

ГЕОМЕТРИЯ ДВИЖЕНИЯ РОБОТА ВЫСОКОЙ ПРОХОДИМОСТИ ПРИ ПРОСТРАНСТВЕННОМ ДВИЖЕНИИ ПО НЕРОВНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Грибов Е.А., Гавриленко А.Б., Грибова О.В.

Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва

Ключевые слова: мобильный робот, условия безотрывного движения, движение по неровной поверхности, ровер, взаимодействие колес с опорной поверхностью, подвеска «коромысло-качалка», высокая проходимость.

Аннотация. В данной статье представлено математическое моделирование геометрии движения мобильной платформы с подвеской «коромысло-качалка» при ее пространственном перемещении по неровной поверхности. Роботы, оснащенные такого типа подвеской, имеют высокую проходимость по сравнению с подвеской автомобильного типа. Цель работы – построение математической модели, связывающей обобщенные координаты системы при непрерывном движении робота по опорной поверхности, заданной уравнением. Построенная математическая модель пространственного движения робота описывается 18 нелинейными алгебраическими уравнениями, содержащими 12 неизвестных координат точек контакта и 10 обобщенных координат – координат и углов ориентации корпуса робота, а также углов поворота элементов подвески. В частных случаях движения робота по горизонтальной и наклонной плоскостям получены решения уравнений геометрии движения относительно координат и углов ориентации корпуса робота, а также углов, определяющих конфигурацию элементов подвески. Отмечено, что для более сложных криволинейных опорных поверхностей конфигурация робота с шасси типа «коромысло-качалка» может быть определена с помощью численного решения нелинейных алгебраических уравнений геометрии движения. Результаты работы могут быть использованы при разработке систем управления движением робота, обладающего высокой проходимостью, и планировании оптимальных траекторий его движения.

GEOMETRY OF HIGH-MOBILITY ROBOT MOTION DURING SPATIAL MOVEMENT ON AN UNEVEN SURFACE

Gribov E.A., Gavrilenko A.B., Gribova O.V.

National Research University “Moscow Power Engineering Institute”, Moscow

Keywords: mobile robot, continuous motion conditions, motion on uneven terrain, rover, wheel-ground interaction, rocker-bogie suspension, high cross-country ability.

Abstract. This article presents a mathematical modeling of the motion geometry of a mobile platform with a rocker arm suspension during its spatial movement over an uneven surface. Robots equipped with this type of suspension have a high cross-country capability compared to an automobile-type suspension. The purpose of the work is to build a mathematical model that relates the generalized coordinates of the system during continuous movement of the robot along the support surface specified by the equation. The constructed mathematical model of the spatial motion of the robot is described by 18 nonlinear algebraic equations containing 12 unknown coordinates of the contact points and 10 generalized coordinates: coordinates and angles of orientation of the robot body, as well as angles of rotation of the suspension elements. In particular cases of robot movement along horizontal and inclined planes, solutions of the equations of motion geometry with respect to the coordinates and orientation angles of the robot body, as well as the angles determining the configuration of the suspension elements, are obtained. It was noted that for more complex curvilinear surfaces, the configuration of a robot with a rocker-bogie chassis could be determined by numerically solving nonlinear algebraic equations of motion geometry. The results of the work can be used in the development of motion control systems for a robot with high cross-country capability and planning optimal trajectories of its movement.

Введение

В настоящее время исследования геометрии и кинематики для роботов с подвеской «коромысло-качалка» (rocker-bogie) вызывают большой научный и практический интерес. Актуальность исследований таких роботов, вызвана возможностью их широкого применения в качестве роботов, обладающих высокой проходимостью, в том числе марсоходов и т.д. (рис. 1).

Относительно новый вид подвески, Rocker-Bogie (также называемая подвеска «коромысло-качалка»), был специально разработан для использования на низких скоростях.

