

С. Ф. Яцун, зав. кафедрой, newteormeh@inbox.ru, Л. Ю. Ворочаева, доц., mila180888@yandex.ru,
Юго-Западный государственный университет, г. Курск,
С. И. Савин, ст. науч. сотр., s.savin@innopolis.ru,
Университет Иннополис, г. Иннополис

Исследование вопросов управления ориентацией колесного прыгающего робота в полете¹

Работа посвящена исследованию поведения в полете прыгающего робота, состоящего из корпуса, оснащенного колесной платформой, и разгонного модуля, установленного внутри корпуса и позволяющего устройству разгоняться под заданным углом к горизонту до необходимой скорости отрыва от поверхности. Целью проводимого в рамках работы исследования является разработка системы управления колесами устройства, обеспечивающей их вращение в полете для достижения роботом к моменту приземления заданной ориентации, позволяющей ему приземлиться одновременно на передние и задние колеса без опрокидывания. Рассматривается отрыв и приземление на опорную поверхность, описываемую кусочно-линейной функцией, определенной на двух интервалах. На каждом из интервалов эта функция может быть горизонтальной или наклонной. В работе выделены четыре типа поверхностей в зависимости от диапазонов углов их наклона к горизонту; еще одним варьируемым критерием выступает расположение упомянутых выше интервалов — расстояние, на котором линейные поверхности приземления и посадки "сшиваются" (соединяются) между собой. Для проведения исследований разработана кинематическая модель прыгающего робота и динамическая модель его полета, а также предложена система управления, обеспечивающая построение траекторий полета робота в конфигурационном пространстве для осуществления приземления в заданное конечное положение с некоторой точностью и требуемой точностью и заданной ориентацией. Данная проблема решается средствами численной оптимизации и сформулирована как задача квадратичного программирования. В результате численного моделирования установлено влияние трех параметров поверхностей (двух углов наклона и расстояния "сшивки") на время полета робота, угловые скорости вращения колес и обеспечивающие их управляющие моменты приводов при использовании предложенного подхода к управлению устройством. Также выявлено влияние ранее указанных параметров на максимальные и минимальные значения угловых скоростей колес и моментов приводов, достигаемые в процессе движения робота, что может быть использовано при проектировании опытного образца прыгающего робота для задания требований к приводам колесной платформы.

Ключевые слова: колесный прыгающий робот, управляемый полет, управление ориентацией, типы поверхностей

Введение

Прыгающие роботы представляют собой особый класс механизмов, предназначенных для движения по неровной и пересеченной местности с препятствиями, где роботы других типов (колесные, гусеничные, шагающие, ползающие) перемещаться не могут или же могут двигаться с очень малыми скоростями в обход препятствий, что нерационально. Однако к недостаткам данных устройств можно отнести тот факт, что полет большинства из них является неуправляемым, его характеристики (высота и дальность прыжка, а также ориентация робота в полете) зависят от направления вектора скорости отрыва устройства от поверхности и значения скорости, а также от наличия угловой скорости при отрыве, что приводит к нежелательному вращению робота в полете и его опрокидыванию при приземлении [1—3].

В ряде роботов для решения задачи управления полетом используются относительные

движения звеньев в полете для изменения положения центра масс объекта и создания моментов, препятствующих повороту робота [4, 5]. Другой вариант предотвращения закручивания устройства — раскрытие в полете крыльев и переход в режим планирования [6, 7].

В данной работе рассматривается управление ориентацией прыгающего робота во время полета в целях обеспечения его приземления на требуемую поверхность без опрокидывания. Для этого конструкция робота оснащена колесной платформой, вращение колес которой не будет приводить к изменению положения центра масс устройства, а будет обеспечивать поворот устройства в полете на требуемый угол для одновременного приземления на передние и задние колеса.

Математическая модель прыгающего робота

Расчетная схема робота

Будем рассматривать прыгающего робота, расчетная схема которого приведена на рис. 1.

¹Работа выполнена в рамках проекта РФФИ № 18-31-00075.

Устройство состоит из корпуса (звено 4), оснащенного колесной платформой (звенья 5 и 6) и разгонным модулем (звенья 1–3) [8, 9].

Колесная платформа позволяет роботу позиционироваться перед препятствиями для осуществления прыжков. Она включает в себя четыре колеса (на рис. 1 показаны только два из них), которые установлены в шарнирах 10 и 11 с возможностью вращения с угловыми скоростями $\dot{\varphi}_5$ и $\dot{\varphi}_6$ относительно корпуса за счет моментов M_{45} и M_{46} , генерируемых приводами. Разгонный модуль обеспечивает разгон устройства и его отрыв от поверхности с начальной скоростью v_C^0 , направленной под углом θ_C^0 к горизонту. Данный модуль образован тремя звеньями, два из них (звенья 2 и 3) образуют поступательную пару 8, за счет силы F_{23} которой осуществляется непосредственно разгон робота, а два других (звенья 1 и 2) образуют вращательную пару 7, посредством момента M_{21} которой звено 1 поворачивается для увеличения площади контакта с поверхностью при разгоне и повышения устойчивости робота до отрыва от поверхности. Разгонный модуль установлен в корпусе с возможностью поворота с помощью момента M_{43} привода, расположенного в шарнире 9. Отметим, что на рис. 1 показаны только те моменты и силы, которые действуют на звенья устройства во время полета.

