



ШАНЫГИН

Сергей Витальевич
кандидат технических
наук, доцент
кафедры «Теория
механизмов и машин»
(МГТУ им. Н.Э. Баумана;
e-mail: sg78dec@mail.ru)

Методика расчета и проектирования многозвенной пространственной манипуляционной системы

С.В. Шаныгин

Рассмотрен порядок выбора конструкции суставов рук (пространственной манипуляционной системы) в зависимости от типа двуногого робота и типа ходьбы, который позволит составить алгоритм управления движением рук.

Ключевые слова: двуногий шагающий робот, опорно-двигательный аппарат, пространственная манипуляционная система, продольные и поперечные колебания корпуса робота.

Method for calculation and design of multijoint spatial handling system

S.V. Shanygin

The order of choice for the hands joints design (the spatial handling system) depending on the type of the biped robot and the type of walking which will allow in future to make the hands movement control algorithm is considered.

Keywords: biped walking robot, musculoskeletal, spatial handling system, longitudinal and cross-section fluctuations of the robot body.

Одной из кардинальных проблем робототехники и микроробототехники является разработка и синтез биоморфных режимов движения и управления многозвенных механизмов, имитирующих движение конечностей живых организмов [1]. Эти движения характеризуются целым рядом замечательных качеств: плавность, взаимосогласованность, гармоничность и т. д.

Для микромеханических устройств, где роль инерции крайне слабая, особый интерес представляет изучение и построение кинематических задаваемых режимов движения. Решение подобных задач осложнено обеспечением устойчивости режима движения многозвенных механизмов с избыточным числом степеней свободы [2]. Многозвенную пространственную манипуляционную систему можно представить в виде конечностей, которые могут выполнить различные функции, например:

- для выполнения полезной работы двуногим шагающим роботом (ДШР), а также и для уравнивания робота при ходьбе;
- при установке на мобильную платформу многозвенная пространственная манипуляционная система (в этом случае она представляется как манипулятор) также используется для выполнения полезной работы, но вопрос об уравнивании мобильной платформы при ее движении здесь не ставится.

Поэтому рассмотрим вопрос об уравнивании ДШР с помощью конечностей.

Когда говорят о шагающем роботе, то имеют в виду его опорно-двигательный аппарат (ОДА), так как основная функция двуногого робота — ходьба, которая воспроизводится ОДА. При ходьбе ноги ДШР поочередно отрываются от поверхности передвижения и робот стоит на одной ноге. В этот период времени он неустойчив и при высоко поднятой ноге ДШР может опрокинуться [3].

Устойчивость ДШР обеспечивается с помощью уравнивающих устройств, которые при ходьбе робота всегда смещают его общий центр масс (ОЦМ) на вертикальную ось. Проекция ОЦМ должна находиться на площади стоп, поэтому для удержания ДШР при ходьбе в равновесном состоянии его стопы должны быть достаточно больших размеров.

ОДА двуногого робота может быть с вращательными кинематическими парами V класса в суставах ног (рис. 1, а), либо с поступательными кинематическими парами в суставах (рис. 1, б).

При ходьбе ДШР существует интервал времени, в течение которого робот опирается на одну ногу. Этот интервал времени может быть больше или меньше в зависимости от конструкции суставов, режимов движения — последовательности перемещения голени и бедра (ног). Поэтому при проектировании любого ДШР встает вопрос о дополнительном уравнивающем устройстве, располагаемом на корпусе ОДА и позволяющем удерживать робота в равновесном состоянии при поднятой ноге.

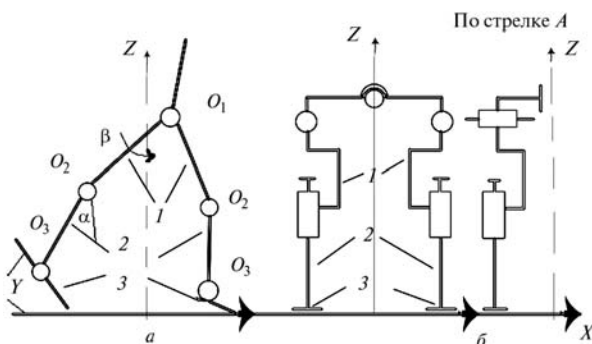


Рис. 1. Кинематические схемы ДШР:
1 — бедро; 2 — голень; 3 — стопа

В качестве уравнивающего устройства может быть использована многозвенная пространственная манипуляционная система, выполняющая функции рук, которые подобно рукам человека своими движениями позволяют удерживать равновесие робота при поднятой ноге.

Если многозвенная пространственная манипуляционная система устанавливается на корпус любого ОДА ДШР, то выбор конструкции суставов, соединяющих звенья рук, и расчет размеров, кинематики и динамики рук нельзя проводить без рассмотрения последовательности перемещения голени и бедра.

