

УДК 62-112.9

Разработка кинематической схемы манипулятора типа «хобот»

*Лихтенберг С.Р., студент
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Робототехнические системы»*

*Научный руководитель: Воротников С.Р., к.т.н, доцент каф. РК10
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана
vorotn@bmstu.ru*

Одним из направлений в создании антропоморфных манипуляторов является разработка хоботообразных манипуляторов, состоящих из множества подвижных звеньев. По количеству степеней подвижности они значительно превосходят человеческую руку. Однако, в отличие от традиционных манипуляторов с небольшим количеством звеньев, хоботообразный (многозвенный) манипулятор может принимать любые конфигурации при осуществлении взаимодействия с внешним объектом. Целью данной работы является разработка кинематической схемы многозвенного манипулятора типа «хобот» с возможностью сложного пространственного позиционирования без потери устойчивости. Достижение этой цели связано с решением следующих задач:

1. Разработка несущей конструкции модели многозвенного манипулятора;
2. Определение геометрических характеристик многозвенного манипулятора;
3. Построение кинематической схемы манипулятора типа «хобот»;
4. Определение положения центра схвата манипулятора;
5. Оценка энергоэффективности предложенной кинематической схемы многозвенного манипулятора типа «хобот»;

Разработка несущей конструкции многозвенного манипулятора типа «хобот»

В соответствие со схемой, представленной на Рис. 1, трос на ближней к центру дуги изгиба стороне манипулятора с натяжением T_2 создает давление на кронштейн звена в точке F.

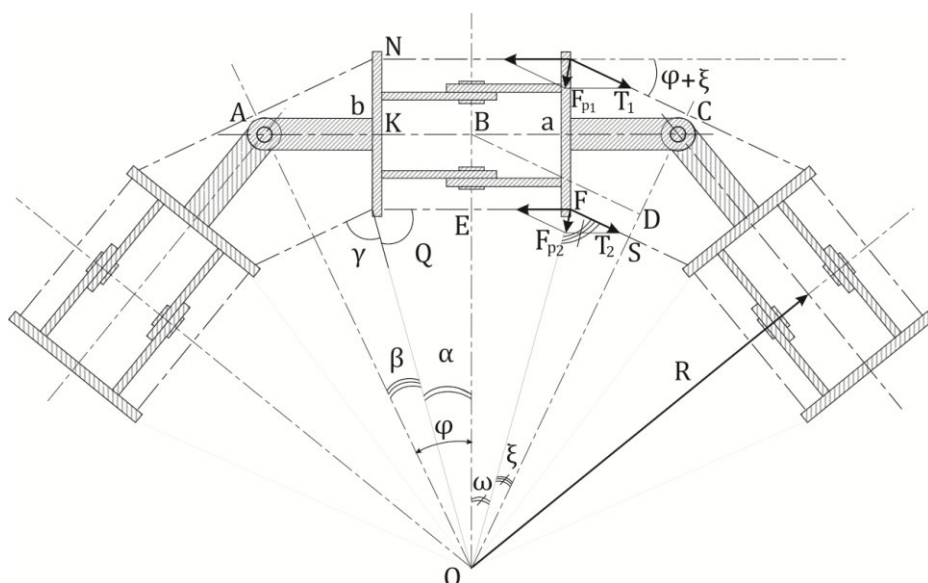


Рис. 1. Схема взаимного расположения звеньев и тросов участка многозвенного манипулятора в положении дугообразного изгиба радиуса R с центром в точке «О»

На схеме представлены: радиус дуги изгиба R – расстояние от центра дуги до продольной оси звена манипулятора; штрих-пунктирными линиями обозначены положения тросов системы управления манипулятором; заштрихованными контурами – кинематически эквивалентные звеньям манипулятора структурные элементы схемы; A и C – места расположения шарниров, повороты которых создают изгиб участка манипулятора; φ – угол между направлениями из центра дуги изгиба на концы звена AB ; B и C – положения осей шарниров звена, образующего кинематическую пару со звеном AB ; a – длина большой оси кинематической пары звеньев; b – длина малой оси кинематической пары звеньев;

Считая величину силы натяжения троса одинаковой по обе стороны от точки F , получим равнодействующую сил давления троса на кронштейн в виде вектора F_{p2} .