Прыжок робота происходит в вертикальной плоскости Oxy , ось Oy которой направлена противоположно действию гравитационного поля. Для разработки математической модели робота введем следующие допущения. Будем считать, что все звенья являются абсолютно твердыми телами, звенья разгонного модуля — стержни с длинами l_i , корпус — прямоугольник с размерами $l_4 \times h_4$, а колеса — диски с радиусом R . Все звенья имеют массу m_i , центры масс — точки C_i — являются одновременно центрами симметрии звеньев, причем массы звеньев разгонного модуля существенно меньше, чем массы корпуса и колес, так как эти звенья не испытывают ударных нагрузок во время разгона и приземления. Углы поворота φ_i всех звеньев отсчитываются против часовой стрелки относительно оси Ox , длина поступательной пары 8 — k_{23} —

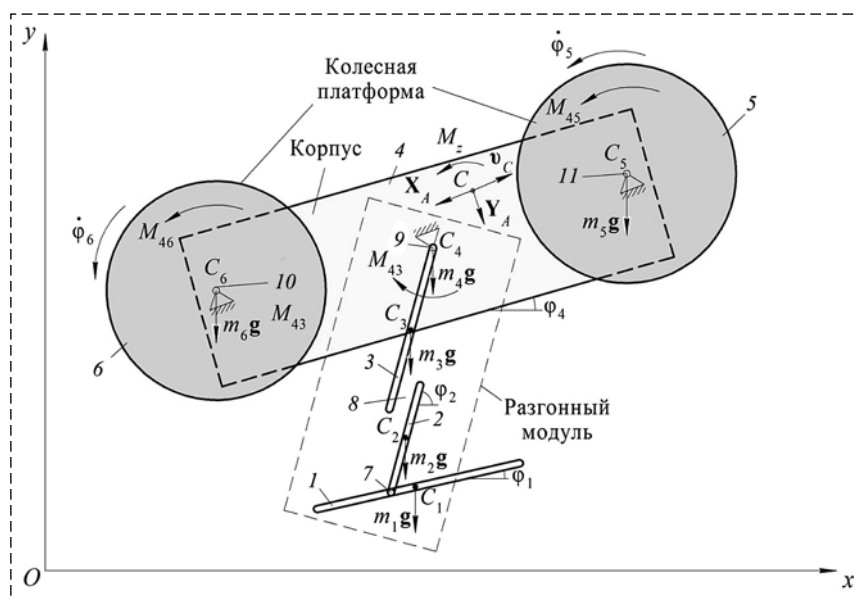


Рис. 1. Расчетная схема прыгающего робота в полете
Fig. 1. Diagram of the jumping robot in the flight phase

возрастает по мере ее удлинения. Обобщенными координатами являются координаты центра масс корпуса робота, углы поворота корпуса, звеньев разгонного модуля и колес, а также длина поступательной пары:

$$\mathbf{q} = (x_{C4} \ y_{C4} \ \varphi_1 \ \varphi_2 \ \varphi_4 \ \varphi_5 \ \varphi_6 \ k_{23})^T.$$

Модель полета робота во время прыжка

Прыжок робота состоит из четырех фаз: позиционирование, разгон, полет и приземление, что детально описано в работе [10]. Здесь ограничимся рассмотрением поведения робота только во время полета, который начинается в момент отрыва устройства от поверхности, а завершается в момент начала взаимодействия колес с поверхностью. Во время полета разгонный модуль поворачивается относительно корпуса за счет момента M_{43} и размещается внутри него таким образом, что его звенья не контактируют с поверхностью при приземлении (рис. 1). Звенья 1 и 2, 2 и 3 этого модуля зафиксированы друг относительно друга. Для управления ориентацией робота в полете в целях его одновременного приземления на передние и задние колеса используется вращение колес с помощью моментов M_{45} и M_{46} . Помимо этого, в центрах масс звеньев робота приложены силы тяжести $m_i g$, $i = 1 \dots 6$, а в центре масс робота — точке C — аэродинамические силы: сила лобового сопротивления X_A и аэродина-

мическая подъемная сила Y_A , также действует аэродинамический момент M_z [11].

С учетом накладываемых на устройство связей вектор обобщенных координат в полете записывается следующим образом:

$$\mathbf{q} = (x_{C4}, y_{C4}, \varphi_2, \varphi_4, \varphi_5, \varphi_6)^T.$$

Систему дифференциальных уравнений движения колесного прыгающего робота можно представить в матричной форме следующим образом:

$$\mathbf{H}\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{v} = \boldsymbol{\tau},$$

где $\mathbf{H}$ — матрица коэффициентов при обобщенных ускорениях (обобщенная матрица инерции); $\mathbf{v}$ — вектор обобщенных сил, включающий инерционные, гравитационные и диссипативные силы; $\boldsymbol{\tau}$ — матрица обобщенных сил приводов. Матрица $\mathbf{H}$ имеет размерность 6×6 , а векторы $\mathbf{v}$ и $\boldsymbol{\tau}$ — размерность 6×1 .

В дальнейшем будет использоваться линеаризованная форма уравнений динамики робота, имеющая вид

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} + \mathbf{c},$$

где $\mathbf{A}$, $\mathbf{B}$ и $\mathbf{c}$ — матрицы и вектор линеаризованной модели динамики системы; $\mathbf{u}$ — вектор управляющих воздействий; $\mathbf{x} = [\mathbf{q}^T \ \dot{\mathbf{q}}^T]^T$ — вектор состояний системы. Примеры построения линеаризованных моделей многосвязных систем можно найти в работе [12].

