles. To evaluate the robot locomotion ability, the area of its foot reachability was built, and the analytical bounds of that area were specified. **Practical relevance:** The developed model can be used as a basis for a dynamical model when designing and approving the robot motion control algorithms, and for robot dummy control in the follow-up drive mode.

Keywords — Hexapod Robot, Walking Machine, Kinematic Model, Reachability Area, Control by Velocity Vector.

References

1. Ignatev M. B. *Kiberneticheskaja kartina mira. Teoria slozhnykh system* [Cybernetic Picture of the World. Complicated Systems' Theory]. Saint-Petersburg, GUAP Publ., 2011. 448 p. (In Russian).
2. Okhotsimsky D. E., Golubev Iu. F. *Mekhanika i upravlenie dvizheniem avtomaticheskogo shagaiushchego apparata* [Mechanics and Motion Control of an Automatic Walking System]. Moscow, Nauka Publ., 1984. 310 p. (In Russian).
3. Okhotsimsky D. E., Platonov A. K., Cirilchenko A. A., Lapshin V. V. *Shagaiushchie mashiny* [Walking Machines]. Moscow, IPM AN SSSR Publ., 1989, no. 87. 36 p. Preprint (In Russian).
4. Larin V. B. *Upravlenie shagaiushchim apparatom* [Control of Walking Machine]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1980. 168 p. (In Russian).
5. Vukobratović M. *Legged Locomotion Robots and Anthropomorphic Mechanisms*. Mihailo Pupin Institute, 1974. 541 p.
6. Ignatev M. B., Kulakov F. M., Mikhailov V. V., Jurevitch E. I. Control Algorithms of Adaptive Walking Machine. *Proc. 4th Symp. on Autom. Contr. in Space*. Dubrovnik, 1971. P. 175–184.
7. Yastrebov V. S., Ignatev M. B., Kulakov F. M., Mikhailov V. V. *Podvodnye roboty* [Underwater Robots]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1977. 368 p. (In Russian).
8. Lapshin V. V. *Mekhanika i upravlenie dvizheniem shagaiushchih mashin* [Mechanics and Motion Control of Walking Machines]. Moscow, Moskovskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet imeni N. E. Baumana Publ., 2012. 199 p. (In Russian).
9. Pavlovskij V. E. *O razrabotkah shagaiushchih mashin* [About Walking Machines' Development]. Moscow, IPM RAN Publ., 2013, no. 101. 32 p. Preprint (In Russian).