Соответственно, трос на внешней стороне манипулятора создает давление силой F_{p1} на противоположном конце кронштейна.

Такие же равнодействующие приложены на втором кронштейне кинематической пары звеньев. Они, в свою очередь, создают равнодействующую сил давления тросов на звено, направленную к центру дуги изгиба. Для выполнения условия равновесия для звена, то есть, неподвижного его положения, необходимо, чтобы эта равнодействующая и создаваемый ею момент сил на звене были уравновешены, соответственно, равнодействующей сил реакции в шарнирах и создаваемым ею моментом.

В отношении моментов сил этих равнодействующих можно достаточно корректным образом – то есть, не нарушая общности физического смысла - упростить задачу, приняв условие полной симметрии кинематической схемы относительно оси **ОВ**. Иными словами – приняв пренебрежимо малыми силы трения в тросов в кронштейнах, и сил трения в шарнирах. Тогда равнодействующие сил давления тросов на кронштейны звеньев и сил реакции в шарнирах звеньев можно считать приложенными в геометрическом центре звеньев, а их моменты, соответственно, равными нулю.

Так как эффективный манипулятор должен принимать сложные конфигурации для обеспечения безопасности применения и обеспечения способности достигать объекта воздействия по сложной траектории, необходимо знание характеристик тросовой системы управления и знания величин параметров управляющих воздействий, при которых звенья манипулятора остаются в равновесии при его сложной фиксированной конфигурации.

Прежде всего, следует указать на то, что рассматриваются свойства манипулятора в двумерном приближении, то есть, при условии, что все шарниры звеньев анализируемого участка манипулятора условно лежат в одной плоскости.

Для составления кинематической схемы сложного изгиба манипулятора рассмотрим наиболее сложную ситуацию – изгиб манипулятора одномоментно в двух противоположных направлениях.

Условное изображение кинематической схемы манипулятора в такой ситуации представлено на Рис. 2.

На схеме обозначены: T_p и N_p – соответственно, равнодействующие сил давления тросов и сил реакций в шарнирах; R и R_1 – соответственно, радиусы дуг изгиба манипулятора; F_1 и F_2 – силы давления комлевого звена манипулятора на опору; F'_1 F'_2 – усилия в устройствах управления тросовой системой;

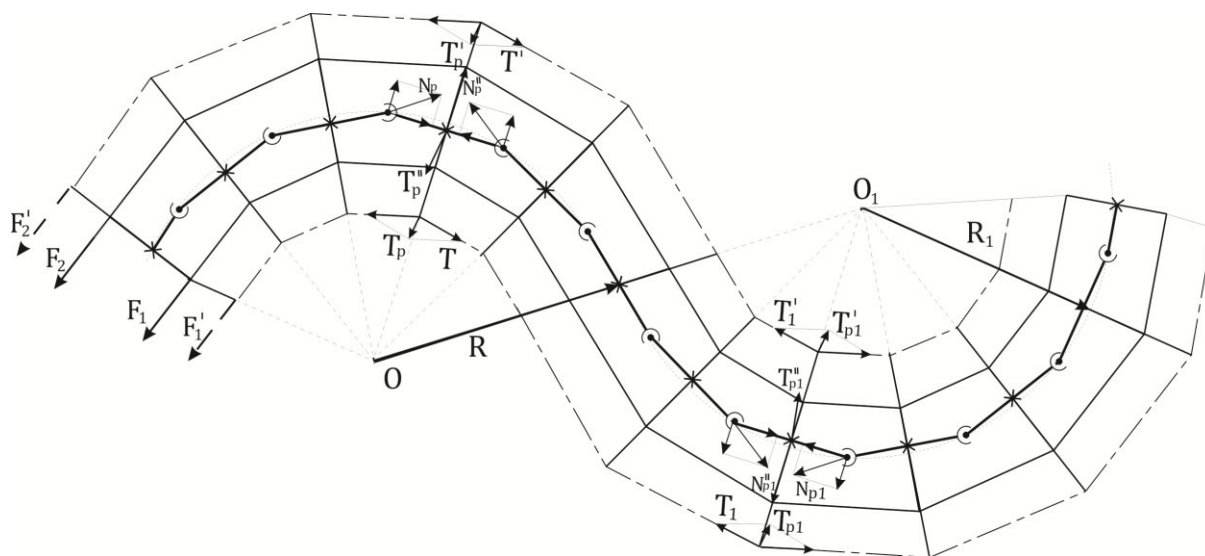


Рис. 2. Схема взаимного расположения звеньев и тросов управляющей системы при сложном изгибе манипулятора