Описание опорных поверхностей

Будем рассматривать прыжок робота с наклонной поверхности, расположенной под углом θ_1 к оси Ox , на наклонную поверхность, угол наклона которой к горизонтали равен θ_2 (рис. 2). Параметр X определяет расстояние вдоль оси Ox , на котором две поверхности соединяются. Угол $\Delta\theta$ представляет собой угол между двумя поверхностями и равен

$$\Delta\theta = \pi - (\theta_2 - \theta_1).$$

Варьируемыми параметрами поверхностей являются: 1) угол θ_1 наклона поверхности, с которой осуществляется прыжок; 2) угол θ_2 наклона поверхности, на которую осуществляется прыжок; 3) расстояние X "сшивки" поверхностей. В данной работе ограничимся рас-

смотрением таких поверхностей, когда одна из них является горизонтальной, а вторая наклонной. В этом случае можно выделить четыре типа поверхностей, определяемых комбинациями углов их наклона к горизонтали, что указано в табл. 1.

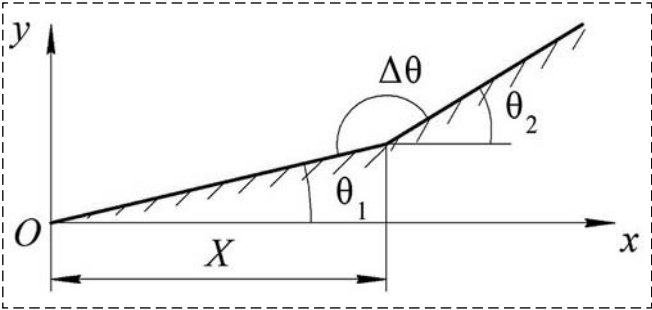
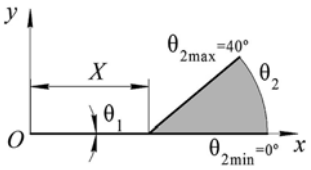
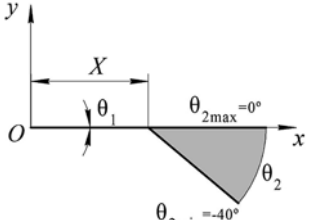
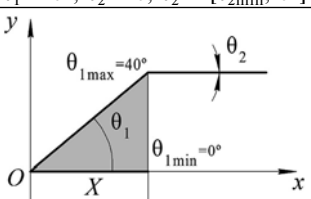
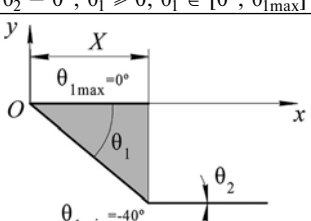


Рис. 2. Поверхности, на которых реализуется прыжок
Fig. 2. Supporting surface, over which the jump takes place

Таблица 1
Table 1

Типы поверхностей
Types of the supporting surface

Тип поверхности	Комбинация углов
1	
	$\theta_1 = 0^0, \theta_2 \geq 0, \theta_2 \in [0^0, \theta_{2max}]$
2	
	$\theta_1 = 0^0, \theta_2 \leq 0, \theta_2 \in [\theta_{2min}, 0^0]$
3	
	$\theta_2 = 0^0, \theta_1 \geq 0, \theta_1 \in [0^0, \theta_{1max}]$
4	
	$\theta_2 = 0^0, \theta_1 \leq 0, \theta_1 \in [\theta_{1min}, 0^0]$

В данном исследовании положим $\theta_{1\max} = \theta_{2\max} = 40^\circ$; $\theta_{1\min} = \theta_{2\min} = -40^\circ$.

На первых двух типах поверхностей (1 и 2) робот совершает прыжок с горизонтальной поверхности и приземляется на наклонную, на двух других типах поверхностей (3 и 4) робот осуществляет прыжок с наклонной поверхности на горизонтальную, причем для типов поверхностей 1 и 4 $\Delta\theta \leq 180^\circ$, а для типов 2 и 3 — $\Delta\theta \geq 180^\circ$.

Оптимизация траектории прыгающего робота

Рассмотрим задачу о построении траекторий полета робота, удовлетворяющих заданным краевым условиям. Траектория должна обеспечить перемещение робота в заданное конечное положение с некоторой точностью. При этом траектория должна удовлетворять динамике робота. Построение траектории робота удобно представить как оптимизационную задачу [13]. Для того чтобы иметь возможность описать траекторию конечным числом параметров, удобно представить ее в дискретной форме.

Среди множества траекторий, удовлетворяющих динамике устройства и краевым условиям, предпочтительными являются те, которые требуют меньшей работы со стороны приводов. Для этого в целевую функцию оптимизационной задачи можно ввести положительно определенную квадратичную форму управляющих воздействий $\mathbf{u}$:

$$J_u = \sum_{i=1}^n \mathbf{u}_i^T \mathbf{R} \mathbf{u}_i, \quad (1)$$

где $\mathbf{u}_i$ — управляющее воздействия $\mathbf{u}(t)$ в момент времени t_i ; n — число участков, на которые разбита дискретная траектория робота; $\mathbf{R}$ — положительно определенная матрица весовых коэффициентов.

