

Алгоритмы планирования движений шестиногого шагающего аппарата

В. М. БУДАНОВ

Московский государственный университет
им. М. В. Ломоносова
e-mail: budanov@imec.msu.ru

УДК 621.865.8.001

Ключевые слова: шагающая машина, планирование движения.

Аннотация

В работе рассматриваются алгоритмы планирования движения шагающей машины в условиях сложной местности. Применение параметров Родрига—Гамильтона для описания ориентации корпуса позволило создать алгоритмы планирования движения корпуса и ног в абсолютной системе координат с автоматической адаптацией к поверхности. Работоспособность и эффективность разработанного алгоритмического обеспечения подтверждена экспериментально при управлении лабораторным макетом шагающей машины.

Abstract

V. M. Budanov, Algorithms of motion planning for a six-legged walking machine, Fundamentalnaya i prikladnaya matematika, vol. 11 (2005), no. 7, pp. 197–206.

The paper is addressed to investigation of algorithms of motion planning for the six-legged walking machine over complex terrain. Application of Rodrigues—Hamilton parameters for description of orientation of the body give, possibility to develop algorithms of motion planning for the body and legs in absolute coordinate frame with automatic adaptation to the surface. Experiments with a laboratory scale walking machine have demonstrated efficiency of proposed algorithms.

Введение

Исследованием проблем построения адаптивных шагающих машин и управления их движением занимаются многие научные коллективы в России и за рубежом. Интерес к этому направлению объясняется тем, что по сравнению с традиционными колёсными и гусеничными машинами шагающая обладает принципиально лучшими характеристиками по проходимости как при ходьбе по слабым грунтам, так и при перемещении по поверхности со сложным рельефом. Современный уровень технологии и вычислительной техники позволяет строить не только лабораторные макеты [1, 6, 9, 11, 13], но и крупномасштабные машины [12], которые могут служить прототипами шагающих машин для выполнения конкретных технологических операций на сложной местности.

Фундаментальная и прикладная математика, 2005, том 11, № 7, с. 197—206.

© 2005 Центр новых информационных технологий МГУ,
Издательский дом «Открытые системы»

Шагающие машины являются сложными механическими системами с большим количеством управляемых степеней свободы. Каждая нога должна иметь как минимум три привода, чтобы обеспечить возможность поместить стопу в произвольную точку в трёхмерном пространстве, естественно в пределах некоторой рабочей зоны, определяемой конструкцией ноги. Таким образом, шестиногая шагающая машина должна иметь 18 приводов. Система управления должна быть построена так, чтобы обеспечить координированное движение всех ног, обеспечивающее заданное движение корпуса. Следует отметить то обстоятельство, что задача планирования движения корпуса может решаться едиными методами для мобильных роботов любого типа: колёсных, гусеничных или шагающих. Специфичной для шагающей машины является задача планирования движений ног. С одной стороны, шагающая машина обладает лучшей проходимостью благодаря тому, что для её перемещения необходимы дискретные опорные точки, а не непрерывная колея. С другой стороны, необходимы специальные алгоритмы поиска этих опорных точек.

В настоящее время имеется несколько подходов к построению систем управления шагающими машинами. Используются принципы централизованного и децентрализованного управления, традиционные методы вычислений и нейроноподобные вычислительные структуры. Мы не будем рассматривать здесь простые алгоритмы, когда управление осуществляется отдельными приводами или движением корпуса и отдельных ног попеременно. Перспективными являются полностью автоматический и супервизорный способы управления. В последнем случае оператор управляет шагающей машиной подобно водителю автомобиля, задавая компоненты линейной и угловой скоростей движения корпуса, а движения ног автоматически вычисляются системой управления.

Исторически первая удачная реализация супервизорного управления [1, 6, 9] базировалась на понятии «шаговый цикл» как некоторой стандартной периодической во времени траектории стопы ноги относительно корпуса. Сдвиг шаговых циклов по фазе для различных ног позволяет реализовать различные походки, а геометрические деформации — изменение скорости и направления движения. Этот подход остаётся доминирующим в научных исследованиях ходьбы насекомых и построении систем управления для множества шагающих аппаратов, созданных в мире в последнее время [5, 8, 13].