Если руки устанавливаются на ОДА ДШР с поступательными кинематическими парами в суставах ног (см. рис. 1, б), то движение рук должно быть синхронизировано с движением ног, которое осуществляется следующим образом:

- подъем голени на высоту h , вдоль вертикальной оси;
- перемещение бедра вместе с голенью в направлении движения на величину S .

Движение ДШР происходит вдоль оси Y , перпендикулярной сагиттальной плоскости (плоскости чертежа), т. е. имеем ортогональное движение. Последовательность перемещения голени и бедра представлено на циклограмме на рис. 2 [1].

При подъеме голени и перемещении бедра ОЦМ ДШР смещается относительно вертикальной оси Z (рис. 3), поэтому поворот рук робота должно обеспечить смещение ОЦМ на вертикальную ось при поднятой ноге.

Особенность движения ОДА ДШР с поступательными кинематическими парами в суставах ног заключается в том, что голень и бедро перемещаются в двух взаимно перпендикулярных плоскостях (OXZ и OYZ). Кроме того, в ро-

1-я нога	Голень	Подъем на высоту h	Опускание	Неподвижна
	Бедро	Перемещение на величину S		Неподвижна
2-я нога	Голень	ΔT^*	Неподвижна	Подъем на высоту h / Опускание
	Бедро	Неподвижна		Перемещение на величину S
T				

Рис. 2. Циклограмма движения ОДА:
 T^* — время опережения и запаздывание перемещения бедра по отношению к движению голени;
 T — период шага

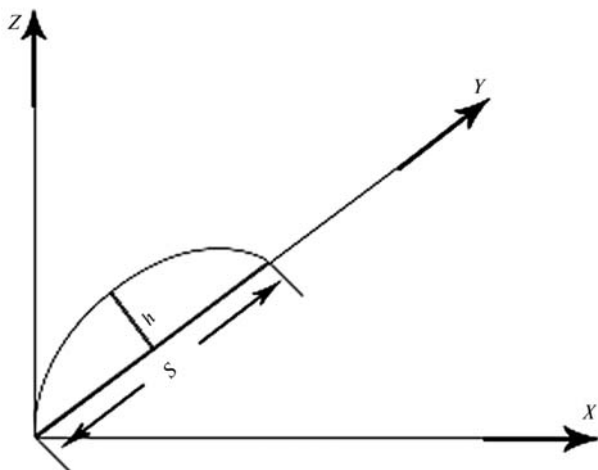


Рис. 3. Траектория движения ОЦМ ДШР с поступательными кинематическими парами в суставах ног в процессе ходьбы

боте голень и стопа соединены жестко, т. е. представляют собой одно звено и при разработке системы управления рассматривается движение голени и бедра.

Система управления бедра должна учитывать, что движение бедра вместе с голенью должно начинаться с некоторым запаздыванием по отношению к началу движения голени и заканчиваться раньше, чем полное опускание ноги. Это объясняется тем, что при движении бедра с голенью не должно быть зацепов стопы о поверхность передвижения, т. е. чтобы стопа не волочилась по поверхности, создавая дополнительные сопротивления движению.

Специфика движения ног данного ДШР накладывает ряд требований на движение звеньев и рук многозвенной пространственной манипуляционной системы, установленной на корпусе ОДА (рис. 4), поскольку ОДА имеет продольные и поперечные колебания, которые руки должны уравновешивать.

Конструкция суставов рук должна обеспечивать движение плеча и предплечья в разных плоскостях для уравновешивания робота при колебаниях ОДА и удерживать его в устойчивом состоянии. Поэтому при проектировании корпуса ДШР с руками, представляющего многозвенную пространственную манипуляционную систему, нужно учитывать параметры кинематики и динамику ОДА, так как от них зависят величины и характер колебаний ОДА [4].

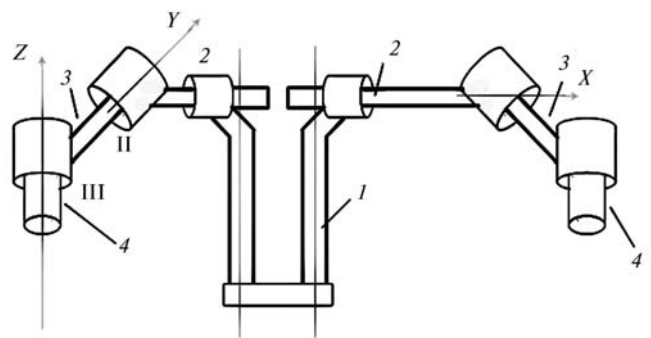


Рис. 4. Схема корпуса ДШР с руками: 1 — корпус; 2 — ключица; 3 — плечо; 4 — предплечье

Соединение позвоночного столба 1 с ключицей 2 осуществляется с помощью вращательной кинематической пары V класса (I), ось вращения которой направлена вдоль оси X. Ключица 2 соединяется с плечом 3 с помощью вращательной кинематической пары V класса (II), ось которой направлена вдоль оси Y.