Использование целевой функции (1) служит для регуляризации оптимизационной задачи. Для этой же цели можно использовать целевую функцию, содержащую квадратичную форму разности между соседними по времени положениями робота на дискретной траектории:

$$J_n = \sum_{i=1}^{n-1} (\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_{i+1})^T \mathbf{Q} (\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_{i+1}),$$

где $\mathbf{Q}$ — положительно определенная матрица весовых коэффициентов.

Таким образом, можем ввести целевую функцию для оптимизационной задачи:

$$J = J_b + J_u + J_n,$$

где J_b — квадратичная форма ошибки по конечному положению робота. Функцию J_b можно записать следующим образом:

$$J_b = (\mathbf{x}_n - \mathbf{x}_n^*)^T \mathbf{S}_b^T \mathbf{Q}_b \mathbf{S}_b (\mathbf{x}_n - \mathbf{x}_n^*),$$

где $\mathbf{S}_b$ — матрица выбора, задающая, какие именно компоненты конечного значения вектора состояний $\mathbf{x}$ должны быть отработаны траекторией; $\mathbf{Q}_b$ — положительно определенная матрица весовых коэффициентов; $\mathbf{x}_n^*$ — желаемое значение вектора состояний в конечный момент времени. Таким образом, матрицы $\mathbf{R}$, $\mathbf{Q}$ и $\mathbf{Q}_b$ определяют целевую функцию и служат гиперпараметрами оптимизационной задачи. Величины $\mathbf{x}_i$ и $\mathbf{u}_i$ являются оптимизируемыми параметрами.

Тогда вопрос построения траектории может быть сведен к следующей задаче квадратичного программирования:

$$\begin{aligned} &\text{minimize: } J \\ &\text{subject to: } \begin{cases} \mathbf{x}_{i+1} = \mathbf{x}_i + \Delta t \mathbf{A} \mathbf{x}_{i+1} + \Delta t \mathbf{B} \mathbf{u}_i + \Delta t \mathbf{c}; \\ \mathbf{x}_1 = \mathbf{x}_1^*. \end{cases} \quad (2) \end{aligned}$$

Условия в виде линейных равенств, наложенные на рассматриваемую квадратичную программу, связаны с необходимостью удовлетворения траектории динамике устройства и его начальному положению. Условие, обусловленное динамикой устройства, записано с использованием неявной формулы интегрирования дифференциальных уравнений первого порядка (неявной формулы Эйлера), удобной для интегрирования жестких систем дифференциальных уравнений. Это сделано для достижения устойчивости численной процедуры решения задачи (2).

Результаты численного моделирования полета робота

Целью данной работы является разработка таких законов $\dot{\phi}_5 = \dot{\phi}_6 = f(t)$, угловых скоростей колес и управляющих моментов $M_{45} = M_{46} = g(t)$, чтобы в результате поворота устройства в полете его приземление происходило одновременно на передние и задние колеса.

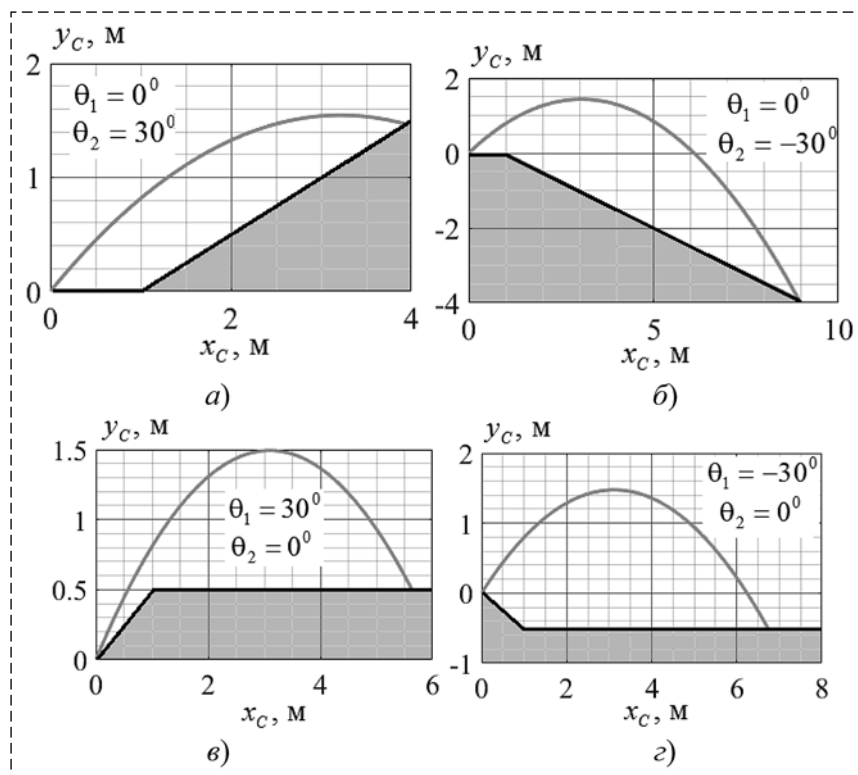


Рис. 3. Графики траекторий $y_C(x_C)$:

а — тип 1; б — тип 2; в — тип 3; г — тип 4

Fig. 3. Graphs of trajectories $y_C(x_C)$:

а — type 1; б — type 2; в — type 3; д — type 4

На рис. 3 показаны графики траекторий центра масс устройства при прыжке на каждом из ранее введенных типов поверхностей при начальной скорости полета $v_C^0 = 8$ м/с и угле наклона ее вектора к горизонту $\theta_C^0 = 45^\circ$. Параметр X "сшивки" поверхностей равен $X = 1$ м.

