

## ОБОСНОВАНИЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БИОМЕХАНИЧЕСКОГО КРИТЕРИЯ СИНТЕЗА АНТРОПОМОРФНЫХ МАНИПУЛЯТОРОВ

Полякова М.А. аспирант, Поляков А.М. канд. техн. наук, доц.  
Севастопольский национальный технический университет

*Биомеханический критерий синтеза, основанный на инвариантных свойствах биологических объектов, обоснован с точки зрения минимума затрат средней энергии при осуществлении наиболее вероятных движений звеньев антропоморфного манипулятора. Показано, что параметры звеньев манипулятора, удовлетворяющие указанному критерию, характеризуются инвариантным двойным отношением - вурфом.*

*The biomechanical criterion of quality, based on invariant properties of biological objects, is proved with the point of view of a minimum average energy at realization of the most probable movements of anthropomorphous manipulator links. It is shown, that parameters of the manipulator links, satisfying to the specified criterion, are characterized by the invariant double attitude - wurfs.*

### **Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.**

Синтез оптимальных антропоморфных манипуляторов представляет собой сложную многокритериальную задачу, в которой определение степени значимости каждого из критериев качества является отдельной задачей, чаще всего разрешаемой в соответствии с авторскими предпочтениями конструктора или группы экспертов. Эти предпочтения, как правило, основаны на накопленном мировом опыте эксплуатации манипуляторов, применяемых в различных отраслях техники.

В то же время имеются многочисленные статистические данные о «природных конструкциях» биологических объектов, таких, например, как человек и другие позвоночные. Эти данные свидетельствуют об инвариантности структуры скелета позвоночных в целом и его трехчленных блоков в частности. Инвариантны морфопозы, формы и объемы движений блоков, которыми определяется сущность большинства механических антропоморфных объектов и, в частности, манипуляторов.

Известно также, что свойство инвариантности структуры скелета позвоночных животных не противоречит многообразию видов, характеризующихся определенными особенностями, которые, по нашему мнению, во многом определяются характером их жизнедеятельности, приобретенным в процессе эволюции и, в соответствии с принципами механики - минимальными затратами энергии.

Достаточно обоснованно можно предполагать, что в соответствии со многими критериями качества биологические объекты оптимальны. Однако это не означает, что, например, конструирование антропоморфных манипуляторов, подобных им, должно производиться в строгом соответствии с биологическими принципами. Как минимум, морфогенетические принципы формирования биологических объектов излишни для механических конструкций.

С другой стороны, если принципы инвариантности биологических объектов не противоречат известным принципам механики, то их использование в качестве критериев качества механических объектов можно считать обоснованным. Так, в работе [1] показано, что использование соотношений между размерами звеньев плоских антропоморфных манипуляторов, подобных соотношениям элементов руки человека в пределах наблюдаемых вариаций, дают оптимальные оценки параметров достижимости и манипулятивности. Нами, на основе анализа модели плоского трехзвенного манипулятора, установлено, что при совершении множества наиболее вероятных движений минимум затрат средней энергии наблюдается при определенных соотношениях размеров звеньев, двойное отношение которых (согласно терминологии проективной геометрии - вурф) близко к инвариантному для элементов трехчленных кинематических блоков позвоночных [2]. Таким образом, инвариантные биометрические параметры при синтезе антропоморфных манипуляторов могут быть приняты в первом приближении в качестве одного из критериев качества конструкции. Ясно, что в соответствии с итерационными принципами проектирования механических конструкций в дальнейшем должны быть учтены характер процессов в которые они встраиваются, требуемые размеры рабочей зоны, типы приводов и другие факторы.

**Постановка задачи.** Исследуется модель трехзвенного плоского антропоморфного манипулятора, звенья которого (кисть (схват), предплечье, плечо) совершают движения в горизонтальной плоскости.

