

УДК 531.8

В. В. ЛАПШИН

УПРАВЛЕНИЕ ПЕРИОДИЧЕСКИМ ДВИЖЕНИЕМ ЧЕТЫРЕХНОГО АППАРАТА ПРИ БЕГЕ РЫСЬЮ, ИНОХОДЬЮ И ГАЛОПОМ

Решены задачи построения периодического программного движения и стабилизации движения четырехного аппарата, перемещающегося парными походками (рысь, иноходь, галоп). Программное движение построено так, что в каждый момент времени обеспечивается равномерность нагрузки на обе опорные ноги. Стабилизация движения аппарата осуществляется за счет изменения управляющих усилий в степенях подвижности ног и варьирования координат точек постановки ног на опорную поверхность.

1. Введение. Для динамических режимов шагания четырехногих машин разработаны различные способы управления их движением: основанные на использовании методов конструирования аналитических регуляторов¹ [1] и на использовании «жестких» алгоритмов управления с большими коэффициентами усиления² [2], рассмотрены проблемы обеспечения заданного рисунка ходьбы (движения аппарата по всем степеням подвижности в непараметризованном по времени виде, например, в виде функции пройденного пути) за счет соответствующего темпа исполнения (скорости) движения [3].

В данной работе предложенная ранее [4] методика решения задач построения программного движения и стабилизации движения четырехного аппарата при беге парными походками обобщена на случай периодического программного движения центра масс аппарата с заданной средней скоростью. Рассматриваемые походки (рысь, иноходь и галоп) отличаются только составом опорных ног. После каждой фазы опоры на две ноги следует фаза полета.

Аппарат состоит из массивного корпуса и четырех невесомых ног. Используемые походки и обозначения приведены в [4]. Шагом назовем одну опорную фазу движения и следующую за ней фазу полета.

2. Программное движение. Исследуется периодическое программное движение аппарата. В общем случае период движения равен продолжительности двух шагов $2T_c$. Центр масс аппарата в проекции на горизонтальную плоскость $O, \xi\eta$ в среднем движется в заданном направлении с заданной скоростью $\langle \dot{\xi} \rangle = 0$, $\langle \dot{\eta} \rangle = V$, где ξ, η — горизонтальные координаты центра масс корпуса, треугольными скобками обозначены их усредненные значения на промежутке времени $2T_c$. В фазе полета центр масс движется по баллистической траектории. Значение вертикальной координаты центра масс корпуса ζ в начале и конце каждой опорной и безопорной фаз движения равно заданной величине h .

Способ задания движения центра масс аппарата в опорной фазе, удовлетворяющий этим условиям и естественным условиям симметрии движения аппарата, для каждой из походок рассмотрен в работе³.

¹ Бордюг Б. А., Ларин В. Б. Управление движением четырехного шагающего аппарата: Препринт № 87. Киев: Ин-т матем. АН УССР, 1987.

² Болотин Ю. В. Динамическая стабилизация статически неустойчивых походок шагающего аппарата: Препринт № 63. М.: Ин-т прикл. матем. АН СССР, 1983.

³ Лапшин В. В. Управление периодическим движением четырехного аппарата, перемещающегося рысью, иноходью и галопом: Препринт № 87. М.: Ин-т прикл. матем. АН СССР, 1985.

Движение корпуса вокруг центра масс строится в предположении, что угловые координаты корпуса малы. Движение по угловым координатам корпуса в опорной фазе описывается уравнениями $J_z \psi'' = M_{\zeta}$, $J_x \theta'' = M_{\xi}$, $J_y \gamma'' = M_{\eta}$, где M — момент сил реакции опорной поверхности относительно центра масс корпуса. В фазе полета

$$\psi'' = 0, \quad \theta'' = 0, \quad \gamma'' = 0 \quad (1)$$

Потребуем, чтобы в опорной фазе в каждый момент времени реакции в точках опоры ног были равны $\bar{N}_{i1} = \bar{N}_{i2}$. Тогда в опорной фазе ν -го шага

$$J_z \psi'' = 1/2 m \{ (\xi_{ci1}^{\nu} + \xi_{ci2}^{\nu} - 2\xi) \eta'' - (\eta_{ci1}^{\nu} + \eta_{ci2}^{\nu} - 2\eta) \xi'' \} \quad (2)$$

$$J_x \theta'' = m \{ 1/2 (\eta_{ci1}^{\nu} + \eta_{ci2}^{\nu} - 2\eta) (\xi'' + g) + \xi \eta'' \}$$

$$J_y \gamma'' = -m \{ 1/2 (\xi_{ci1}^{\nu} + \xi_{ci2}^{\nu} - 2\xi) (\zeta'' + g) + \zeta \xi'' \}$$

где m , J_x , J_y , J_z — масса и главные моменты инерции корпуса, ξ_{ci1}^{ν} , ξ_{ci2}^{ν} , η_{ci1}^{ν} , η_{ci2}^{ν} — координаты стоп опорных ног.