При преодолении значительного препятствия, даже в виде вертикальной стенки, поступательное движение платформы практически прекращается, пока переднее колесо поднимается на препятствие. Удары о неровности поверхности так же могут повредить переносимые грузы или робот. В статьях [1, 2] описываются способы управления шасси с подвеской «коромысло-качалка» при которых, робот может эффективно проходить большинство препятствий. Основным преимуществом этих методов является то, что высокая проходимость достигается без каких-либо изменений существующей конструкции, а лишь за счёт изменения стратегии управления.



Рис. 1. Индийский луноход Pragyan на шасси с подвеской «коромысло-качалка»

В статье [3] описан метод управления, позволяющий шасси с подвеской «коромысло-качалка» эффективно подниматься по лестнице. Были разработаны и протестированы два прототипа шасси с подвеской «коромысло-качалка» на ступенях с различными высотами. В работе [4] предложено совместное использование нескольких элементов, повышающих проходимость. Два колеса передней «качалки» объединяются традиционной гусеницей. Такая конструкция позволяет роботу увереннее передвигаться по деформируемой поверхности. В исследовании [5] была предпринята попытка установить общий критерий для оценки и сравнения мобильности колёсных вездеходных роботов с точки зрения способности к преодолению пересечённой местности. В работе [6] была представлена новая мобильная платформа, состоящая из двух гусениц и четырёх колёс. Проведено исследование движения. Установлено, что такая платформа способна преодолевать провал в опорной поверхности, размер которого в 1,5 раза больше диаметра колеса.

В статье [7] на основе кинематического и квазистатического анализа построена новая мобильная платформа. Такая платформа обеспечивает плавное перемещение и высокую устойчивость на пересечённой местности.

В исследовании [8] создается 3D-модель нового механизма подвески робота и подробно описываются результаты её кинематического анализа. Новая конструкция имеет улучшенную защиту от опрокидывания при высокоскоростных линейных перемещениях.

В статье [9] авторы рассмотрели два случая моделирования контактных сил: ортотропного и анизотропного трения в точке контакта. В результате исследования установлено, что при определенных условиях робот на шасси с подвеской «коромысло-качалка» способен преодолевать вертикальное препятствие высотой до трёх радиусов колёс.

В статье [10] представлен кинематический и динамический анализ робота на шасси с подвеской «коромысло-качалка» при движении по неровной поверхности. Концепция нового спроектированного робота обеспечивает оптимальные условия при движении на высокой скорости.

В статье [11] описаны тяговые воздействия, которые создаются каждым колесом при преодолении ступенчатого препятствия и рассмотрена возможность регулирования распределения вертикальных нагрузок между колёсами с использованием торсионной пружины, расположенной между коромыслом и качалкой.

В исследовании [12] рассматривается моделирование механизма коромысла-тележки, который был разработан в программном обеспечении Catia и проанализирован в Ansys 14.0.

В статье [13] предложен модифицированный механизм коромысла-тележки, который улучшает мобильность с использованием всего двух приводов и демпфера. Предыдущие механизмы использовали большое количество моторов или сложные элементы управления для преодоления препятствий, таких как пересечённая местность или лестницы. В исследованиях [14] предлагается новая динамическая подвеска с коромыслом и качалкой с двумя режимами работы: робот может увеличивать ширину колесной базы коромысла для увеличения скорости хода при плоском рельефе; или робот может переключаться в исходную конфигурацию для передвижения на низкой скорости при пересечённом рельефе. В работе [15] по результатам тестов было установлено, что робот способен проходить через объекты в виде песчаных насыпей высотой до 40 см с уклоном более 30 градусов.

В данной работе рассматривается задача описания геометрии движения подвижной платформы с подвеской «коромысло-качалка» во время её пространственного перемещения по неровной поверхности. Математическое моделирование движения осуществляется с использованием методов механики и уравнений голономных связей.

Материалы и методы исследований. Кинематическая схема робота, используемая при математическом моделировании движения, представлена на рисунке 2.