Определение геометрических характеристик манипулятора типа «хобот»

Для создания математической модели манипулятора введем следующие обозначения структурных и кинематических элементов манипулятора, и действующих в его конструкции сил:

$AO = R$ – радиус дуги изгиба данного участка манипулятора (расстояние от центра дуги до оси «хобота»);

ψ_R – угловой размер дуги изгиба манипулятора;

n – количество звеньев манипулятора на дуге Ψ ;

T_1 и T_2 – натяжение тросов;

$\varphi = \psi \frac{1}{n}$ – угловая величина звена манипулятора при радиусе дуги изгиба R ;

$AB = a$; $KN = b$; $AK = KB = \frac{a}{2}$; где AB – расстояние между двумя взаимно поперечными шарнирами на концах одного звена манипулятора, или, иначе – продольный размер звена; KN – половина поперечного размера манипулятора, иначе – расстояние от оси звена до точки упора троса в кронштейн манипулятора; $AK = KB$ – расстояния от оси шарниров до прямой, соединяющей точки упора тросов в кронштейны.

Геометрические образы элементов полученной кинематической схемы находятся в следующих соотношениях:

$$\Delta BCD \sim \Delta ABO \sim \Delta BCO; \quad (1)$$

$$OB = \sqrt{R^2 - a^2}; OE = BO - b; OF = \sqrt{OE^2 - \frac{a^2}{4}}, \quad (2)$$

где **OB** – расстояние от центра дуги изгиба до геометрического центра крепления шарниров; **OE** – расстояние от центра дуги изгиба до троса; **OF** – расстояние от центра дуги изгиба участка манипулятора до точки упора тросов в кронштейны;

$$BD = BO * \sin \varphi = BO * \sin \frac{\Psi}{n}, \quad (3)$$

где **BD** – расстояние между осями крепления шарниров;

$$EF = \frac{a}{2}; \quad \omega = \arctg \left(\frac{EF}{OE} = \frac{a}{2(BO-b)} = \frac{a}{2(\sqrt{R^2-a^2}-b)} \right), \quad (4)$$

где **EF**–расстояние от оси шарнира до точки упора тросов в кронштейны;

$$\omega = \arctg \frac{a}{2(\sqrt{R^2-a^2}-b)}; \quad (5)$$

где ω – угол между равнодействующей сил натяжения тросов и осью крепления поперечных шарниров;

$$\xi = \varphi - \omega = \frac{\Psi}{n} - \arctg \frac{a}{2(\sqrt{R^2-a^2}-b)}. \quad (6)$$

где ξ - угол между равнодействующей сил натяжения тросов и осью крепления продольных шарниров;

$$\angle OFD = \frac{\pi}{2} - \frac{\Psi}{n} + \arctg \frac{a}{2(\sqrt{R^2-a^2}-b)} = \gamma, \quad (7)$$

где γ – угол между равнодействующей сил натяжения тросов и направлением силы натяжения троса.

Построение кинематической схемы манипулятора типа «хобот» с условием использования мотор-редукторов типа PBT-GF30

Главной задачей разработки манипулятора для современного манипуляционного робота является создание системы уравнений динамики его звеньев, которая может быть решена управляющим микроконтроллером за время, меньшее времени релаксации напряжений в силовых элементах конструкции. При таком условии модель динамики манипулятора будет обеспечивать управление в реальном масштабе времени. То есть, робот будет способен выполнять свое предназначение – замещать человека в каком-то производственном процессе. Конечно, если само время релаксации напряжений в конструкции манипулятора не будет чрезмерно большим. При таком условии не будет наблюдаться временная задержка, влияющая на качество работы манипулятора предлагаемого типа.