По графикам видно, что при типе 1 поверхностей робот приземляется на наклонную поверхность практически в наивысшей точке прыжка, при типе 3 поверхность приземления расположена выше, чем поверхность отрыва, но при этом значительно ниже, чем в первом случае. Прыжок на поверхности типа 2 имеет наибольшую длину, так как поверхность приземления находится существенно ниже поверхности отрыва, а тип поверхности 4 позволяет совершить прыжок с дальностью меньшей, чем при типе 2, но большей, чем при типе 3.

Дальность полета робота влияет на время полета, которое по мере увеличения в зависимости от типа поверхности прыжка можно выстроить в такую цепочку: тип 1 $\rightarrow$ тип 3 $\rightarrow$ тип 4 $\rightarrow$ тип 2 (рис. 4, см. вторую сторону блокнота). Под временем полета понимается время с момента отрыва робота от поверхности до момента приземления.

На графиках рис. 4 показаны временные зависимости углов поворота колес в полете, а также их угловых скоростей и управляющих моментов, из которых следует, что для достижения заданной ориентации робота к моменту завершения полета колеса вначале вращаются в сторону, противоположную направлению поворота устройства (против часовой стрелки для типов поверхности 2 и 3 и по часовой стрелке для типов 1 и 4), а затем их направление вращения меняется. Это обусловлено необходимостью предотвращения поворота робота к моменту приземления при угле $\theta_C = \theta_2$.

Время полета влияет на угловые скорости вращения колес и управляющие напряжения приводов следующим образом: чем меньше время полета, тем больше должны быть угловые скорости вращения колес для достижения требуемой ориентации робота при условии, что $|\Delta\theta| = \text{const}$, значит,

тем большие для этого требуются управляющие моменты. Правильность этого заключения подтверждается соответствующими графиками рис. 4.

Ниже представлены результаты исследований при варьировании угла наклона поверхностей, а также расстояния их "сшивки". В качестве оцениваемых параметров используются наибольшие и наименьшие значения угловых скоростей вращения колес ($\omega_{\max}$ и $\omega_{\min}$), моментов, генерируемых приводами ($M_{\max}$ и $M_{\min}$), а также время полета T_f .

Варьирование углов наклона поверхностей

Графики изменения времени полета от $\Delta\theta$ приведены на рис. 5, по ним видно, что описанная ранее для заданных значений углов поверхностей закономерность сохраняется для всего рассматриваемого диапазона углов. На этих и далее приведенных графиках вертикальная штрихпунктирная линия является разделителем разных типов поверхностей, номера которых 1—4 указаны в кружках. Из данных графиков следует, что по мере увеличения угла θ_1 для поверхностей 3 и 4, а также угла θ_2 для

поверхностей 1 и 2 время полета уменьшается. Наибольшее время полета наблюдается для поверхности типа 2 при наибольшем значении $\Delta\theta$, а наименьшее — для поверхности типа 1 при наименьшем значении $\Delta\theta$.

На рис. 6 (см. вторую сторону обложки) и рис. 7 показаны зависимости наибольших $\omega_{\max}$ и наименьших $\omega_{\min}$ значений угловых скоростей вращения колес и моментов $M_{\max}$ и $M_{\min}$ приводов, обеспечивающих эти скорости, для четырех типов поверхностей.

По приведенным графикам видно, что наибольшие значения угловых скоростей и моментов всегда положительные, а наименьшие — отрицательные, причем по мере приближения к $\Delta\theta = 180^\circ$ значения $\omega_{\max}$ и $M_{\max}$ уменьшаются, а значения $\omega_{\min}$ и $M_{\min}$ возрастают, при $\Delta\theta = 180^\circ$ $\omega_{\max} = \omega_{\min} = 0$ рад/с, $M_{\max} = M_{\min} = 0$ Н·м. Это обусловлено тем, что по мере удаления значения угла $\Delta\theta$ от $\Delta\theta = 180^\circ$ и уменьшения времени полета угловые скорости вращения колес и формирующие их моменты приводов возрастают.

Также следует отметить, что для типов поверхностей 3 и 4 наблюдается следующая закономерность: характер зависимостей $\omega_{\max}$ и $M_{\max}$ для поверхности типа 3 качественно близок к зеркальным отображениям $\omega_{\min}$ и $M_{\min}$ для поверхности типа 4, и наоборот. Для поверхностей типов 1 и 2 зависимости $\omega_{\max}$ качественно близки друг к другу относительно $\Delta\theta = 180^\circ$, аналогичная закономерность справедлива и для $\omega_{\min}$. Зависимости $M_{\max}$ и $M_{\min}$ для поверхности типа 1, а также типа 2 качественно близки между собой относительно $M = 0$ Н·м.

Варьирование расстояния "сшивки" поверхностей

В табл. 2 приведены графики зависимостей времени полета, наибольших и наименьших значений угловых скоростей колес и управляющих моментов от расстояния X . По графикам видно, что время полета по мере увеличения X возрастает для поверхностей типов 1 и 4 и убывает для типов 2 и 3. Для поверхности типов 1 и 4 это обусловлено тем, что ордината точки приземления робота уменьшается с увеличением параметра X за счет удаления второй опорной поверхности от точки начала прыжка, а для поверхностей типов 2 и 3, наоборот, ордината точки приземления возрастает, что приводит к уменьшению времени полета.