Серьёзным недостатком этого подхода является использование при планировании движения только системы координат, жёстко связанной с корпусом. При этом теряется информация о движении в абсолютном пространстве, что делает затруднительным адаптацию алгоритмов для ситуаций, когда требуется планирование движения корпуса, в частности при движении по сложной местности при наличии карты высот, заданной априори или генерируемой в процессе движения на основе зрительной или дальнометрической информации.

В настоящей статье излагается иной алгоритмический подход [4, 7], основная идея которого состоит в планировании движения корпуса и стоп в абсолютной системе координат с дальнейшим пересчётом траекторий стоп в свя-

занную систему. Это потребовало привлечения аппарата описания движений корпуса шагающей машины как твёрдого тела и, прежде всего, его ориентации [2].

1. Описание движения корпуса

На рис. 1 схематически представлена шагающая машина с используемой нумерацией ног и двумя системами координат: абсолютной системой $C\xi_1\xi_2\xi_3$ и системой $Ox_1x_2x_3$, жёстко связанной с корпусом шагающей машины. Положение начальной точки O связанной системы по отношению к абсолютной системе задаётся вектором \mathbf{Q} .

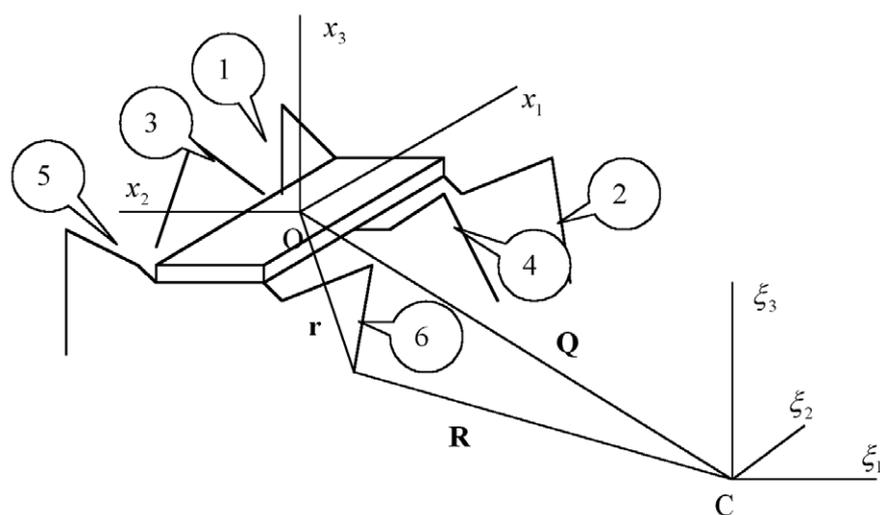


Рис. 1

Ориентация корпуса шагающей машины, как любого твёрдого тела, может быть описана несколькими способами. Наиболее распространёнными параметрами, используемыми для описания ориентации твёрдого тела относительно неподвижной системы координат, являются [2]: 1) углы Эйлера, 2) углы Эйлера—Крылова, 3) параметры Родрига—Гамильтона и 4) комплексные параметры Кели—Клейна. Первые две группы параметров, применительно к описанию движения шагающей машины, обладают двумя серьёзными недостатками. Во-первых, существуют вырожденные ситуации, при которых по матрице направляющих косинусов может быть восстановлена лишь сумма или разность двух углов, что означает бесконечное число решений. Во-вторых, работа с углами

Эйлера или Эйлера—Крылова требует большого объёма вычислений тригонометрических функций, что является существенным при управлении в реальном времени. Параметры Кели—Клейна могут быть представлены как комплексные комбинации параметров Родрига—Гамильтона, таким образом, эти два описания являются эквивалентными. Поэтому остановимся на параметрах Родрига—Гамильтона, имеющих простую геометрическую интерпретацию и не требующих работы с комплексными числами. При этом ориентация задаётся скалярной величиной λ_0 и трёхкомпонентным вектором $\Lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$, вводимых следующим образом:

$$\lambda_0 = \cos \frac{\chi}{2}, \quad \Lambda = \mathbf{n} \sin \frac{\chi}{2}, \quad (1)$$

где \mathbf{n} есть единичный вектор оси конечного поворота из абсолютной в связанную систему координат, а χ — величина угла конечного поворота. Будем использовать также общее обозначение $\mathbf{\Lambda}$ для пары (λ_0, Λ) . Четыре компоненты вектора $\mathbf{\Lambda}$ не являются независимыми и удовлетворяют условию нормализации $\lambda_0^2 + (\Lambda\Lambda) = 1$ по определению (1).