Соединение плеча 3 и предплечья 4 осуществляется также с помощью вращательной кинематической пары V класса (III), ось которой направлена вдоль оси Z. В качестве рабочего органа, который жестко соединен с предплечьем, может быть использован какой-либо захват.

Если манипуляционная система используется в медицине для обслуживания лежачих больных, то предплечье должно соединяться с кистью кинематической парой, а кисть должна быть снабжена подвижными пальцами.

Кинематическая схема манипуляционной системы-руки имеет степень подвижности

$$W = 6n - 5P_5 = 6 \cdot 6 - 5 \cdot 6 = 6$$

где n — число подвижных звеньев; P_5 — число кинематических пар V класса.

ОДА ДШР с вращательными кинематическими парами V класса (см. рис. 1, а) совершает движение в сагиттальной плоскости (OXZ) и оси вращения всех кинематических пар направлены перпендикулярно плоскости движения.

Последовательность перемещения голени и бедра представлена циклограммой движения на рис. 5. Следует отметить, что у данного робота стопа соединена с голенью с помощью вращательной кинематической

пары V класса, т. е. по сравнению с ДШР с поступательными парами в суставах ног, у этого ДШР добавляется еще одна управляемая степень подвижности.

1-я нога	Голень	Поворот вместе с бедром	Поворот относительно оси O_2 на угол α	Неподвижны
	Бедро	Поворот на угол β относительно оси O_1	Неподвижно	
	Стопа	Неподвижна	Поворот относительно оси O_2 на угол γ	
2-я нога	Голень	Неподвижны	Поворот вместе с бедром	Поворот
	Бедро		Поворот	Неподвижно
	Стопа		Неподвижна	Поворот

Рис. 5. Циклограмма движения ног ОДА с вращательными кинематическими парами

При движении ног за счет опорных реакций ОЦМ смещается не только по горизонтали (ось X), но и по вертикали (ось Z) (рис. 6).

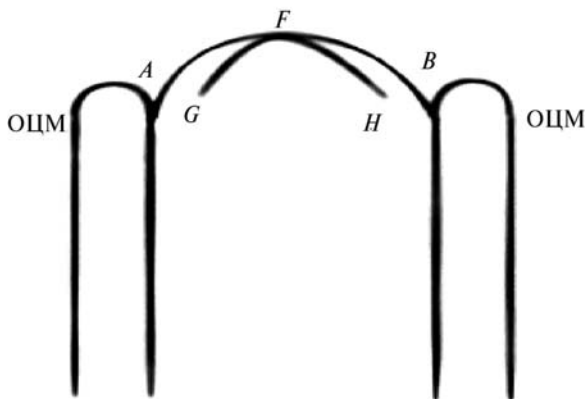


Рис. 6. Перемещение ОЦМ в плоскости движения

Кривая AFB учитывает как горизонтальное смещение ОЦМ при ходьбе, так и вертикальное смещение ОЦМ (кривая GFH) за счет переменного действия опорных реакций при чередовании одноопорного и двухопорного состояний. Следует отметить, что при движении происходит отклонение кинематических и динамических параметров стопы от обусловленной нормы, вызванные изменяющиеся условиями ходьбы или нарушениями ОДА обусловленные асимметричностью движения ног. Эта асимметричность особенно наблюдается при дви-

жении с вытянутой ногой (поворот только в тазовом суставе).

При чередовании одноопорного и двухопорного состояния ног происходит чередование устойчивого и неустойчивого состояния, поэтому для уравновешивания робота можно использовать руки, движение которых должно обеспечивать удержание ОДА в равновесии [5]. При этом руки робота не должны ухудшать параметры движения ДШР.

Таким образом, должны соблюдаться следующие требования:

- размеры ног и система управления должны, по возможности, обеспечивать комфортность движения, т. е. ОЦМ корпуса ДШР должен двигаться равномерно и прямолинейно;
- при движении ног необходимо соблюдать ритмичность, т. е. должно соблюдаться условие периодичности и повторяемости.