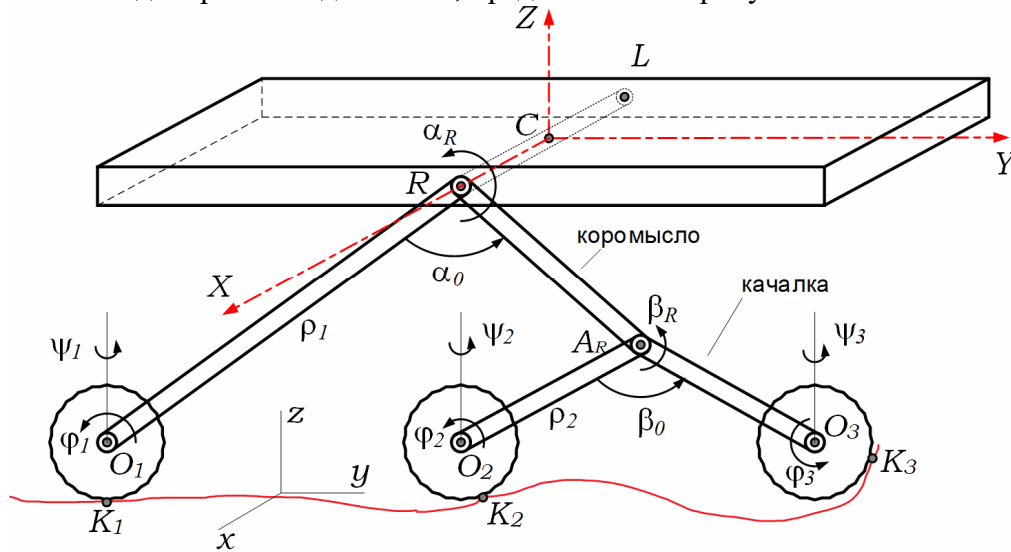


Рис. 2. Кинематическая схема робота с подвеской «коромысло-качалка»

Для описания кинематики робота вводятся следующие системы координат (СК): xyz – неподвижная СК, XYZ – подвижная СК, связанная с центром масс платформы робота. Проекция произвольного вектора $\mathbf{a}$ на оси этих систем координат связаны следующим соотношением:

$$\mathbf{a}^{(xyz)} = \Gamma \mathbf{a}^{(XYZ)}, \quad (1)$$

где верхний индекс указывает систему координат, на которую проецируется вектор $\mathbf{a}$; матрица ориентации имеет вид:

$$\Gamma = \begin{pmatrix} c\gamma c\psi - s\gamma s\theta s\psi & -c\theta s\psi & c\gamma s\theta s\psi + s\gamma c\psi \\ s\gamma s\theta c\psi + c\gamma s\psi & c\theta c\psi & s\gamma s\psi - c\gamma s\theta c\psi \\ -s\gamma c\theta & s\theta & c\gamma c\theta \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где ψ , θ , γ – углы рыскания, тангажа и крена для платформы робота; далее используются краткие обозначения для тригонометрических функций: $s x = \sin x$, $c x = \cos x$.

На кинематической схеме (рис. 3) введены следующие обозначения: C – геометрический центр платформы робота; R и L являются точками крепления правой и левой частей шасси к платформе робота соответственно; O_i – геометрический центр i -го колеса; K_i – точка соприкосновения i -го колеса с опорной поверхностью; A_R, A_L – точки крепления коромысел и качалок шасси для правой и левой сторон подвески соответственно.

Для краткости вводим обозначения расстояний между соответствующими точками робота и углов между звеньями робота:

$$\begin{aligned} \rho_2 &= |A_R O_2| = |A_R O_3| = |A_L O_2| = |A_L O_3|, \quad |RA_R| = |LA_L| = \rho_1 - \rho_2, \\ \alpha_0 &= \angle(RO_1, RA_R) = \angle(LO_1, LA_L), \quad W = |CL| = |CR|, \quad \rho_0 = |O_1 K_1|, \\ \beta_0 &= \angle(A_R O_2, A_R O_3) = \angle(A_L O_2, A_L O_3), \quad \rho_1 = |CO_1|. \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь, при определении длин, рассматривается частный случай конструкции подвески, в котором $\alpha_0 = \beta_0, \rho_1 = 2\rho_2$.