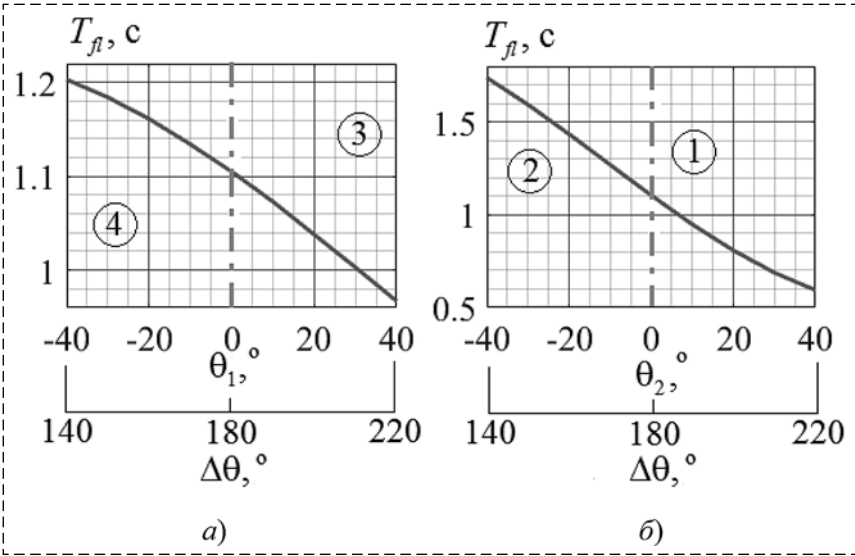


Рис. 5. Графики зависимостей $T_f(\theta_j)$ при $X = 1$ м:
 $a - j = 1; \theta_2 = 0^\circ; \delta - j = 2, \theta_1 = 0^\circ$
 Fig. 5. Graphs of time functions $T_f(\theta_j)$ where $X = 1$ m:
 $a - j = 1; \theta_2 = 0^\circ; \delta - j = 2, \theta_1 = 0^\circ$

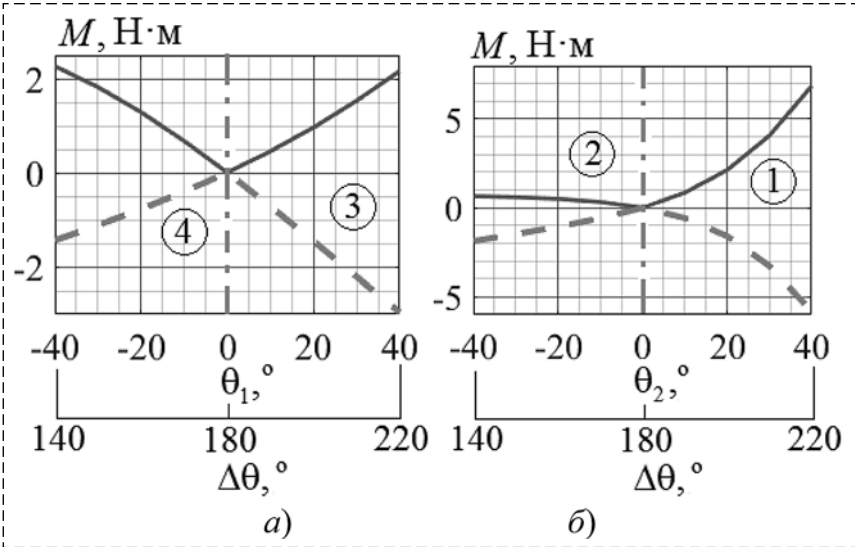
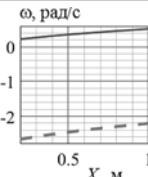
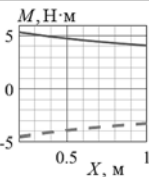
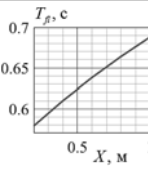
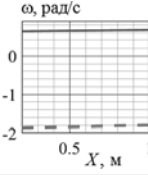
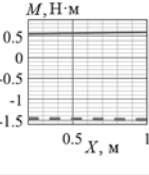
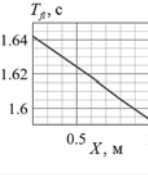
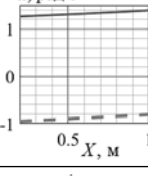
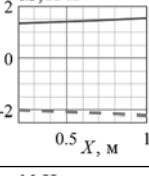
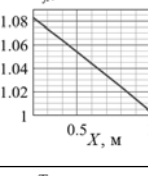
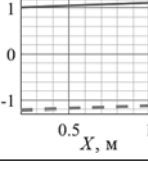
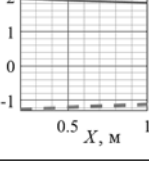
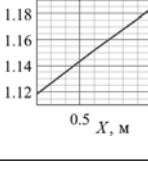


Рис. 7. Графики зависимостей: — — $M_{\max}(\theta_j)$, ---- — $M_{\min}(\theta_j)$ при $X = 1$ м:
 $a - j = 1; \theta_2 = 0^\circ; \delta - j = 2, \theta_1 = 0^\circ$
 Fig. 7. Graphs of time functions: — — $M_{\max}(\theta_j)$, ---- — $M_{\min}(\theta_j)$ where $X = 1$ m:
 $a - j = 1; \theta_2 = 0^\circ; \delta - j = 2, \theta_1 = 0^\circ$