Таким образом, семикомпонентный вектор $\Theta = (\mathbf{Q}, \mathbf{\Lambda})$ определяет положение и ориентацию корпуса шагающей машины в абсолютной системе координат. Если компоненты этого вектора заданы, то преобразования координат из абсолютной системы в относительную и обратно определяются следующим образом:

$$\mathbf{r} = \Phi^T (\mathbf{R} - \mathbf{Q}), \quad (2)$$

$$\mathbf{R} = \mathbf{Q} + \Phi \mathbf{r}, \quad (3)$$

где \mathbf{R} , \mathbf{r} — векторы, представляющие произвольную точку в абсолютной и относительной системах, Φ — матрица направляющих косинусов, выражаемая через параметры λ_0 , Λ :

$$\Phi = \begin{pmatrix} 2\lambda_0^2 - 1 + 2\lambda_1^2 & 2(\lambda_1\lambda_2 - \lambda_0\lambda_3) & 2(\lambda_1\lambda_3 + \lambda_0\lambda_2) \\ 2(\lambda_1\lambda_2 + \lambda_0\lambda_3) & 2\lambda_0^2 - 1 + 2\lambda_2^2 & 2(\lambda_3\lambda_2 - \lambda_0\lambda_1) \\ 2(\lambda_1\lambda_3 - \lambda_0\lambda_2) & 2(\lambda_3\lambda_2 + \lambda_0\lambda_1) & 2\lambda_0^2 - 1 + 2\lambda_3^2 \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Семь компонент вектора Θ вычисляются как функции времени из следующей системы дифференциальных уравнений, интегрируемой в реальном времени:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{Q}} &= \mathbf{V}, \\ 2\dot{\lambda}_0 &= -(\Lambda\Omega), \\ 2\dot{\Lambda} &= \lambda_0\Omega + \Omega \times \Lambda, \end{aligned} \quad (5)$$

где \mathbf{V} , Ω — трёхкомпонентные векторы линейной и угловой скоростей корпуса в абсолютной системе. В предлагаемом алгоритме управления оператор задаёт три компоненты V_1 , V_2 , Ω_3 (две горизонтальные компоненты линейной скорости и угловую скорость вращения вокруг вертикальной оси), а остальные три компоненты вычисляются автоматически так, чтобы обеспечить адаптацию расположения корпуса по отношению к поверхности. Алгоритм вычисления излагается ниже, в разделе 3. Здесь приведём известное правило вычисления суммы

$\Lambda = (\lambda_0, \Lambda)$ двух конечных поворотов $\mathbf{A} = (\alpha_0, A)$ и $\mathbf{B} = (\beta_0, B)$, обозначаемой обычно $\Lambda = \mathbf{A} \circ \mathbf{B}$:

$$\begin{aligned} \lambda_0 &= \alpha_0 \beta_0 - (AB), \\ \Lambda &= \alpha_0 B + \beta_0 A + A \times B. \end{aligned}$$

2. Походка и следовые точки

Походка шагающей машины определяется временным расписанием для последовательности чередования фаз опоры и переноса для всех ног [3, 10]. Если временное расписание заранее задано и периодически, то соответствующая походка называется периодической. Примером является походка «трёшками», когда тройки ног (1, 4, 5) и (2, 3, 6) на рис. 1 двигаются синхронно. Если временное расписание формируется в зависимости от ситуации, то такая походка называется свободной. Исследованию походок посвящена значительная часть работы [3]. В настоящей работе мы не будем касаться этого вопроса и ограничимся рассмотрением только походки «трёшками». Отметим лишь, что для многоногого шагающего аппарата число возможных периодических походок весьма велико. Даже для простейшего случая поочередной походки, когда в каждый момент времени в фазе переноса может находиться не более одной ноги, число вариантов походки для шестиногого аппарата равно $5! = 120$.