Ориентация колес описывается следующими углами: ϕ_i – угол вращения колеса вокруг оси, перпендикулярной плоскости колеса, проходящей через её геометрический центр; ψ_i – угол, который составляет плоскость колеса с плоскостью коромысла-качалки.

Конфигурация робота однозначно определяется следующими параметрами: координатами x_C, y_C, z_C геометрического центра платформы робота в неподвижной системе координат; углом курса ψ , крена γ и тангажа θ ; углами поворота $\alpha_L = \angle(CZ, LA_L)$, $\alpha_R = \angle(CZ, LA_R)$ левого и правого коромысел относительно платформы робота; углами поворота левой и правой качалок относительно соответствующих коромысел $\beta_L = \angle(LA_L, A_L O_3)$, $\beta_R = \angle(RA_R, A_R O_3)$; углами поворота колес левой и правой части подвески $\phi_{iR}, \phi_{iL}, \psi_{iR}, \psi_{iL}$ ($i = 1, 2, 3$).

Таким образом, вектор обобщённых координат имеет вид:

$$\mathbf{q} = (x_C, y_C, z_C, \psi, \theta, \gamma, \alpha_R, \alpha_L, \beta_R, \beta_L, \phi_{iR}, \phi_{iL}, \psi_{iR}, \psi_{iL}). \quad (4)$$

При выводе уравнений геометрии движения робота предполагается, что в точках соприкосновения колёс с поверхностью нет проскальзывания.

Для описания геометрии движения робота используем векторное уравнение в виде:

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_{KiR}(\mathbf{q}) &= \mathbf{f}_{surface}(x_{KiR}, y_{KiR}, z_{KiR}), \quad (i = 1, 2, 3) \\ \mathbf{r}_{KiL}(\mathbf{q}) &= \mathbf{f}_{surface}(x_{KiL}, y_{KiL}, z_{KiL}), \quad (i = 1, 2, 3) \end{aligned} \quad (5)$$

где $\mathbf{r}_{KiR}, \mathbf{r}_{KiL}$ радиус-векторы, соединяющие начало неподвижной системы координат с точкой контакта i -го колеса правой и левой части подвески соответственно, $\mathbf{f}_{surface} = (x \ y \ z_{surface}(x, y))^T$ функция, задающая радиус-векторы всех точек рельефа опорной поверхности. В этом случае высота каждой точки $z_{surface}(x, y)$ явно зависит от горизонтальных координат этой точки.

Радиус-векторы $\mathbf{r}_{KiR}, \mathbf{r}_{KiL}$ определяются из соотношений:

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_{K1R}^{(xyz)} &= \mathbf{r}_C^{(xyz)} + \Gamma(\mathbf{r}_{CR}^{(XYZ)} + \mathbf{r}_{RO1}^{(XYZ)}) + \mathbf{r}_{O1K1}^{(xyz)}, \\ \mathbf{r}_{KjR}^{(xyz)} &= \mathbf{r}_C^{(xyz)} + \Gamma(\mathbf{r}_{CR}^{(XYZ)} + \mathbf{r}_{RA_R}^{(XYZ)} + \mathbf{r}_{A_R O_j}^{(XYZ)}) + \mathbf{r}_{O_j K_j}^{(xyz)}, \quad (j = 2, 3) \\ \mathbf{r}_{K1L}^{(xyz)} &= \mathbf{r}_C^{(xyz)} + \Gamma(\mathbf{r}_{CL}^{(XYZ)} + \mathbf{r}_{LO1}^{(XYZ)}) + \mathbf{r}_{O1K1}^{(xyz)}, \\ \mathbf{r}_{KjL}^{(xyz)} &= \mathbf{r}_C^{(xyz)} + \Gamma(\mathbf{r}_{CL}^{(XYZ)} + \mathbf{r}_{LA_L}^{(XYZ)} + \mathbf{r}_{A_L O_j}^{(XYZ)}) + \mathbf{r}_{O_j K_j}^{(xyz)}, \quad (j = 2, 3) \end{aligned} \quad (6)$$

