

# ПРЕОДОЛЕНИЕ ШЕСТИНОГИМ РОБОТОМ ВЫСОКИХ ПРЕПЯТСТВИЙ С ПОМОЩЬЮ СИЛ СУХОГО ТРЕНИЯ<sup>1</sup>

Ю.Ф. Голубев, В.В. Корянов, Москва, Россия

The paper introduces to methods of autonomous robots climbing on high vertical obstacles. These methods are developed for six legged insectomorphic walking robot. Obstacles under consideration are a vertical column with a top, a corner of a house, and a combination of two objects. One of them is the vertical column and the other is a lofty horizontal shelf with a vertical wall. A motion of a robot is designed so that the walker could climb on the shelf by using the vertical column as a support. Robot can use only Coulomb's friction forces to realize its motion along obstacles. Different regimes of climbing are considered in dependence on combinations of the column's and the shelf's altitudes. Results of 3-D computer simulations of the full dynamic of the robot are presented to demonstrate the practicability of the proposed robot motion control.

Шестиногий шагающий аппарат структурно состоит из корпуса в форме параллелепипеда и шести ног, каждая из которых имеет два звена (бедро и голень). Звенья каждой ноги принадлежат плоскости, параллельной строительной вертикали. Ноги крепятся симметрично вдоль наибольших сторон корпуса последовательно на равном расстоянии. Конфигурация ноги относительно корпуса задается тремя углами: два из них определяют положение бедра, третий есть угол между бедром и голенью. Изменение углов осуществляется с помощью соответствующих двигателей.

Момент на валу двигателя, управляющего отдельной степенью свободы, берется в виде:

$$M = U - c_e \dot{\varphi}, \quad U_0 = -\chi_1(\varphi - \varphi_0) + \chi_2 \dot{\varphi}, \quad U = \begin{cases} \text{sign}(U_0)U_{\max}, & |U_0| > U_{\max}, \\ U_0, & |U_0| \leq U_{\max}, \end{cases}$$

где  $c_e$  — параметр приводов;  $\varphi_0$  — программное значение шарнирного угла,  $\varphi$  и  $\dot{\varphi}$  — его измеренные значения. Измерения предполагаются абсолютно точными. Коэффициенты  $\chi_1$ ,  $\chi_2$  выбираются так, чтобы действительные части корней характеристического уравнения привода были отрицательными.

Взаимодействие ног с поверхностью столба и грунтом рассчитывается согласно модели кулоновского трения, учитывающей упруго-вязкие свойства среды:

---

<sup>1</sup> Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 04-01-00065, 04-01-00105); ИШ-1835.2003.1.

$$\mathbf{N} = \begin{cases} 0, & l < 0, \\ \mathbf{F}, & l \geq 0, \end{cases} \quad \mathbf{F} = \begin{cases} \mathbf{F}_e = c(\mathbf{r}_0 - \mathbf{r}) - d\dot{\mathbf{r}}, & |\mathbf{F}_e - (\mathbf{F}_e \cdot \mathbf{n})\mathbf{n}| \leq k|\mathbf{F}_e \cdot \mathbf{n}|, \\ \frac{k|\mathbf{F}_e \cdot \mathbf{n}|(\mathbf{F}_e - (\mathbf{F}_e \cdot \mathbf{n})\mathbf{n})}{|\mathbf{F}_e - (\mathbf{F}_e \cdot \mathbf{n})\mathbf{n}|} + (\mathbf{F}_e \cdot \mathbf{n})\mathbf{n}, & |\mathbf{F}_e - (\mathbf{F}_e \cdot \mathbf{n})\mathbf{n}| > k|\mathbf{F}_e \cdot \mathbf{n}|, \end{cases}$$

где  $\mathbf{N}$  — реакция в точке опоры,  $l = (\mathbf{r} - \mathbf{r}_0) \cdot \mathbf{n}$  — глубина проникновения стопы в опорную поверхность,  $\mathbf{r}$  — радиус-вектор текущей позиции стопы,  $\mathbf{r}_0$  — радиус-вектор точки первого контакта стопы с опорной поверхностью,  $\mathbf{n}$  — единичный вектор внутренней нормали к опорной поверхности,  $c$  — коэффициент упругости грунта,  $d$  — коэффициент вязкого трения,  $k$  — коэффициент трения скольжения. Никакие другие средства контакта аппарат использовать не может.

Вскарabкивание на угол здания или на вертикальный столб происходит в 5 этапов: подход к препятствию, переход на препятствие; движение по нему вверх; переход на вершину препятствия.

При осуществлении перехода робота на препятствие передняя точка корпуса движется вертикально вверх с постоянной скоростью. Задняя точка корпуса вынужденно движется по горизонтальной прямой. Это приведет к тому, что корпус будет поворачиваться и примет вертикальное положение. В процессе движения корпуса перенос ног на препятствие подчиняется расписанию походки галоп [1].

В задаче о залезании на высокий уступ с помощью вертикального столба, предполагается, что робот знает высоту столба и уступа и в начальный момент времени стоит на горизонтальной плоскости у их подножия. Показано существование комфортабельного решения задачи о преодолении сложной комбинации препятствий в виде столба и высокого уступа с использованием сил кулоновского трения с практически реализуемым коэффициентом трения, равным 1. Сложность маневров, выполняемых для решения задачи, и сама возможность ее решения существенно зависят как от геометрических характеристик робота, так и отношения размеров препятствий и робота. Результаты трехмерного компьютерного моделирования динамики робота свидетельствуют о практической реализуемости найденного решения задачи о преодолении рассмотренной группы препятствий [2].

### Литература

1. Охочимский Д.Е., Голубев Ю.Ф. Механика и управление движением автоматического шагающего аппарата. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1984.
2. Голубев Ю.Ф., Корянов В.В. Построение движений инсектоморфного робота, преодолевающего комбинацию препятствий с помощью сил кулоновского трения. Известия РАН, Теория и системы управления № 3, 2005. С. 143-155.