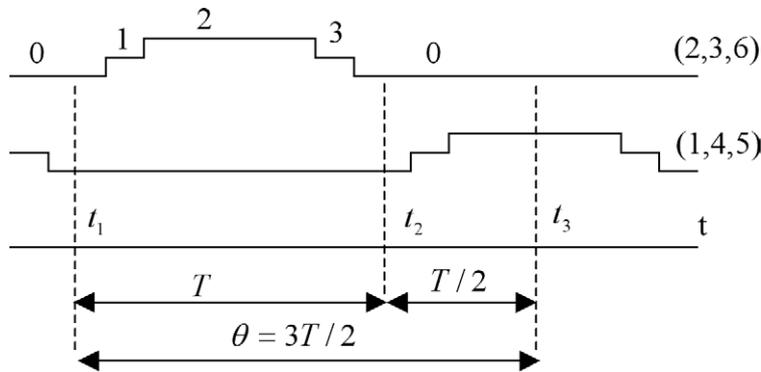


Рис. 2

Временное расписание для походки «трёшками» представлено на рис. 2. Фазы движения для «трёшек» (1, 4, 5) и (2, 3, 6) обозначены следующим образом: 0 — опора, 1 — движение вверх, 2 — движение к новой позиции, 3 — опускание. Без ограничения общности будем рассматривать ситуацию, когда «трёшка» (2, 3, 6) осуществляет перенос, а ноги «трёшки» (1, 4, 5) находятся в опорной

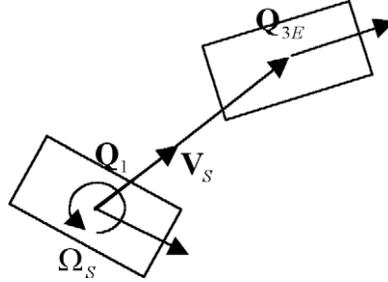


Рис. 3

фазе. Рассмотрим три момента времени: t_1 , t_2 — середины текущей и последующей фаз совместной опоры, t_3 — середина ближайшей опорной фазы для трёшки (2, 3, 6) относительно момента t_1 . Введём также обозначения $T = t_2 - t_1$ и $\theta = t_3 - t_1 = 3T/2$.

Алгоритм поиска следовых точек схематически иллюстрируется рисунками 3, 4. Он основан на предположении, что сигналы управления $\mathbf{V}_S = (V_1, V_2, 0)$, $\mathbf{\Omega}_S = (0, 0, \Omega_3)$, задаваемые оператором, существенно не изменяются в течение одного шага. В этом случае, зная положение и ориентацию корпуса ($\mathbf{Q}_1, \mathbf{\Lambda}_1$) в момент t_1 , можно оценить его положение и ориентацию ($\mathbf{Q}_{3E}, \mathbf{\Lambda}_{3E}$) в момент времени t_3 (рис. 3):

$$\begin{aligned} \mathbf{Q}_{3E} &= \mathbf{Q}_1 + \mathbf{V}_S \theta, \\ \mathbf{\Lambda}_{3S} &= \left(\cos \frac{\Omega_3 \theta}{2}, 0, 0, \sin \frac{\Omega_3 \theta}{2} \right), \\ \mathbf{\Lambda}_{3E} &= \mathbf{\Lambda}_{3S} \circ \mathbf{\Lambda}_1, \end{aligned} \quad (6)$$

где $\mathbf{\Lambda}_{3S}$ определяет конечный поворот вокруг вертикальной оси за промежуток времени θ . Используя (4), можно вычислить также матрицу направляющих косинусов $\mathbf{\Phi}_{3E}$, соответствующую $\mathbf{\Lambda}_{3E}$.