где $\mathbf{r}_C = (x_C \ y_C \ z_C)^T$ – радиус-вектор геометрического центра платформы робота в неподвижной системе координат; $\mathbf{r}_{CR}, \mathbf{r}_{CL}$ – радиус-векторы, соединяющие геометрический центр платформы с точками крепления правой и левой части подвески соответственно; $\mathbf{r}_{RO1}, \mathbf{r}_{LO1}$ – радиус-векторы от точек крепления правой и левой части подвески до центров

первых колёс; $\mathbf{r}_{RA_R}, \mathbf{r}_{LA_L}$ – радиус-векторы от точки крепления правой и левой части подвески к точкам крепления качалок; $\mathbf{r}_{A_R O_j}, \mathbf{r}_{A_L O_j}, (j = 2, 3)$ – радиус-векторы от точки крепления правой и левой частей качалки к центрам j -го колеса; $\mathbf{r}_{O_j K_j}^{(xyz)} = -\rho_0 \mathbf{n}_j^{(xyz)}, (j = \overline{1, 6})$ – радиус-вектор, соединяющий центр j -го колеса и его точку соприкосновения с опорной поверхностью. Здесь используется обозначение единичного вектора $\mathbf{n}_j$, перпендикулярного опорной поверхности, проведённой через контактную точку K_j :

$$\begin{aligned} \mathbf{n}_j^{(xyz)} &= \begin{pmatrix} n_{jx}(x_{K_j}, y_{K_j}) & n_{jy}(x_{K_j}, y_{K_j}) & n_{jz}(x_{K_j}, y_{K_j}) \end{pmatrix}^T = \\ &= \frac{\begin{pmatrix} \frac{\partial z_{surface}(x_{K_j}, y_{K_j})}{\partial x} & \frac{\partial z_{surface}(x_{K_j}, y_{K_j})}{\partial y} & 1 \end{pmatrix}^T}{\sqrt{\left(\frac{\partial z_{surface}(x_{K_j}, y_{K_j})}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial z_{surface}(x_{K_j}, y_{K_j})}{\partial y}\right)^2 + 1}}. \end{aligned} \quad (7)$$

Радиус-векторы, входящие в соотношения (6), вычисляются с помощью формул:

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_{A_L O_2}^{(XYZ)} &= \begin{pmatrix} 0 \\ \rho_2 \sin(\alpha_L + \beta_L - \beta_0) \\ -\rho_2 \cos(\alpha_L + \beta_L - \beta_0) \end{pmatrix}, \quad \mathbf{r}_{LA_L}^{(XYZ)} = \begin{pmatrix} 0 \\ (\rho_1 - \rho_2) \sin \alpha_L \\ -(\rho_1 - \rho_2) \cos \alpha_L \end{pmatrix}, \\ \mathbf{r}_{A_R O_2}^{(XYZ)} &= \begin{pmatrix} 0 \\ \rho_2 \sin(\alpha_R + \beta_R - \beta_0) \\ -\rho_2 \cos(\alpha_R + \beta_R - \beta_0) \end{pmatrix}, \quad \mathbf{r}_{RO_1}^{(XYZ)} = \begin{pmatrix} 0 \\ -\rho_1 \sin(\alpha_0 - \alpha_R) \\ -\rho_1 \cos(\alpha_0 - \alpha_R) \end{pmatrix}, \\ \mathbf{r}_{CR}^{(XYZ)} &= \begin{pmatrix} W \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{r}_{RA_R}^{(XYZ)} = \begin{pmatrix} 0 \\ (\rho_1 - \rho_2) \sin \alpha_R \\ -(\rho_1 - \rho_2) \cos \alpha_R \end{pmatrix}, \quad \mathbf{r}_{LO_1}^{(XYZ)} = \begin{pmatrix} 0 \\ -\rho_1 \sin(\alpha_0 - \alpha_L) \\ -\rho_1 \cos(\alpha_0 - \alpha_L) \end{pmatrix}, \\ \mathbf{r}_{CL}^{(XYZ)} &= \begin{pmatrix} -W \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{r}_{A_L O_3}^{(XYZ)} = \begin{pmatrix} 0 \\ \rho_2 \sin(\alpha_L + \beta_L) \\ -\rho_2 \cos(\alpha_L + \beta_L) \end{pmatrix}, \quad \mathbf{r}_{A_R O_3}^{(XYZ)} = \begin{pmatrix} 0 \\ \rho_2 \sin(\alpha_R + \beta_R) \\ -\rho_2 \cos(\alpha_R + \beta_R) \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (8)$$

