

УДК 681.5

## Стабилизация ходьбы двуногого шагающего робота с поступательными кинематическими парами в суставах ног путем выполнения закона сохранения количества движения и момента количества движения

**Ю.И. Фанталов**

*Рассмотрена возможность обеспечения стабилизации движения двуногого шагающего робота путем сохранения количества движения и момента количества движения.*

**Ключевые слова:** двуногий шагающий робот, опорно-двигательный аппарат, поступательные кинематические пары, количество движения, момент количества движения материальной точки.

## Stabilization of movement for biped walking robot with forward kinematic steams in legs joints by observing the law of conservation of quantity of movement and moment of quantity of movement

**Yu.I. Fantalov**

*The article considers a possibility to maintain the stabilization of the biped walking robot movement by preserving the quantity of movement and the moment of the quantity of movement.*

**Keywords:** biped walking robot, musculoskeletal system, forward kinematic steams, quantity of movement, moment of a material point quantity of movement.

Локомоторная деятельность двуногого шагающего робота (ДШР) осуществляется его опорно-двигательным аппаратом (ОДА). Опорно-двигательный аппарат состоит из двух ног, каждая из которых состоит из голени, бедра и таза [1].

Голень и бедро, бедро и таз соединяются поступательными кинематическими парами V класса (рис. 1).

Движение ДШР организуется путем чередования подъема и перемещения ног. Состояние ног ОДА в процессе ходьбы иллюстрирует рис. 2.



**ФАНТАЛОВ**

Юрий Ильич

инженер кафедры  
«Автоматизированные  
системы  
и информационные  
технологии»

(Московский  
государственный  
университет информатики  
и приборостроения;

e-mail:

konsultant@mgupi.ru)

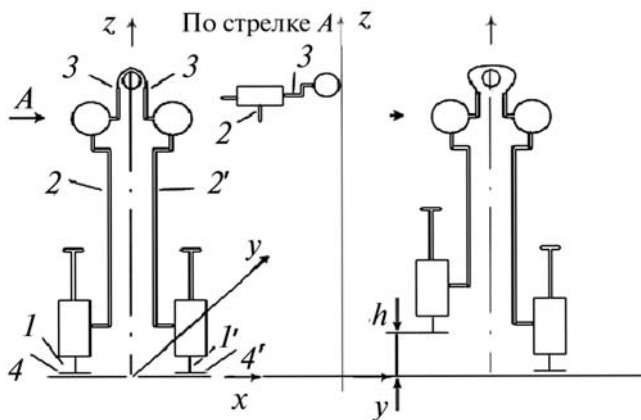


Рис. 1. Схема ОДА ДШР:

1-1' — голень; 2-2' — бедро; 3-3' — таз;  
4-4' — стопа

Ходьба должна быть циклической и периодической, т. е. должно быть чередование одноопорных состояний. Движение ноги организуется следующим образом:

- голень поднимается на высоту  $h$ ;
- в верхнем положении наблюдается кратковременный выстой голени в течение времени  $\delta$ , которое определяется временем, необходимым для реверса двигателя;
- голень опускается;
- параллельно с подъемом и опусканием голени происходит перемещение бедра, за счет которого нога двигается на величину  $S$  в сторону направления движения;
- включение и выключение двигателя бедра происходит с запаздыванием и опережением по отношению к времени включения и выключения двигателя голени;
- время запаздывания или опережения двигателя  $\Delta T [\Delta T = (0,05 \dots 0,1)T]$ ;
- время цикла ходьбы  $T = 2(t_{\text{под}} + \delta + t_{\text{опус}})$ ;
- время перемещения одной ноги  $T_1 = t_{\text{под}} + \delta + t_{\text{опус}}$ ;
- перемещение ноги должно начинаться с запаздыванием по отношению к подъему голени для того, чтобы при перемещении ноги она не волочилась по поверхности

Таким образом, подъем и опускания ног происходит без перерыва, в то время как перемещение ног выполняется с интервалом времени  $2\Delta T$ , в течение которого ноги неподвижны.

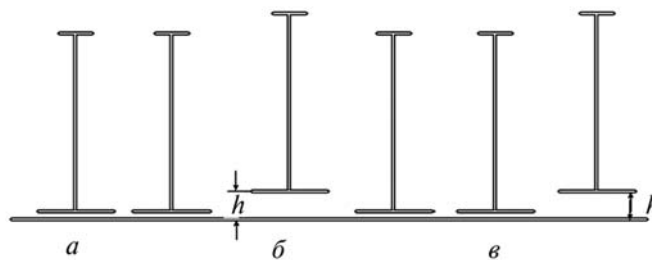


Рис. 2. Состояние ног ДШР в процессе ходьбы:  
а — двухопорное состояние; б, в — одноопорное состояние