Потребуем, чтобы в момент времени t_3 стопы ног рассматриваемой «трёшки» находились вблизи некоторых средних положений внутри своих рабочих областей. Эти положения заранее заданы векторами \mathbf{r}_{0k} , $k = 1, \dots, 6$, в связанной системе координат. С использованием формулы преобразования координат (3) желаемые положения стоп для момента t_3 пересчитываются в абсолютную систему координат:

$$\mathbf{E}_k = \mathbf{Q}_{3E} + \mathbf{\Phi}_{3E} \mathbf{r}_{0k}, \quad k = (2, 3, 6), \quad (7)$$

и рассматриваются как первое приближение для следовых точек (рис. 4 а). Окончательно следовые точки \mathbf{R}_k получаются из \mathbf{E}_k путём коррекции вертикальной составляющей с использованием карты высот, а также коррекции в горизонтальной плоскости, если полученная точка на поверхности является неудобной для постановки ноги, например лежит на ребре ступени. В настоящее время в экспериментах используется известная карта поверхности, и начальная

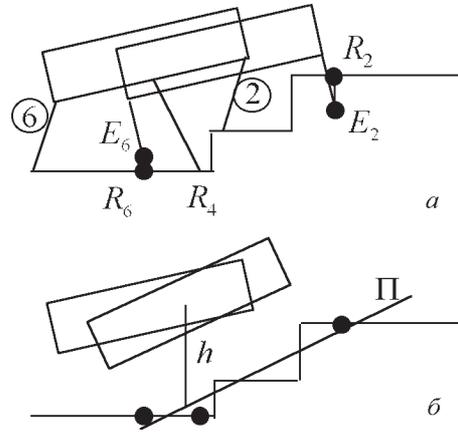


Рис. 4

позиция шагающего аппарата также известна. В будущем предполагается вычислять локальную карту, используя систему технического зрения.

3. Планирование движения корпуса

Новые следовые точки для «трёшки» (2, 3, 6) совместно со старыми для (1, 4, 5) образуют набор из шести следовых точек $\{\mathbf{R}_k = (\xi_k, \eta_k, \zeta_k), k = 1, \dots, 6\}$ в абсолютной системе координат. В момент времени t_2 в фазе совместной опоры все эти точки будут использоваться одновременно. Поэтому момент t_2 удобен для планирования движения корпуса. Используя T вместо θ в соотношениях (6), определим приближения для позиции $\mathbf{Q}_{2E} = (q_{21}, q_{22}, q_{23})$ и ориентации $\mathbf{\Lambda}_{2E}$ корпуса в момент t_2 , а также соответствующую матрицу направляющих косинусов $\mathbf{\Phi}_{2E}$. Введём в рассмотрение локальные координаты следовых точек

$$u_k = \xi_k - q_{21}, \quad v_k = \eta_k - q_{22}, \quad w_k = \zeta_k$$

и найдём локальную плоскость Π (рис. 4 б)

$$w = w_0 + au + bv, \tag{8}$$

удовлетворяющую критерию наименьших квадратов

$$F = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N (w_0 + au_k + bv_k - w_k)^2 \rightarrow \min, \quad N = 6,$$

по отношению к искомым параметрам w_0, a, b . Искомое решение должно удовлетворять следующей системе линейных уравнений:

$$\begin{aligned}\frac{\partial F}{\partial w_0} &= Nw_0 + a \sum u_k + b \sum v_k - \sum w_k = 0, \\ \frac{\partial F}{\partial a} &= w_0 \sum u_k + a \sum u_k^2 + b \sum u_k v_k - \sum u_k w_k = 0, \\ \frac{\partial F}{\partial b} &= w_0 \sum v_k + a \sum u_k v_k + b \sum v_k^2 - \sum v_k w_k = 0,\end{aligned}$$

которая в очевидных обозначениях записывается в виде

$$\begin{pmatrix} 1 & m_u & m_v \\ m_u & \sigma_{uu} & \sigma_{uv} \\ m_v & \sigma_{uv} & \sigma_{vv} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} w_0 \\ a \\ b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m_w \\ \sigma_{uw} \\ \sigma_{vw} \end{pmatrix}.$$

Эта система имеет единственное решение, если все шесть точек не принадлежат одной прямой линии, что является разумным условием для решаемой задачи.