Предположим, что требуется сконструировать манипулятор, для перемещения ориентированных предметов из заданной (начальной) точки  $A$  рабочего пространства  $\Omega$  в конечную -  $B$ . Предположим также, что конечная точка может находиться в некотором подпространстве  $\omega$  рабочего пространства  $\Omega$ , т.е.:  $\omega \subset \Omega$  или  $\forall B: B \in \omega \Rightarrow B \in \Omega$ . Отметим, что в предельном случае  $\exists \omega: \omega \equiv \Omega$ . Такой манипулятор будем называть универсальным, а все другие специализированными.

Как показывают наблюдения, биологические объекты, осуществляющие жизнедеятельность с помощью конечностей (например, человек и другие приматы), обычно, если это не связано с экстремальными условиями, используют не все их возможности, а только те, которые требуются для выполнения наиболее характерных движений. По аналогии будем считать, что универсальные манипуляторы конструируются с возможностью перемещения объекта в любую точку рабочего пространства  $B \in \Omega$ , а специализированные - в точку  $B \in \omega$  ( $\omega \subset \Omega$ ), определяемую в соответствии с характером конкретного технологического процесса. Кроме этого предположим, что в течении срока службы, манипулятор перенастраивается для перемещений объекта в различные точки подпространства  $\omega$ , при этом частота перемещения в каждую из возможных точек описывается некоторым статистическим законом распределения.

Задачей исследования являлось установление наличия связи между размерами звеньев антропоморфных манипуляторов при различных перемещениях объекта манипулирования (схвата) из начальной точки позиционирования - в конечную, с минимальными затратами средней энергии.

**Изложение материала и результаты.** В качестве критерия качества  $K$  конструкции манипулятора принят объем движений  $\Delta\varphi_{ij}$  звеньев, заданных с весовыми коэффициентами  $J_i, i=1,2,3$ , характеризующими их инертные свойства, при совершении множества  $k$  наиболее вероятных движений по перемещению объекта в точки подпространства  $\omega$ :

$$K = C \cdot \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^3 J_i \cdot \Delta\varphi_{ij}^2, \quad (1)$$

где  $C$  - некоторая константа. Число  $K$  можно приближенно считать пропорциональным суммарным затратам средней энергии при множественных манипуляциях с объектом если модель манипулятора

представить в виде голономной консервативной механической системы с удерживающими стационарными связями, положение которой определяется обобщенными координатами  $\varphi_i(t), i = 1, 2, 3$  – углами поворота звеньев в относительном движении.

В случае движения звеньев в горизонтальной плоскости, т.е. при нулевом уровне потенциальной энергии, действие по Лагранжу  $S$  запишем в виде:  $S = \int_{t_0}^{t_1} 2T dt$ , где  $T$  – кинетическая энергия системы. В

первом приближении примем, что энергия системы в течение цикла не зависит от времени, и движения звеньев манипулятора осуществляются с некоторой средней скоростью за постоянное время. Тогда получим

где  $J_i$  – приведенный момент инерции части манипулятора, вычисленный относительно  $i$ -го звена;  $\Delta t = const$ . Учитывая множество манипуляций по перемещению объекта  $k$  и вводя обозначение

$$S = 2T \cdot \Delta t = \sum_{i=1}^3 J_i \left( \frac{\Delta \varphi_i}{\Delta t} \right)^2 \cdot \Delta t = \frac{1}{\Delta t} \sum_{i=1}^3 J_i \Delta \varphi_i^2, \quad (2)$$

$\sum_{j=1}^k \frac{1}{\Delta t_j} = C$ , получим  $\sum_{j=1}^k S_j = K$ .

Решение поставленной задачи состоит в определении параметров звеньев модели манипулятора, при которых критерий  $K$  принимает минимальное значение. Для нахождения решения использован метод И.М. Соболя и Р.Б. Статникова [3], основанный на применении ЛП $_{\tau}$ - последовательностей точек, равномерно распределенных в  $n$ - мерном кубе и позволяющий систематически исследовать пространство параметров звеньев. Алгоритм реализации метода изложен в [2]. Схема модели манипулятора приведена на рисунке 1.