Полученная математическая модель движения робота (6) с учетом выражений (7) и (8) описывает пространственную геометрию движения платформы с подвеской «коромысло-качалка» при движении по неровной поверхности и может быть использована для синтеза и апробации законов управления. Отметим, что геометрия движения описывается 18 нелинейными алгебраическими уравнениями, содержащими 12 неизвестных координат точек контакта $x_{KjR}, y_{KjR}, x_{KjL}, y_{KjL}$ и 10 обобщённых координат $x_C, y_C, z_C, \psi, \theta, \gamma, \alpha_R, \alpha_L, \beta_R, \beta_L$.

Результаты. В общем случае решение системы уравнений геометрии движения сильно зависит от формы опорной поверхности, поэтому далее рассмотрим движение робота в частных случаях поверхностей: 1) горизонтальная плоскость $z_{surface}(x, y) = 0$; 2) наклонная плоскость $z_{surface}(x, y) = c_y y$. Для более сложных рельефов опорных поверхностей с подвеской «коромысло-качалка» можно определить с помощью численного решения нелинейных алгебраических уравнений (6) с учетом выражений (7) и (8).

В случае движения по горизонтальной плоскости нормали к опорной поверхности в точках контакта платформы будут постоянными и направлены вдоль оси z . В результате уравнения (6) с учетом (7) и (8) сводятся к следующей системе уравнений:

$$z_C = \rho_1 s(\alpha_0 - \alpha_R) s\theta + \rho_1 c(\alpha_0 - \alpha_R) c\gamma c\theta + \rho_0 + W s\gamma c\theta,$$

$$\begin{aligned}
0 &= z_C - \rho_0 + [(\rho_1 - \rho_2) s \alpha_R + \rho_2 s(\alpha_R + \beta_R - \beta_0)] s \theta - \\
&\quad - W s \gamma c \theta - [(\rho_1 - \rho_2) c \alpha_R + \rho_2 c(\alpha_R + \beta_R - \beta_0)] c \gamma c \theta, \\
0 &= z_C - \rho_0 + [(\rho_1 - \rho_2) s \alpha_R + \rho_2 s(\alpha_R + \beta_R)] s \theta - \\
&\quad - W s \gamma c \theta - [(\rho_1 - \rho_2) c \alpha_R + \rho_2 c(\alpha_R + \beta_R)] c \gamma c \theta, \\
z_C &= \rho_1 s(\alpha_0 - \alpha_L) s \theta + \rho_1 c(\alpha_0 - \alpha_L) c \gamma c \theta + \rho_0 - W s \gamma c \theta, \\
0 &= z_C - \rho_0 + [(\rho_1 - \rho_2) s \alpha_L + \rho_2 s(\alpha_L + \beta_L - \beta_0)] s \theta + \\
&\quad + W s \gamma c \theta - [(\rho_1 - \rho_2) c \alpha_L + \rho_2 c(\alpha_L + \beta_L - \beta_0)] c \gamma c \theta, \\
0 &= z_C - \rho_0 + [(\rho_1 - \rho_2) s \alpha_L + \rho_2 s(\alpha_L + \beta_L)] s \theta + \\
&\quad + W s \gamma c \theta - [(\rho_1 - \rho_2) c \alpha_L + \rho_2 c(\alpha_L + \beta_L)] c \gamma c \theta.
\end{aligned} \tag{9}$$

Полученные уравнения (9) имеют следующее решение:

$$\gamma(t) = \theta(t) = 0, \quad \beta_L(t) = \beta_R(t) = 0, \quad \alpha_L(t) = \alpha_R(t) = \alpha_0 / 2. \tag{10}$$

При этом платформа робота будет двигаться согласно заданным временным функциям $x_C(t), y_C(t), \psi(t)$ на постоянной высоте геометрического центра платформы $z_C = \rho_1 \cos(\alpha_0/2) + \rho_0$.