Теперь мы можем определить желаемое положение \mathbf{Q}_2 и ориентацию $\mathbf{\Lambda}_2$ корпуса, исходя из следующих требований.

1. Центр корпуса находится на заданной высоте h над локальной плоскостью Π .
2. Строительная плоскость корпуса параллельна локальной плоскости.
3. Единичные векторы оси Ox_1 для желаемой ориентации $\mathbf{\Lambda}_2$ и её оценки $\mathbf{\Lambda}_{2E}$ принадлежат одной вертикальной плоскости.

Первое требование определяет положение

$$\mathbf{Q}_2 = (q_{21}, q_{22}, w_0 + h). \quad (9)$$

В соответствии с требованиями 2, 3 три единичных вектора $\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \mathbf{e}_3$ связанной системы вычисляются через единичный вектор $\mathbf{s} = \Phi_{2E}\xi_1$ оси Ox_1 для оценки ориентации и нормальный вектор $\mathbf{m} = (1, -a, -b)$ локальной плоскости (8):

$$\mathbf{e}_3 = \frac{\mathbf{m}}{|\mathbf{m}|}, \quad \mathbf{e}_2 = \frac{\mathbf{m} \times \mathbf{s}}{|\mathbf{m} \times \mathbf{s}|}, \quad \mathbf{e}_1 = \mathbf{e}_2 \times \mathbf{e}_3.$$

Эти три вектора образуют желаемую матрицу направляющих косинусов Φ_2 . Соответствующие параметры $\mathbf{\Lambda}_2$ могут быть легко найдены из (4), что позволяет найти конечный поворот $\mathbf{\Gamma} = (\gamma_0, \Gamma)$ от ориентации $\mathbf{\Lambda}_1$ к $\mathbf{\Lambda}_2$:

$$\mathbf{\Gamma} = \mathbf{\Lambda}_2 \circ \mathbf{\Lambda}_1^*,$$

где $*$ означает обратный знак векторной части пары (λ_0, λ) . Наконец, вычисляются единичный вектор и угол конечного поворота:

$$\mathbf{n} = \frac{\Gamma}{|\Gamma|}, \quad \chi = 2 \arctg \frac{|\Gamma|}{\gamma_0},$$

а также векторы линейной и угловой скоростей, которые обеспечивают изменение положения и ориентации корпуса между моментами времени t_1 и t_2 :

$$\mathbf{V}_E = \frac{\mathbf{Q}_2 - \mathbf{Q}_1}{T}, \quad \mathbf{\Omega}_E = \mathbf{n} \frac{\chi}{T}.$$

Из цепочки вычислений очевидно, что первые две компоненты вектора \mathbf{V}_E совпадают с соответствующими компонентами вектора управления \mathbf{V}_S . Вертикальная компонента угловой скорости Ω_{E3} в общем случае не совпадает с Ω_3 , но разница между ними мала при разумных углах наклона корпуса. Это позволяет задать входные данные для уравнений (5) в следующем виде:

$$\mathbf{V} = (V_1, V_2, V_{E3}), \quad \boldsymbol{\Omega} = (\Omega_{E1}, \Omega_{E2}, \Omega_3),$$

где V_1, V_2, Ω_3 — непрерывные командные сигналы оператора, $V_{E3}, \Omega_{E1}, \Omega_{E2}$ — компоненты, которые вычисляются на каждом полушаге и обеспечивают адаптацию корпуса к поверхности. Интегрирование в реальном времени уравнений (5) даёт семь компонент вектора $\Theta = (\mathbf{Q}, \boldsymbol{\Lambda})$, представляющего положение и ориентацию корпуса в абсолютной системе координат, в виде непрерывных функций времени.