В данном случае период релаксации будет характеризоваться, прежде всего, временем «выбора» и «отдачи» тросов управляющей системы, и временем остановки и старта мотор-редукторов приводов тросовой системы. Эти два периода по длительности

значительно превышают время релаксации напряжений в узлах сопряжений звеньев и время релаксации деформаций самих звеньев.

В качестве приводных механизмов можно использовать приводы типа PBT-GF30. Стартовый момент на валу этих мотор-редукторов завод-изготовитель гарантирует не менее 9 Нм, номинальную мощность на валу – 8,0 Вт, номинальную частоту вращения – 65 мин⁻¹. Исходя из этих параметров, и при диаметре барабана лебедки тросового привода равном 0,02 метра, мы получили бы расчетную силу натяжения тросов в момент старта равную 47,5 Н.

Таким образом, характерным периодом релаксации конструкции нашего манипулятора можно считать отрезок времени выхода мотор-редуктора на номинальный режим. Проще всего определить это время по осциллограмме изменений тока нагрузки двигателя или вращения вала редуктора.

Нижеприведенные задачи относятся к общим методам исследования структуры, геометрии, кинематики и динамики систем с пространственными многоподвижными механизмами.

1. Разработка метода синтезирования и расчета параметров механизмов приводов.
2. Расчет управляющих усилий и реакций в конструкции приводов.
3. Уравновешивание инерционных сил и моментов в конструкции манипулятора.

Указанные задачи имеют прямую (задача анализа) и обратную (задача синтеза) формы. В прямой задаче определения функций положения звеньев манипулятора предстоит по заданным законам изменения относительных или абсолютных координат звеньев найти закон изменения абсолютных координат положения последнего звена. В обратной - по заданному закону движения последнего звена найти законы изменения угловых перемещений в приводах звеньев. Следует отметить, что в реальных условиях чаще всего необходимо определять характер изменения управляющих сил и моментов в приводах, обеспечивающий заданный закон движения выходного звена. Так как положение последнего звена в нашем манипуляторе может быть реализовано при множестве различных конфигураций манипулятора, решение обратной задачи может оказаться неопределенным и надо будет разработать способы выбора оптимальной конфигурации в зависимости от различных внешних условий.

Положение звеньев определяем согласно методу, использованному в [4, 5]:

каждое звено производит последовательность четырех движений относительно предыдущего звена - два поворота и два параллельных переноса, осуществляемых в указанной последовательности (см. Рис. 3):

- поворот i -ого звена системы вокруг оси x_i на угол $-\theta_i$ до параллельности осей z_i и z_{i-1} (направление поворота при наблюдении с конца вектора x_i - против часовой стрелки);
- перенос вдоль оси x_i на величину $-a_i$ до совмещения начала системы координат O_i с точкой пересечения осей x_i и z_{i-1} (отсчет по оси x_i от точки пересечения оси x_i и оси z_{i-1});
- перенос вдоль оси z_{i-1} на величину $-s_i$, после которого начало системы координат O_i оказывается в начале координат O_{i-1} системы $(i-1)$ (отсчитывается по оси z_{i-1} от ее начала координат O_{i-1} до точки ее пересечения с осью x_i);
- поворот вокруг оси z_{i-1} на угол $-\varphi_i$, до тех пор, пока ось x_i не станет параллельной оси x_{i-1} (положительное направление поворота при наблюдении с конца вектора z_{i-1} против часовой стрелки).