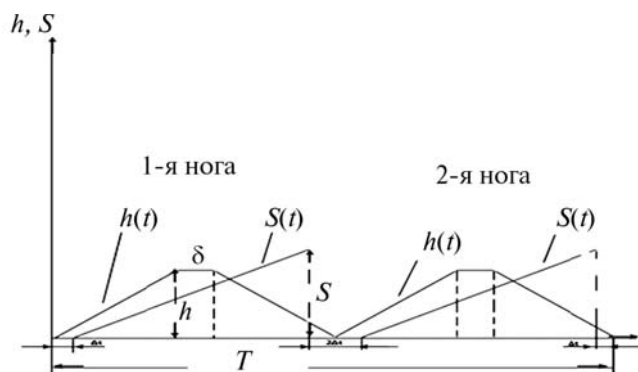


Рис. 3. Законы движения голени и бедра

Графическая интерпретация процесса ходьбы представлена на рис. 3. При таком движении голени и бедра одна нога «догоняет» другую.

В процессе движения корпус ОДА испытывает продольные (направленные в направлении движения) и поперечные (направленные поперек направления движения) колебания. При продольных колебаниях ОДА периодически может опираться, вставая то на носок стопы, то на пятку (рис. 4, в), при поперечных колебаниях ОДА опирается то на левый, то на правый край стопы (рис. 4).

Колебания корпуса могут привести к опрокидыванию ДШР, если угол отклонения корпуса относительно вертикали ( $\alpha_{\text{кр}}$ ,  $\beta_{\text{кр}}$ ) приведет

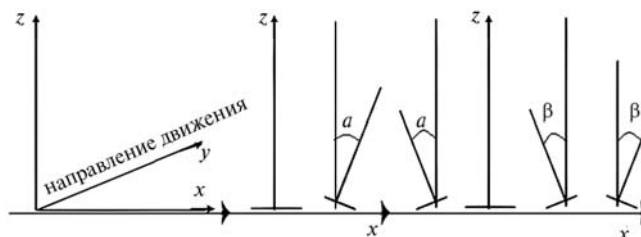


Рис. 4. Положение стопы ДШР при различных условиях опоры

к смещению общего центра масс (ОЦМ) на величину, вызвавшую опрокидывание робота либо вперед-назад, либо вправо-влево. При этом контакт стопы с поверхностью передвижения будет точечным и в момент соприкосновения стопы с поверхностью при опоре на носок или пятку, либо на правый или левый край стопы приводит к возможности опрокидывания ДШР.

Если бы между голенью и стопой имелись две вращательные кинематические пары V класса (рис. 5), то стопа опиралась бы на всю поверхность, а корпус ОДА отклонялся бы относительно стопы.

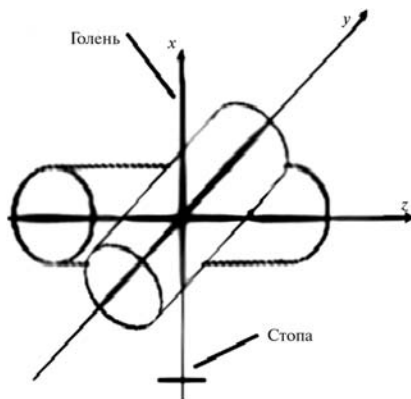


Рис. 5. Соединения голени и стопы ДШР с помощью вращательных кинематических пар V класса

Таким образом, стабилизация движения ДШР заключается, во-первых, в обеспечении периодичности и цикличности подъема и опускания ног и передвижения ОДА и, во-вторых, соблюдения условия, чтобы угол отклонения был бы меньше  $\alpha_{кр}$  в обоих направлениях.

Рассмотрим две системы координат (рис. 6):  $Ox, Oy, Oz$  — систему координат, связанную с корпусом,  $O_1x_1, O_1y_1, O_1z_1$  — систему координат, связанную со стопой.

Когда стопа опирается на носок или пятку, то имеем угол  $\pm \beta$ . При опоре на левый или правый край стопы углы  $\pm \alpha_2$ .

Углы  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  задают положение ноги ОДА относительно осей  $OXYZ$ . Контакт ног с поверхностью передвижения точечный, реакция поверхности сводится к силам  $N_i$  в точках контакта и направлена в сторону внешней нормали к поверхности.

Динамика движения происходит под действием внутренних сил, поэтому должны быть

выполнены законы сохранения количества движения и момента количества движения [2].

Количество движения — мера механического движения, выражающаяся геометрической суммой произведений массы каждой частицы материальной системы на ее скорость:

$$K = \sum mV; K = mV_s,$$

где  $m$  — масса частицы;  $V$  — скорость частицы;  $V_s$  — скорость центра масс.