Траектория движения для стопы каждой ноги, находящейся в фазе переноса, строится в абсолютных осях и в соответствии с временным расписанием (см. рис. 2) состоит из трёх участков: 1) вертикальный подъём из текущей следовой точки до высоты, обеспечивающей отсутствие контакта с поверхностью при переносе, 2) движение по горизонтальной линии к следующей следовой точке, 3) вертикальное опускание в новую следовую точку. Траектории считаются в реальном времени и пересчитываются в связанную систему координат по формуле (2) для последующего вычисления межзвенных углов и их отработки следящими приводами. Отметим, что формула пересчёта (2) используется как для фазы опоры, так и для фазы переноса. Отличие состоит в том, что в качестве \mathbf{R} для фазы опоры используется постоянный вектор, задающий следовую точку в абсолютной системе, а в фазе переноса — переменный вектор, представляющий траекторию движения к следующей следовой точке.

4. Экспериментальные результаты и выводы

Описанный алгоритм был использован в экспериментальном комплексе, включающем лабораторный макет шагающей машины [1, 6, 9], персональный компьютер и устройство, обеспечивающее интерфейс между ними. Разработанное программное обеспечение позволяет в реальном времени управлять шагающим аппаратом или имитировать его движение на экране монитора.

Для режима моделирования созданы средства для генерации поверхностей, визуализации движения с контролем положения центра масс аппарата и выполнения кинематических ограничений. Режим имитации использовался для настройки параметров, оценки допустимых задаваемых скоростей движения и т. д.

В качестве экспериментальной поверхности использована лестница общей длиной около трёх метров, состоящая из участков подъёма и опускания, соединённых горизонтальной площадкой. Представленный алгоритм позволяет оператору управлять шагающим аппаратом в помощью джойстика, задавая движение

по лестнице в любом направлении с одновременным вращением вокруг вертикальной оси.

Работа выполнена при поддержке грантов НШ-1835.2003.1 и РФФИ 04-01-00105.

Литература

- [1] Гурфинкель В. С., Гурфинкель Е. В., Девянин Е. А., Ефремов Е. В., Жихарев Д. Н., Ленский А. В., Шнейдер А. Ю., Штильман Л. Г. Макет шестиногого шагающего аппарата с супервизорным управлением // Исследование робототехнических систем. — М.: Наука, 1982. — С. 98—147.
- [2] Лурье А. И. Аналитическая механика. — М.: Физматгиз, 1961.
- [3] Охоцимский Д. Е., Голубев Ю. Ф. Механика и управление движением автоматического шагающего аппарата. — М.: Наука, 1984.
- [4] Budanov V. Control algorithm for hexapod with adaptation of its body // Proc. 2nd Int. Conf. on Climbing and Walking Robots. 1999, UK, Portsmouth. — P. 93—99.
- [5] Cruse H., Kindermann Th., Shuman M., Dean J., Schmitz J. Walknet as a biologically inspired network to control six-legged walking // Neural Network. — 1998. — Vol. 11. — P. 1435—1447.
- [6] Devjanin E. A. et al. The six-legged walking robot capable of terrain adaptation // Mechanism and Machine Theory. — 1983. — Vol. 18. — P. 257—260.
- [7] Devjanin E. A., Budanov V. M. Motion control for the six-legged walking machine // Proc. Euromech 375 «Biology and Technology of Walking». Munich, Germany, 1998. — P. 101—107.
- [8] Gorinevsky D. M., Schneider A. Yu. Force control in locomotion of legged vehicles over rigid and soft surfaces // Int. J. Robotics Research. — 1990. — Vol. 9, no. 2. — P. 4—23.
- [9] Gurfinkel V. S. et al. Walking robot with supervisory control // Mechanism and Machine Theory. — 1981. — Vol. 16. — P. 31—36.
- [10] McGhee R. B. Some finite state aspects of legged locomotion // Math. Biosci. — 1968. — Vol. 2, no. 1, 2.
- [11] Pfeiffer F. et al. Six-legged technical walking considering biological principles // Robotics and Autonomous Systems. — 1995. — No. 14. — P. 223—232.
- [12] Waldron K. J. et al. Configuration design of adaptive suspension vehicle // Int. J. Robotics Research. — 1984. — No. 2.
- [13] Zielinska T., Heng K. H. Development of walking machine: Mechanical design and control problems // Mechatronics: The Science of Intelligent Machines. — 2002. — Vol. 12, no. 5. — P. 737—754.