Поскольку движение ОДА с вращательными парами в суставах ног происходит в одной плоскости, то преимущественно ДШР при чередовании одноопорного и двухопорного состояния будет испытывать колебания в плоскости, параллельной направлению движения. В этом случае уравновешивание робота можно осуществить поворотом одного звена. Данное звено образуется путем соединения ключицы с корпусом вращательными кинематическими парами V класса, ось которых может быть направлена вдоль оси X (рис. 7, а), либо вдоль оси Y (рис. 7, б), либо вдоль оси Z (рис. 7, в), направление зависит от того, какие колебания нужно уравновесить.

Конструкция сустава корпус ключица выбирается после исследования движения ДШР с вращательными парами в суставах ног; так как в зависимости от походки ДШР колебания могут быть либо продольными (амплитуда колебания имеет направление, совпадающее с направлением движения), либо поперечными (амплитуда колебаний совпадает с осью, направленной перпендикулярно плоскости движения).

Как правило, основные колебания ДШР с вращательными кинематическими парами в суставах ног имеют амплитуду, направленную вдоль оси X , что и подтверждает картиной перемещения ОЦМ при ходьбе (см. рис. 6).

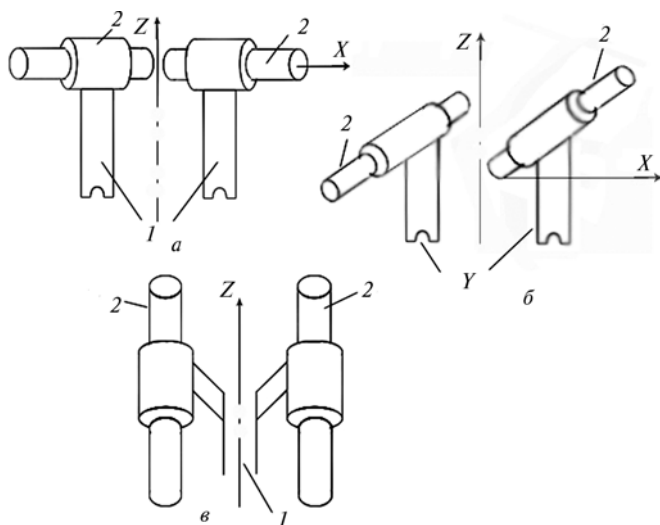


Рис. 7. Возможные варианты конструкции сустава корпус-ключица:

1, 2 — кинематическая пара

Следует отметить, что характер движения ДШР зависит от того, с какого звена начинается движение. Для ДШР с вращательными кинематическими парами в суставах ног ходьба может осуществляться по-разному:

- бедро поворачивается вокруг оси O_1 вместе с голенью, потом голень выпрямляется, поворачиваясь вокруг оси O_2 ;
- первоначально поворачивается голень вокруг оси O_2 , далее нога выпрямляется за счет поворота вокруг оси O_1 бедра вместе с голенью;
- ходьба при выпрямленной ноге, т. е. походка соответствует походке человека на протезе;
- одновременный поворот голени и бедра вместе с голенью до тех пор, пока стопа не коснется поверхности передвижения.

Выводы

1. При проектировании манипуляционной системы необходимо учитывать для какой цели она будет использоваться.
2. Конструкция мехатронных узлов рук робота и управление их движением должно соот-

ветствовать требованиям, предъявленным к характеру ходьбы ДШР.

3. Движение звеньев-рук манипуляционной системы должно быть синхронизировано с движением ног ДШР, если система устанавливается на опорно-двигательный аппарат робота.

4. Манипуляционная система рук может быть пространственной или плоской в зависимости от конструкции суставов ног ОДА.

5. Отклонение рук (углы их поворота) должно обеспечить удержание ДШР в устойчивом состоянии.

6. Время поворота рук должно совпадать с временем одноопорного состояния ног робота.

7. Установка рук на корпус ОДА не должна ухудшать кинематические и динамические параметры ОДА ДШР.

Литература

1. Беркенблй М.Б., Гульфанд И.П., Фельдман А.Г. Двигательные задачи и работа параллельных программ и интеллектуальные процессы и их моделирование. М.: Наука, 1991. С. 37—54.
2. Смольников П.А. Проблемы механики и оптимизации роботов. М.: Наука. 1991.
3. Голубятников И.В., Фанталов Ю.И. Определение траектории движения общего центра масс опорно-двигательного аппарата двуногого шагающего робота с поступательными кинематическими парами в суставах ног // Вестник МГУПИ. 2008.
4. Голубятников И.В., Шаныгин С.В. Синхронизация движения ног и рук двуногого шагающего робота с поступательными кинематическими парами в суставах ног // Вестник МГУПИ. 2008.
5. Голубятников И.В., Фанталов Ю.И. Кинематика опорно-двигательного аппарата двуногого шагающего робота с поступательными кинематическими парами в суставах ног // Вестник МГУПИ. 2008. № 3.

Статья поступила в редакцию 09.04.2012