Количество движения ОДА определяется суммой количеств движения голени и бедра:

$$K_r = m_r V_r(t);$$

$$K_b = m_b V_b(t),$$

где  $m_r, m_b$  — масса голени и бедра соответственно;  $V_r, V_b$  — скорости голени и бедра соответственно.

Если скорости голени и бедра постоянны, то для стабилизации движения необходимо чтобы

$$K = K_r + K_b = \text{const.}$$

При подъеме ног количество движения обеих ног должны быть одинаково:

$$K_1 = K_{r1} + K_{b1} = K_2 = K_{r2} + K_{b2}.$$

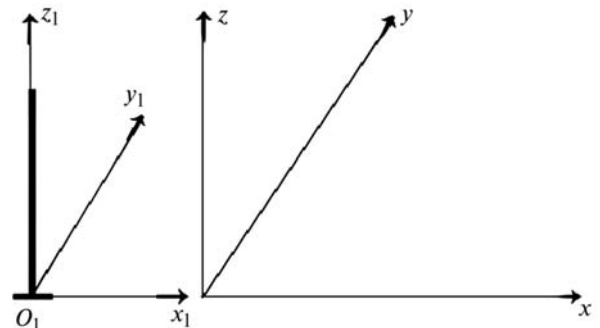


Рис. 6. Системы координат: а — связанная со стопой; б — связанная с корпусом

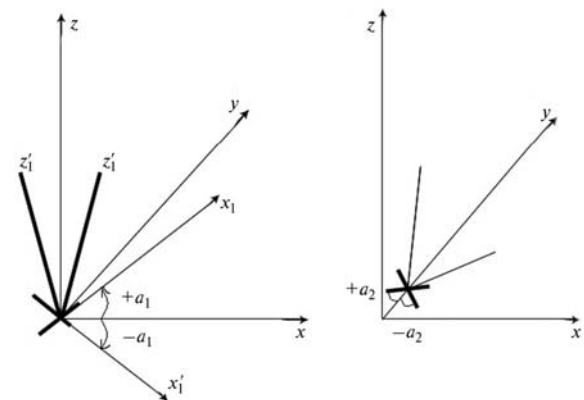


Рис. 7. Углы отклонения координатных осей стопы ДШР относительно координатных осей корпуса

Массы голени и бедра постоянны, следовательно для сохранения количества движения должно соблюдаться постоянство скоростей перемещения голени и бедра в процессе движения. Причем, необходимо учитывать, что количество движения не изменяется от ударов при встрече стопы и поверхности перемещения.

Таким образом, задачей системы управления является поддержание постоянства скорости голени и бедра с учетом того, что за счет внутренних деформаций стопы (если она пластична) величина перемещения к голени может меняться и тогда  $V_2 = h + \Delta l$ .

Момент количества движения материальной точки относительно центра является динамической характеристикой механического движения точки и выражается векторным произведением радиус-вектора и количества движения материальной точки [2]:

$$\bar{L} = \bar{r} \times \bar{k},$$

Применительно к ОДА главный момент количества движения относительно ОЦМ равен геометрической сумме моментов количества движения всех точек системы относительно того же центра:

$$\bar{L}_{\text{гл.о}} = \sum L_o.$$

Закон сохранения момента количества движения формулируется следующим образом: если сумма моментов всех внешних сил системы относительно какой-либо оси равна нулю, то сумма моментов количества движения точек системы относительно этой системы постоянна [2]:

$$\frac{d}{dt} \sum_{k=1}^{k=n} L_{kx} = 0, \text{ то } \sum_{k=1}^n L_{kx} = c,$$

или

$$\frac{d}{dt} \sum_{k=1}^{k=n} \bar{L}_{k0} = 0, \text{ то } \sum_{k=1}^n \bar{L}_{k0} = \bar{L}_{\text{гл.о}} = c.$$

Под стабилизацией движения понимаем выключение программного движения с учетом возможностей реальных двигателей и динамики ОДА ДШР.

Исходя из сказанного выше, можно сделать вывод, что движение ДШР будет стабильным, если система управления будет обеспечивать постоянство скорости перемещения ног вне зависимости от изменяющихся внешних и внутренних условий. Это достигается адаптивным управлением методом стабилизации, позволяющим использовать информацию о движении ОДА ДШР, анализировать причины возникновения погрешностей исполнения и учитывать их при формировании управляющего воздействия, которое обеспечивает сохранение количества движения и момента количества движения.

### Литература

1. Голубятников И.В., Фанталов Ю.И. Кинематика опорно-двигательного аппарата двуногого шагающего робота с поступательными кинематическими парами в суставах ног // Вестник МГУПИ. 2008. № 11. С. 52–57.
2. Бухгольц М.Н. Теоретическая механика. Основной курс теоретической механики. Ч. 1, 2. М.: Наука, 1972.

Статья поступила в редакцию 12.04.2012