В случае движения по наклонной плоскости уравнения геометрии движения имеют следующее решение:

$$\begin{aligned}
\gamma(t) &= \psi(t) = 0, \quad \beta_L(t) = \beta_R(t) = 0, \quad \alpha_L(t) = \alpha_R(t) = \alpha_0 / 2, \\
\theta(t) &= \arctg(c_y), \quad z_C(t) = c_y y_C(t) + \rho_1 \cos\left(\frac{\alpha_0}{2}\right) \sqrt{c_y^2 + 1} + \rho_0 \frac{1 - c_y^2}{\sqrt{c_y^2 + 1}}.
\end{aligned} \tag{11}$$

При этом платформа движется с постоянным углом тангажа $\theta = \arctg(c_y)$ по наклонной плоскости.

Выводы

По построенной математической модели геометрии движения мобильной платформы с подвеской «коромысло-качалка» при ее пространственном перемещении по неровной поверхности проанализированы частные случаи движения по горизонтальной и наклонной плоскостям. Найденные решения позволяют провести оценку углов ориентации корпуса робота и углов поворота его звеньев. Роботы, оснащенные такого типа подвеской, имеют высокую проходимость по сравнению с подвеской автомобильного типа.

Показано, что математическая модель пространственного движения робота описывается 18 нелинейными алгебраическими уравнениями, содержащими 12 неизвестных координат точек контакта и 10 обобщенных координат – координат и углов ориентации корпуса робота, а также углов поворота элементов подвески. Отмечено, что для сложных криволинейных опорных поверхностей конфигурация робота с шасси типа «коромысло-качалка» может быть определена с помощью численного решения нелинейных алгебраических уравнений геометрии движения.

Результаты работы могут быть при разработке систем управления движением робота, обладающего высокой проходимостью, и планировании оптимальных траекторий его движения.

Заключение

В данной статье с помощью методов механики, включая матрицы направляющих косинусов, построены уравнения геометрии движения мобильного робота с подвеской типа «коромысло-качалка».

Получены решения уравнений геометрии движения робота при движении по некоторым частным случаям поверхностей: горизонтальной и наклонной плоскостям. Для более

сложных криволинейных опорных поверхностей конфигурация робота с шасси типа «кормысло- качалка» может быть определена с помощью численного решения нелинейных алгебраических уравнений геометрии движения.

Полученная математическая модель геометрии движения робота может быть использована для построения системы управления движением мобильного робота с подвеской типа «кормысло- качалка».