Таблица 2
Table 2

Влияние параметра X на характеристики полета

Influence of the parameter X on the flight characteristics

Тип поверх- ности	Характеристики		
Тип 1: $\theta_1 = 0^\circ$, $\theta_2 = 30^\circ$			
Тип 2: $\theta_1 = 0^\circ$, $\theta_2 = -30^\circ$			
Тип 3: $\theta_1 = 30^\circ$, $\theta_2 = 0^\circ$			
Тип 4: $\theta_1 = -30^\circ$, $\theta_2 = 0^\circ$			

Наибольшие и модули наименьших значений управляющих моментов убывают с ростом величины X для поверхностей типов 1 и 4, т.е. для тех типов, при которых время полета с увеличением X возрастает, и, наоборот, увеличиваются для типов 2 и 3, для которых характерно убывание времени полета при росте X , причем для типов 1 и 4 справедливо неравенство $|M_{\max}| > |M_{\min}|$ для одних и тех же значений X , а для типов 2 и 3 — $|M_{\max}| < |M_{\min}|$.

Наибольшие и модули наименьших значений угловых скоростей вращения колес для всех типов поверхностей при этом возрастают при увеличении параметра X .

Заключение

В работе рассматривается управляемое движение колесного прыгающего робота во время полета, заключающееся в изменении ориентации устройства таким образом, чтобы его приземление происходило одновременно на передние и задние колеса. Для управления ориентацией робота используется вращение колес

специальной колесной платформы. Предложены четыре типа опорных поверхностей, описываемые кусочно-линейными функциями, при условии, что одна из двух поверхностей (с которой или на которую происходит прыжок) является наклонной, а вторая — горизонтальной. Для построения траектории движения прыгающего робота и управления его ориентацией разработана система управления, построенная на квадратичном программировании. В результате численного моделирования, проведенного по описанной в работе математической модели полета робота, установлено влияние на угловые скорости вращения колес, на моменты, посредством которых эти вращения происходят, а также на время полета трех варьируемых параметров опорных поверхностей: двух углов наклона к горизонту и расстояния "сшивки".

Список литературы

1. Dubowsky S., Kesner S., Plante J., Boston P. Hopping mobility concept for search and rescue robots // J. of Industrial Robot. 2008. Vol. 35, N. 3. P. 238–245.
2. Sayyad A., Seth B., Seshu P. Single-legged hopping robotics research // Robotica. 2007. Vol. 25, N. 5. P. 587–613.
3. Kovac M., Schlegel M., Zufferey J.-C., Floreano D. Steerable miniature jumping robot // Autonomous Robots. 2010. Vol. 28. P. 295–306.
4. Stoeter S., Papanikolopoulos N. Kinematic Motion Model for Jumping Scout // Transactions on Robotics and Automation: Proc. of the IEEE. Orlando, 2006. Vol. 22, N. 2. P. 398–403.
5. Akinfiyev T., Armada M., Montes H. Vertical Movement of Resonance Hopping Robot with Electric Drive and Simple Control System // Proc. of the MED. Rhodes, Greece, 2003. P. 1–6.
6. Яцун С. Ф., Волкова Л. Ю., Ворочаев А. В. Исследование движения многозвенного робота, перемещающегося прыжками и планированием // Справочник. Инженерный журнал с приложением. 2014. № S4. С. 12–17.
7. Kovac M. Bioinspired jumping locomotion for miniature robotics: Ph.D. dissertation. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2010. 194 p.
8. Ворочаева Л. Ю., Мальчиков А. В., Савин С. И. Основание и выбор схемы колесной прыгающей мониторинговой платформы // Вестник Брянского государственного технического университета. 2018. № 5 (66). С. 40–50.
9. Ворочаева Л. Ю., Мальчиков А. В., Савин С. И. Определение диапазонов допустимых значений геометрических параметров колесного прыгающего робота // Известия ЮЗГУ. 2018. Т. 22, № 1(76). С. 76–84.
10. Ворочаева Л. Ю., Мальчиков А. В., Савин С. И. Конструктивные особенности и классификация прыгающих роботов // Cloud of science. 2018. Т. 5, № 3. С. 473–497.
11. Никитин Г. А., Баканов Е. А. Основы авиации: учебник для вузов гражданской авиации. М.: Транспорт, 1984. 261 с.
12. Jatsun S., Savin S., Yatsun A. Comparative analysis of iterative LQR and adaptive PD controllers for a lower limb exoskeleton // In Cyber Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER): IEEE Intern. Conf. Chengdu, China, 2016. P. 239–244.
13. Posa M., Cantu C., Tedrake R. A direct method for trajectory optimization of rigid bodies through contact // Intern. J. of Robotics Research. 2014. Vol. 33, N. 1. P. 69–81.