Из (1), (2) определяются периодические программные режимы движения по углам тангажа, крена и рысканья, соответствующие заданному периодическому программному закону движения центра масс аппарата, для каждой из рассматриваемых походок.

3. Стабилизация движения аппарата. Алгоритм стабилизации обеспечивает выход на построенное периодическое программное движение для каждой из рассматриваемых походок при наличии различного рода возмущений. В фазе полета аппарат движется под действием силы тяжести и движение его корпуса неуправляемо. 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 предстоящих шагов. При этом предполагается, что в опорной фазе из показаний навигационной системы известны все фазовые координаты корпуса аппарата и абсолютные координаты стоп опорных ног.

Рассмотрим сначала алгоритм стабилизации движения для походок рысь и иноходь.

В опорной фазе за счет выбора реакций в точках опоры ног можно обеспечить произвольный закон движения, удовлетворяющий начальным значениям фазовых координат корпуса, только по пяти координатам корпуса $\xi = (\xi, \eta, \zeta; \psi, \theta)$, которые будем называть управляемыми координатами. Это объясняется тем, что за счет изменения реакций опорной поверхности нельзя создать момент относительно линии, соединяющей точки опоры ног.

При стабилизации движения аппарата работают два контура управления. Первый за счет выбора соответствующих значений реакций в точках опоры ног обеспечивает движение вдоль линий перехода по управляемым координатам корпуса ξ с целью выхода в требуемое положение ξ_p , ξ_r в конце опорной фазы. Второй контур управления вычисляет значения бокового и переднего выноса ног для двух предстоящих шагов с целью стабилизации движения аппарата по углу крена γ и выравнивания нагрузки на обе опорные ноги.

Стабилизация движения аппарата по углу крена γ осуществляется за счет изменения бокового выноса точек постановки ног на опорную поверхность относительно оси $O_1 \eta$ (бокового выноса ног) для двух предстоящих шагов. Решается эта задача в предположении, что в течение этих двух шагов движение центра масс корпуса и значения реакций в точках опоры ног совпадают с программными, а закон движения по углу крена описывается уравнениями (1), (2).

Боковой вынос ног для ν -го и $(\nu+1)$ -го шагов вычисляется в фазе полета $(\nu-1)$ -го шага. Из (1), (2), используя значения скорости изменения

угла крена на программном движении в начале опорной фазы, получаем

$$\begin{aligned} \gamma(t_0^{v+2}) = & \gamma(t_1^{v-1}) + \dot{\gamma}(t_1^{v-1})T_1 + 2(\dot{\gamma}(t_1^{v-1}) - \gamma_D(t_0^v))T_c - \\ & - (mgT_c/J_y) \{ \Delta^v (3/2 T_0 + 2T_1) + \Delta^{v+1} (1/2 T_0 + T_1) - \Delta_D^v T_c \} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\dot{\gamma}(t_0^{v+2}) = \dot{\gamma}(t_1^{v-1}) - (mgT_c/J_y) (\Delta^v + \Delta^{v+1})$$

$$\Delta^v = 1/2 (\xi_{ci1}^v + \xi_{ci2}^v)$$

где $\gamma(t_1^{v-1})$, $\dot{\gamma}(t_1^{v-1})$ — значения угла крена и скорости его изменения в начале фазы полета $(v-1)$ -го шага, полученные из показаний навигационной системы, $\gamma_D(t)$ — программное движение по углу крена, Δ_D^v — значение Δ^v на программном движении.

Из (3) следует, что при наличии только возмущений по начальным условиям для выхода на программное движение по углу крена в конце $(v+1)$ -го шага необходимо и достаточно, чтобы

$$\begin{aligned} \Delta^v = \Delta_*^v = \Delta_D^v + J_y (mgT_c^2)^{-1} \{ \gamma(t_1^{v-1}) + \dot{\gamma}(t_1^{v-1})T_1 - \\ - \gamma_D(t_0^v) + (\dot{\gamma}(t_1^{v-1}) - \gamma_D(t_0^v)) (3/2 T_0 + T_1) \} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta^{v+1} = \Delta_*^{v+1} = \Delta_D^{v+1} - J_y (mgT_c^2)^{-1} \{ \gamma_1(t_1^{v-1}) + \dot{\gamma}(t_1^{v-1})T_1 - \\ - \gamma_D(t_0^v) + 1/2 (\dot{\gamma}(t_1^{v-1}) - \gamma_D(t_0^v))T_0 \} \end{aligned}$$

Потребуем, чтобы $a_{\min} \leq \xi_{ci} \leq a_{\max}$ для правых ног, и $-a_{\max} \leq \xi_{ci} \leq -a_{\min}$ для левых ног, где значения a_{\min} , a_{\max} являются функциями параметров походки и максимальной длины ноги L и обеспечивают выполнение условий дотягивания ног до точек постановки ног на опорную поверхность. Тогда

$$\Delta_{\min}^v \leq \Delta^v \leq \Delta_{\max}^v \quad (4)$$

В силу ограничений (4) не всегда можно обеспечить выход на программное движение по углу крена в течение двух шагов. Потребуем, чтобы в конце $(v+1)$ -го шага значения γ , $\dot{\gamma}$ минимальным образом отличались от программных по норме (c — весовой множитель)

$$\{ \gamma(t_0^{v+2}) - \gamma_D(t_0^{v+2}) \}^2 + c^2 \{ \dot{\gamma}(t_0^{v+2}) - \dot{\gamma}_D(t_0^{v+2}) \}^2 \rightarrow \inf$$