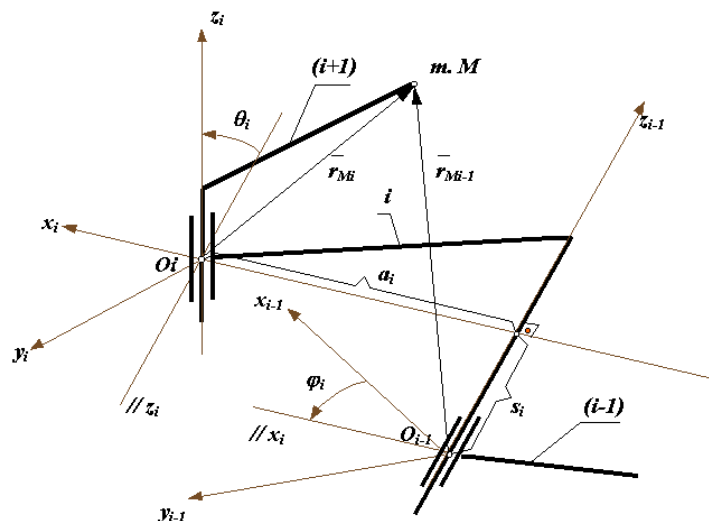


Рис. 3. Схема определения положения звеньев манипулятора

В этом методе кинематическая схема всего манипулятора представлена на Рис. 4 в виде цепочки звеньев с ортогональными шарнирами в узлах сопряжений. На кинематической схеме база обозначена «0», номерами «3-6», соответственно, звенья, точка «М» – схват на последнем звене манипулятора.



The diagram illustrates a mechanism with n links and $n-1$ revolute joints. The links are numbered 1 through n . Link 1 is the fixed frame, indicated by a ground symbol. Link n is the output link, which is subjected to a force $\vec{A}$ and a moment $\vec{M}$. The mechanism is supported by four reaction forces: F_1 and F_2 at joint 1, F_3 and F_4 at joint $n-1$. The joints are labeled with K_i^j , where i is the joint number and j is the link number. The diagram shows the arrangement of links, joints, and the applied forces and moments.

На схеме обозначены: «0» - комлевое звено; «1», «2», ... «n-2», «n-1», «n» - номера звеньев; «М» - оконечность манипулятора, место расположения фиксирующих элементов, сенсоров, следящей камеры и т.п.; «F₁₋₄» - номера тросов управляющей системы; K_j^i (i = 1, 2, 3, 4; j = 1, 2, ..., n) - места сопряжений управляющих тросов с кронштейнами звеньев манипулятора.

Определение положения центра схвата манипулятора

Аналогично [4], изменение положения конечного элемента манипулятора будем описывать оператором R_φ , преобразующим ориентацию конечного элемента при его повороте из начального положения в заданное, где φ - угол поворота оси звена по отношению к базовому вектору $\bar{A}$ (принято, что в начальном положении ось манипулятора направлена по $\bar{A}$).

Тогда, согласно рис. 20.3 из [4], для определения положения конечного элемента манипулятора мы можем использовать матрицу преобразований координат в том же виде:

$$T_n = \begin{vmatrix} (\bar{O} \times \bar{A})_x & O_x & A_x & r_n M_x \\ (\bar{O} \times \bar{A})_y & O_y & A_y & r_n M_y \\ (\bar{O} \times \bar{A})_z & O_z & A_z & r_n M_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (8)$$

Компьютерная программа управления манипулятором должна по заданным значениям координат местоположения и ориентации оконечного звена повторить вычисление этой матрицы n раз.

Управление двухсекционным манипулятором (Рис. 2) не имеет очевидных особенностей по сравнению с полученными характеристиками системы управления манипулятором типа "хобот", в том числе и по временным и скоростным параметрам.

Оценка энергоэффективности тросовой системы манипулятора

Манипулятор с тросовым управлением имеет очевидное преимущество в том, что массивные элементы приводов системы управления расположены на шасси (опорной платформе, базе). Соответственно, масса самого манипулятора и создаваемые ею инерционные моменты сил в конструкции уменьшаются. Следовательно, общая мощность приводов может быть уменьшена, быстродействие манипулятора увеличено.

В то же время, настолько же очевидной является высокая концентрация нагрузок в приводах тросов. Она возникает из-за необходимости создания значительных сил натяжения тросов, так как эти силы должны на плече, равном половине диаметра манипулятора создавать момент сил, компенсирующий момент сил, создаваемый весом манипулятора и весом полезного груза на плече, равном длине манипулятора. В свою очередь, большие силы натяжения тросов вызовут большое давление тросов на

кронштейны звеньев и, следовательно, возникнут большие силы трения и большие потери энергии на их преодоление.