Study of Orientation Control for a Wheeled Jumping Robot in the Flight Phase of Motion

S. F. Jatsun, Head of the Department, newteormeh@inbox.ru, L.Yu. Vorochaeva, mila180888@yandex.ru,

¹Southwest State University, Kursk, 305040, Russian Federation

S. I. Savin, s.savin@innopolis.ru

Innopolis University, Innopolis, 420500, Russian Federation

Corresponding author: Vorochaeva Lyudmila Yu., Docent, Southwest State University, Kursk, 305040, Russian Federation, e-mail: mila180888@yandex.ru

Accepted on December 05, 2018

Abstract

The work studies the flight phase (a part of jumping motion) of a jumping robot. The robot consists of the body with wheeled base and a jump booster module installed in the body. The jump booster module allows the robot to accelerate in a given direction up to a predetermined speed, allowing to control the velocity of the robot at the moment when it breaks contact with the supporting surface. The goal of this study is to develop a control system for the robot's wheels, allowing to use their inertial properties to control the robot orientation at the moment of landing. This is achieved by controlling the wheels' orientation throughout the duration of the motion. The goal of controlling the orientation of the robot at the moment of landing is to be able to land on all four wheels and avoid tipping over. The paper studies the supporting surfaces (from which the robot jumps and to which the robot lands) described by piecewise linear functions, including a horizontal and sloped linear sub-functions. In this work, four types of supporting surfaces were distinguished, which the distinction based on the slope of the mentioned about sub-function. Another varying parameter is the point where two sub-functions connect. For the purpose of this study a kinematic and dynamic model of the robot were developed, and a control system design was proposed. The proposed control system includes a trajectory planner that allows to plan the robot's motion resulting in the desired orientation of the robot's body at the moment of landing. This problem was formulated as an optimization problem. Simulation results showed the dependencies between the three supporting surface parameters (two angles describing linear sub-functions and the point where the sub-functions intersect) and the duration of the robot flight, the achieved velocities of the robot's wheels and required motor torques. The influence of those parameters on the maximal and minimal values of the wheels' angular velocities achieved during the flight were demonstrated. This could be used in designing this type of robots, in particular it could help to set specifications for the robot's wheel motors.

Keywords: wheeled jumping robot, controlled flight phase, orientation control, supporting surface types

Acknowledgements: The work was performed as part of the RFBR project No. 18-31-00075.

For citation:

Jatsun S. F., Vorochaeva L. Yu., Savin S. I. Study of Orientation Control for a Wheeled Jumping Robot in the Flight Phase of Motion, *Mekhatronika, Avtomatizatsia, Upravlenie*, 2019, vol. 20, no. 3, pp. 236–243.

DOI: 10.17587/mau.20.236-243

References

1. Dubowsky S., Kesner S., Plante J., Boston P. Hopping mobility concept for search and rescue robots, *J. of Industrial Robot*, 2008, vol. 35, no. 3, pp. 238–245.
2. Sayyad A., Seth B., Seshu P. Single-legged hopping robotics research, *Robotica*, 2007, vol. 25, no. 5, pp. 587–613.
3. Kovac M., Schlegel M., Zufferey J.-C., Floreano D. Steerable miniature jumping robot, *Autonomous Robots*, 2010, vol. 28, pp. 295–306.
4. Stoeter S., Papanikolopoulos N. Kinematic Motion Model for Jumping Scout, *Transactions on Robotics and Automation: Proc. of the IEEE*, Orlando, 2006, vol. 22, no. 2, pp. 398–403.
5. Akiniev T., Armada M., Montes H. Vertical Movement of Resonance Hopping Robot with Electric Drive and Simple Control System, *Proc. of the MED*, Rhodes, Greece, 2003, pp. 1–6.
6. Jatsun S. F., Volkova L. Yu., Vorochaev A. V. *Issledovanie dvizheniya mnogozvennogo robota, peremeshchayushchegosya pryzhkami i planirovaniem* (Investigation of movement of multi-link

robot moving with jumps and planning), *Spravochnik. Inzhenernyy zhurnal s prilozheniem*, 2014, no. S4, pp. 12–17 (in Russian).

7. Kovac M. Bioinspired jumping locomotion for miniature robotics: Ph.D. dissertation. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2010, 194 p.

8. Vorochaeva L. Yu., Malchikov A. V., Savin S. I. *Obosnovanie i vybor skhemy kolesnoj prygayushchej monitoringovoy platformy* (Justification and choice of the scheme of the wheeled jumping monitoring platform), *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2018, no. 5 (66), pp. 40–50 (in Russian).

9. Vorochaeva L. Yu., Malchikov A. V., Savin S. I. *Opreделение diapazonov dopustimyh znachenij geometricheskikh parametrov kolesnogo prygayushchego robota* (Ranges of admissible values of geometric parameters of a wheeled jumping robot), *Izvestiya YUZGU*, 2018, vol. 22, no. 1(76), pp. 76–84 (in Russian).

10. Vorochaeva L. Yu., Malchikov A. V., Savin S. I. *Konstruktivnye osobennosti i klassifikatsiya prygayushchih robotov* (Design features and classification of jumping robots), *Cloud of science*, 2018, vol. 5, no. 3, pp. 473–497 (in Russian).

11. Nikitin G. A., Bakanov E. A. *Osnovy aviatsii* (The fundamentals of aviation): uchebnik dlya vuzov grazhdanskoj aviatsii, Moscow, Transport, 1984, 261 p. (in Russian).

12. Jatsun S., Savin S., Yatsun A. Comparative analysis of iterative LQR and adaptive PD controllers for a lower limb exoskeleton, *In Cyber Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER): IEEE Intern. Conf.*, Chengdu, China, 2016, pp. 239–244.

13. Posa M., Cantu C., Tedrake R. A direct method for trajectory optimization of rigid bodies through contact, *Intern. J. of Robotics Research*, 2014, vol. 33, no. 1, pp. 69–81.