

УДК 62.50

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ БЕГА ЧЕТЫРЕХНОГОГО ШАГАЮЩЕГО АППАРАТА

**Саенко О.С., магистрант, Рафиков Г.Ш., доцент, к.т.н.**  
*(Донецкий национальный технический университет, г. Донецк,  
Украина)*

С увеличением числа ног шагающего аппарата (ША) расширяется область статически устойчивой ходьбы, однако большее число ног приводит к усложнению управления. Результаты исследований [1] показывают, что при увеличении скорости статически устойчивое передвижение не будет достаточно эффективным, так как потребует соответственно повышения скорости переноса ног. Поэтому на высоких скоростях целесообразно переходить к динамическим режимам движения, аналогично тому, как это имеет место у животных. Это объясняет возросший интерес к разработке алгоритмов управления движением аппаратов, перемещающихся в рамках динамической устойчивости. Четырехногий бег является статически неустойчивым в любой фазе движения. Понятие динамической устойчивости можно также определить как периодическую устойчивость, когда система в конце цикла восстанавливает свое первоначальное состояние. В данной работе исследуется ША как система с периодически устойчивым движением.

Целью работы является синтез алгоритмов управления четырехногим ША при пространственном движении бегом, а также стабилизация движения в фазах опоры и полета.

Рассматривается аппарат, состоящий из массивного корпуса и четырех одинаковых невесомых ног. С корпусом аппарата связана декартова правая система координат  $Oxyz$  (рис. 1), оси которой направлены вдоль главных осей инерции корпуса. Положение корпуса относительно осей абсолютной системы координат  $O_1\xi\eta\zeta$  (плоскость  $O_1\xi\eta$  – горизонтальна) определяется координатами центра масс корпуса  $\bar{R}_0 = (\xi, \eta, \zeta)$  и углами  $\psi$  – рысканья,  $\theta$  – тангажа,  $\gamma$  – крена. Аппарат движется осью  $Oy$  вперед. Ось  $Oz$  является конструктивной вертикалью корпуса.

Контакт ноги с опорной поверхностью имеет точечный характер. Взаимодействие ноги с опорной поверхностью сводится к силе реакции опорной поверхности.

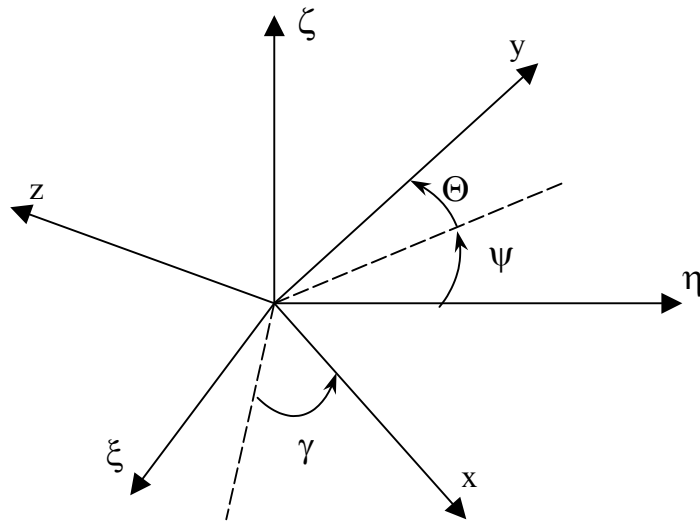


Рисунок 1 – Связь между абсолютной системой координат и системой, связанной с аппаратом

Движение корпуса аппарата описывается уравнениями движения твердого тела (корпуса) под действием силы тяжести, сил реакции опорной поверхности в точках опоры ног и возмущающих сил. Математическая модель описывается выражением (1) с учетом (2).

$$\left\{ \begin{array}{l} m\ddot{\xi} = N_{\xi} + F_{\xi} \\ m\ddot{\eta} = N_{\eta} + F_{\eta} \\ m\ddot{\zeta} = N_{\zeta} - mg + F_{\zeta} \\ J_x \dot{\omega}_x + (J_y - J_z)\omega_y \omega_z = M_x + M_{Fx} \\ J_y \dot{\omega}_y + (J_x - J_z)\omega_x \omega_z = M_y + M_{Fy} \\ J_y \dot{\omega}_z + (J_y - J_x)\omega_x \omega_y = M_z + M_{Fz} \end{array} \right. , \quad (1)$$