Тогда значения Δ^v , Δ^{v+1} , обеспечивающие стабилизацию движения по углу крена, определяются в результате решения задачи квадратичного программирования (3) — (5). Алгоритм решения задач такого типа приведен в [4]. Для решения этой задачи квадратичного программирования требуется относительно небольшой объем вычислений. Если тем не менее производительности ЭВМ, управляющей движением аппарата, недостаточно для решения задачи квадратичного программирования, то следует положить $\Delta^n = \max(\Delta_{\min}^n, \min(\Delta_{\max}^n, \Delta_*^n))$, ($n = v, v+1$).

В результате получаем значения Δ^v , Δ^{v+1} . Задача определения бокового выноса точек постановки ног на опорную поверхность ξ_{ci1}^v , ξ_{ci2}^v по полученному значению Δ^v для v -го шага имеет бесконечное множество решений. Целесообразно выбрать среди них значения ξ_{ci1}^v , ξ_{ci2}^v такие, что максимальное значения модуля отклонения ξ_{ci1}^v , ξ_{ci2}^v от их номинальных значений минимально. Методика решения этой задачи приведена в [4].

Для стабилизации движения аппарата по управляемым координатам ξ используется логика стабилизации движения шагающего аппарата [3, 4].

По информации о рассогласовании между текущими значениями фазовых координат ξ , ξ' и требуемых значений ξ_p , ξ_p' в конце текущей опорной фазы строятся линии перехода $\xi_i(t)$, двигаясь вдоль которых аппарат выходит в положение ξ_p , ξ_p' в конце опорной фазы. Система управления движением следит за точностью движения вдоль линий перехода. Если в реальном движении аппарат выходит из ε -коридора линий перехода, то назначается дополнительная коррекция и происходит пересчет линий перехода. Движение корпуса вдоль линий перехода обеспечивается за счет изменения реакций в точках опоры ног (управляющих усилий в степенях подвижности ног) [4].

В алгоритме стабилизации движения по управляемым координатам целесообразно положить некоторые из требуемых значений ξ_p , ξ_p' в конце опорной фазы отличными от их значений на программном движении [4].

В частности для облегчения стабилизации движения аппарата по управляемым координатам ξ и по углу крена γ целесообразно за счет изменения координат точек постановки ног на опорную поверхность в направлении движения аппарата (переднего выноса ног) и перестройки движения по углу тангажа для двух предстоящих шагов в максимально возможной степени обеспечить равномерность нагрузки на переднюю и заднюю ноги.

Решается эта задача определения переднего выноса ног для v -го и $(v+1)$ -го шагов в предположении, что движение по углу тангажа θ описывается уравнениями (1), (2), а закон движения центра масс корпуса и значения реакций в точках опоры ног совпадают с программными. За счет изменения переднего выноса точек постановки ног на опорную поверхность на v -м и $(v+1)$ -м шагах обеспечивается выход на программное движение по углу тангажа в конце $(v+1)$ -го шага. Методика решения этой задачи аналогична решению рассмотренной выше задачи стабилизации движения по углу крена.

Полученное при этом движение по углу тангажа используется в качестве нового номинала при стабилизации движения по управляемым координатам.

Для галопа алгоритм стабилизации строится аналогичным образом. Только стабилизация движения по углу крена осуществляется за счет изменения реакций в точках опоры ног и бокового выноса ног, а стабилизация движения по углу тангажа осуществляется только за счет изменения координат точек постановки ног на опорную поверхность в направлении движения аппарата.

Отметим, что значения бокового и переднего выноса ног для предстоящих шагов, обеспечивающие стабилизацию движения аппарата, зависят только от отклонений углов крена и тангажа и скоростей изменения этих углов от их программных значений. Формулы для расчета бокового и переднего выноса ног не зависят от типа походки и способа построения программного движения аппарата.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бордюг Б. А., Ларин В. Б., Тимошенко А. Г. Задачи управления шагающими аппаратами. Киев: Наук. думка, 1985. 263 с.
2. Зацепин М. Ф., Новожилов И. В. Управление аллюрами четырехногой ходьбы // Изв. АН СССР. МТТ. 1986. № 5. С. 60–66.
3. Охоцимский Д. Е., Голубев Ю. Ф. Механика и управление движением автоматического шагающего аппарата. М.: Наука, 1984. 312 с.
4. Лапшин В. В. Управление движением четырехногого аппарата, перемещающегося рысью, иноходью и галопом // Изв. АН СССР. МТТ. 1985. № 5. С. 39–45.

Москва

Поступила в редакцию
13.XI.1986