Таким образом, для принятия решения о создании и применении подобного манипулятора следует оценить относительную величину потерь на трение в тросовой системе. Проведем оценку для наиболее тяжелой ситуации – когда манипулятор горизонтально вытянут, и отклоняющие моменты максимальные.

Момент силы, создаваемой весом манипулятора, можно представить в следующем виде:

$$\bar{M}_P = \bar{P} \times \bar{L}.$$

где $\bar{L}$ - расстояние комлевого звена манипулятора до точки центра масс системы.

Этот момент компенсирует момент

$$\bar{M}_P = -\bar{T} \times \bar{l},$$

где $\bar{T}$ - результирующая сил натяжения тросов в приводе, $\bar{l}$ – расстояние от оси комлевого звена до точки упора троса в кронштейн манипулятора.

Исходя из этого, величину результирующей сил натяжения тросов можно представить в следующем виде:

$$T = \left| \frac{\bar{P} \times \bar{L}}{\bar{l}} \right| = P \times \frac{L}{l},$$

Таким образом, мы можем управлять изменением величины результирующей сил натяжения тросов, а следовательно и равнодействующей сил трения в узлах сопряжения тросов с кронштейнами, меняя соотношение $\frac{L}{l}$.

При переводе манипулятора в новое состояние в узлах сопряжения тросов с кронштейнами возникает сила трения равная:

$$\bar{F}_{mp} = Q_p \times k = 2T \sin \frac{\varphi + \xi}{2} \times k,$$

где Q_p – величина силы давления троса на узел сопряжения с кронштейном, k – коэффициент трения, φ - угловая величина звена манипулятора при радиусе дуги изгиба R ; $\varphi + \varepsilon$ - угол изгиба троса в точке сопряжения с кронштейном (Рис.1).

Для многозвенного манипулятора и умеренных значениях угла дуги изгиба манипулятора ($<180^\circ$) величина $\varphi + \varepsilon$ будет составлять несколько градусов. Следовательно, в оценках можно принять

$$F_{mp} \sim \sin \frac{\varphi + \varepsilon}{2} \sim \frac{\varphi + \varepsilon}{2}.$$

Соответственно, работа сил трения равна:

$$A_{mp} = NF_{mp} \times \Delta S = 2NT \sin \frac{\varphi + \xi}{2} \times k \times \Delta S,$$

где ΔS - изменения длины троса, N – количество звеньев.

В рассматриваемой конструкции многозвенного манипулятора

$$N=10, \Delta S \approx 10^{-2} \text{ см}, F_{mp} \approx \frac{1}{40} T,$$

$$A_{mp} = 10 \times 10^{-2} \times \frac{1}{40} T \text{ (Дж)},$$

а работа по преодолению силы тяжести манипулятора, которую примем за полезную работу $A_{пол}$ при изгибе манипулятора в дугу радиусом R , может быть определена после простых преобразований как примерно:

$$\frac{P}{3} R(1 - \cos(N\varphi)).$$

Очевидно, что $A_{пол} \gg A_{mp}$.

Таким образом, потери энергии на работу сил трения в узлах сопряжения тросов с кронштейнами не настолько значительны, чтобы отказываться от создания многозвенного манипулятора с тросовым управлением.

Список литературы

1. Кузьмин Д.В. Моделирование динамики мехатронных систем. Уравнения и алгоритмы: монография. Архангельск: Арханг. гос. техн. ун-т, 2008. 120 с.
2. Р. Пол. Моделирование, планирование траекторий и управление движением робота – манипулятора. М.: Наука, 1976. 103 с.
3. Поезжаева Е.В., Юшков В.С. Разработка змееподобного робота для диагностики трубопроводов // Материалы II международной научно – практической конференции, робототехника как образовательная технология. Железногорск, 2010 г. С. 73-76.
4. Фу К., Гонсалес Р., Ли К. Робототехника. М.: Мир, 1989. 624 с.
5. Зенкевич С.Л., Ющенко А.С. Основы управления манипуляционными роботами. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. 480 с.
6. Курс лекций под названием «Промышленные роботы и манипуляторы». Режим доступа: http://tmm-umk.bmstu.ru/lectures/lect_20.htm (дата обращения 22.02.2014)