где

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{N} = \sum_{i \in I_0} \bar{N}_i \\ \bar{M} = \sum_{i \in I_0} \bar{r}_{ci} \times \bar{N}_i \end{array} \right. , \quad \left\{ \begin{array}{l} \omega_x = \dot{\theta} \cos \gamma - \dot{\psi} \cos \theta \sin \gamma \\ \omega_y = \dot{\gamma} + \dot{\psi} \sin \theta \\ \omega_z = \dot{\theta} \sin \gamma - \dot{\psi} \cos \theta \cos \gamma \end{array} \right. , \quad (2)$$

$\bar{F} = (F_\xi, F_\eta, F_\zeta)$  - возмущающие силы,  $\bar{M}_F$  - момент возмущающих сил относительно центра масс корпуса;  $\bar{N}_i$  - реакции в точках опоры ног;  $\bar{r}_{ci}$  - радиус-вектор стопы  $i$ -той ноги в системе координат  $Oxyz$ ;  $I_0$  - множество индексов опорных ног в текущий момент времени;  $m, J_x, J_y, J_z$  - масса и главные моменты инерции корпуса. Величина возмущающих сил  $\bar{F}$  и их момента относительно центра масс  $\bar{M}_F$  не известна системе управления движением аппарата. При решении задач построения программного движения и стабилизации движения аппарата  $\bar{F} = 0, \bar{M}_F = 0$ .

Исследуется бег аппарата парными походками (рысь, иноходь и галоп) по горизонтальной плоскости. После каждой фазы опоры на две ноги (длительность этой фазы  $T_0$ ) следует фаза полета. Одну опорную фазу движения и следующую за ней фазу полета будем называть шагом. Продолжительность фазы полета  $T_1$  не меняется от шага к шагу. Программное движение обеспечивает равномерность нагрузки в опорной фазе на обе опорные ноги и строится так, что в проекции на горизонтальную поверхность центр масс аппарата движется равномерно и прямолинейно [2]:

$$\begin{aligned} \xi &\equiv 0, \quad \eta = \eta_0 + V(t - t_0), \\ \zeta_0^v = \zeta_1^v &= h, \quad \ddot{\zeta} = \text{const} \quad \text{при } t \in [t_0^v, t_1^v], \end{aligned} \quad (3)$$

где  $V$  - скорость движения аппарата,  $t$  - текущее время,  $t_0^v$  - момент начала опорной фазы  $v$ -го шага,  $t_1^v$  - момент начала фазы полета,  $t_2^v$  - момент окончания  $v$ -го шага,  $h$  - клиренс.

Подставляя (3) в (1), получим

$$N_\xi = 0, \quad N_\eta = 0, \\ N_\zeta = \begin{cases} \frac{mg(T_0 + T_1)}{T_0} & \text{при } t \in [t_0^v, t_1^v]. \\ 0 & \text{при } t \in [t_1^v, t_2^v] \end{cases}$$

В ходе работы разработаны алгоритмы стабилизации движения аппарата по управляемым координатам ( $\xi, \eta, \zeta, \psi, \tau, \gamma$ ). Разработанный алгоритм обеспечивает реализацию построения программного движения аппарата при наличии различного рода возмущений. В фазе полета аппарат движется под действием силы тяжести и возмущающих сил и его движение не управляемо. В опорной фазе стабилизация движения аппарата осуществляется за счет изменения реакций в точках опоры ног (управляющих усилий в степенях подвижности ног) и варьирования координат точек постановки ног на опорную поверхность для последующих шагов (изменение бокового выноса ног при стабилизации по углу крена, либо переднего выноса ног при стабилизации по углу тангажа). Полученные при этом законы движения используются в качестве номинальных в алгоритмах стабилизации движения аппарата по управляемым координатам.

Выводы:

1. В данной работе исследовано пространственное движение четырехногого аппарата с невесомыми ногами, перемещающегося парными походками (рысь, иноходь и галоп).
2. Получена математическая модель динамики движения в режиме бега. Приведены аналитические выражения для фазы полета и опоры.
3. Решены задачи построения программного движения и стабилизации движения аппарата.
4. Проведенные экспериментальные исследования походок в режиме бега и полученные графические зависимости изменения координат центра масс и углов рыскания, тангажа, и крена, доказывают работоспособность синтезированных алгоритмов стабилизации движения при наличии различного рода возмущений. Исследования проведены на ПЭВМ при помощи пакета прикладных программ MATLAB 6.0.

Перечень ссылок

1. Охоцимский Д.Е., Платонов А.К., Лапшин В.В. Исследование энергетики движения шестиногого шагающего аппарата. Препринт ИППМ АН СССР - М.: 1981, №96 – 29 с.
2. Лапшин В.В. Управление движением четырехногого шагающего аппарата. Препринт ИППМ АН СССР - М.: 1984, №83 – 27 с.