Список литературы / References

1. Dhawale M., Bedarkar R., Warudkar R., Mohod S., Dhawale D., Joshi T., Bansod Y.D. Rocker Bogie // International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology. 2022, vol. 10, no. 5, pp. 4394-4403. doi.org/10.22214/ijraset.2022.43401.
2. Miller D.P., Lee T.-L. High-Speed Traversal of Rough Terrain Using a Rocker-Bogie Mobility System // Proceedings of Robotics 2002: The 5th International Conference and Exposition on Robotics for Challenging Situations and Environments. 2002. doi.org/10.1061/40625(203)54.
3. Choi D., Oh J., Kim J. Analysis method of climbing stairs with the rocker-bogie mechanism // Journal of Mechanical Science and Technology. 2013, vol. 27, pp. 2783-2788. doi.org/10.1007/s12206-013-0725-3.
4. Ryu S., Lim K., Han S., Seo T. Tracker-Bogie: A Mobile Mechanism with Integrated Half Rocker-Bogie and Track Mechanism // IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. 2024, vol. 30, no. 2, pp. 1201-1211. doi.org/10.1109/TMECH.2024.3402586.
5. Thueer T., Siegwart R. Mobility evaluation of wheeled all-terrain robots // Robotics and Autonomous Systems. 2010, vol. 58, pp. 508-519. doi.org/10.1016/j.robot.2010.01.007.
6. Choi D., Kim J.R., Cho S., Jung S., Kim J. Rocker-Pillar: Design of the Rough Terrain Mobile Robot Platform with Caterpillar Tracks and Rocker Bogie Mechanism // 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. 2012, pp. 3405-3410. doi.org/10.1109/IROS.2012.6385796.
7. Choi D., Kim Y., Jung S., Kim J., Kim H.S. A New Mobile Platform (RHyoMo) for Smooth Movement on Rugged Terrain // IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. 2016, vol. 21, no. 3, pp. 1303-1314. doi.org/10.1109/TMECH.2016.2520085.
8. Khade M.V., Kulkarni H.B., Joshi S.L., Wankhede S.V. Design and development of a rocker-bogie mechanism robot with integrated environmental sensors // International Journal of Science and Research Archive. 2024, vol. 12, no. 2, pp. 1768-1778. doi.org/10.30574/ijrsra.2024.12.2.1440.
9. Mepani M., Guha A. Study of the Step Climbing Ability of a Rover with Rocker Bogie Mechanism // Journal of the Institution of Engineers (India): Series C. 2024, vol. 105, no. 1, pp. 161-177. doi.org/10.1007/s40032-023-01021-z.
10. Pandey A., Kumar A., Diwan T.D., Hasan Md. E., Mohanty R.L., Gour S.S. New concept-based six-wheels rocker-bogie robot: Design and analysis // Materials Today: Proceedings S.S. 2022, vol. 56, pp. 726-734. doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.243.
11. Cosenza C., Niola V., Pagano S., Savino S. Theoretical study on a modified rocker-bogie suspension for robotic rovers // Robotica. 2023, vol. 41, no. 10, pp. 2915-2940. doi.org/10.1017/S0263574723000656.
12. Vishvajeet, Faraz A., Pankaj S., Ravindra S. Design and FEA Based Vibration Characteristic Analysis of Rocker Bogie Mechanism // International Journal of Applied Engineering Research. 2019, vol. 14, no. 9, pp. 209-214.
13. Lim K., Ryu S., Won J. H., Seo T. A Modified Rocker-Bogie Mechanism with Fewer Actuators and High Mobility // IEEE Robotics and Automation Letters. 2022, vol. 7, no. 4, pp. 8752-8758. doi.org/10.1109/LRA.2022.3188120.
14. Sunxin W., Yan L. Dynamic Rocker-Bogie: Kinematical Analysis in a High-Speed Traversal Stability Enhancement // International Journal of Aerospace Engineering. 2016, vol. 2016, p. 5181097. doi.org/10.1155/2016/5181097.
15. Barri M.H., Hernanda T.Y., Santoso A.T., Faizi M.N., Mahrus M.S., Rizquallah R. Wheeled Robot Drive Design with Rocker-Bogie System for Searching for Earthquake Victims // Jurnal Sistem Telekomunikasi Elektronika Sistem Kontrol Power Sistem dan Komputer. 2021, vol. 1, no. 2. – doi.org/10.32503/jtecs.v1i2.1681.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Грибов Евгений Александрович – ассистент кафедры Робототехники, мехатроники, динамики и прочности машин	Gribov Evgeniy Aleksandrovich – assistant of the Department of robotics, mechatronics, dynamics and machine strength
Гавриленко Антон Борисович – старший преподаватель кафедры Робототехники, мехатроники, динамики и прочности машин	Gavrilenko Anton Borisovich – senior lecturer of the Department of robotics, mechatronics, dynamics and machine strength
Грибова Ольга Валерьевна – старший преподаватель кафедры Робототехники, мехатроники, динамики и прочности машин	Gribova Olga Valerievna – senior lecturer of the Department of robotics, mechatronics, dynamics and machine strength
GribovYA@mpei.ru	

Получена 10.04.2026