Звенья представлены однородными шарнирно соединенными призматическими стержнями разной плотности. Если принять, что центры масс расположены в центрах звеньев, то

$$J_1 = J_{01} + \left( \frac{1}{4} m_1 + m_2 + m_3 \right) l_1^2; J_2 = J_{02} + \left( \frac{1}{4} m_2 + m_3 \right) l_2^2; J_3 = J_{03} + \frac{1}{4} m l_3^2,$$

где  $J_{01}, J_{02}, J_{03}, m_1, m_2, m_3$  – центральные моменты инерции и массы плеча, предплечья и кисти манипулятора, соответственно.

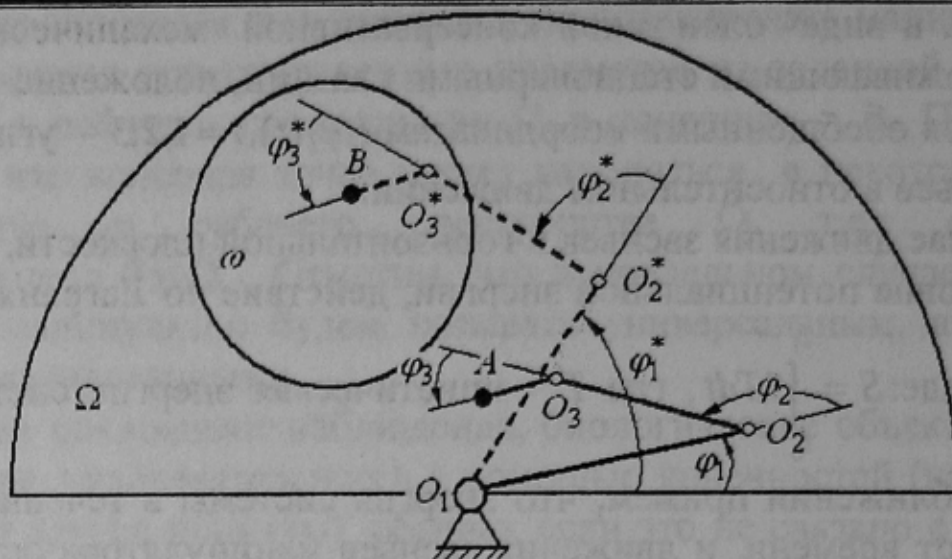


Рисунок 1 - Схема моделі манипулятора

Переменными параметрами синтеза считались безразмерные длины звеньев  $\alpha_2 = l_2, \alpha_3 = l_3$  и плотности  $\alpha_4 = \rho_2, \alpha_5 = \rho_3$ . Плотность плеча  $\rho_1$  принималась равной единице, а его длина определялась из условия максимальной достижимости модели манипулятора:  $l_1 + l_2 + l_3 = 1$ . Угол поворота кисти относительно предплечья  $\varphi_3^*$  для каждого из возможных положений точки  $B$  в  $\omega$  с целью устранения избыточной подвижности манипулятора назначался случайным образом из множества  $\varphi_{3\min}^* \leq \varphi_3^* \leq \varphi_{3\max}^*$ , границы которого, в первом приближении, приняты по аналогии с возможными углами поворота кисти человека [4].

В процессе поиска минимума критерия  $K$  для каждого сочетания параметров звеньев выбирались их положения, соответствующие одной из возможных морфопоз, а именно - поз правой или левой рук, что связано с необходимостью отделения корней в уравнениях геометрических связей манипулятора:

$$\begin{cases} x_B = l_1 \cos \varphi_1^* + l_2 \cos(\varphi_1^* + \varphi_2^*) + l_3 \cos(\varphi_1^* + \varphi_2^* + \varphi_3^*) \\ y_B = l_1 \sin \varphi_1^* + l_2 \sin(\varphi_1^* + \varphi_2^*) + l_3 \sin(\varphi_1^* + \varphi_2^* + \varphi_3^*) \end{cases} \quad (3)$$

Для решения этой задачи, с целью автоматизации процесса вычислений, использован метод базисов Гребнера в комбинации с алгоритмом исключения Сильвестра [5].

Решения получены для разных подпространств  $\omega \subset \Omega$  при разных законах распределения точки  $B$  в  $\omega$ . Для каждого из подпространств рассчитывались значения 500 вариантов параметров звеньев манипулятора, которые сравнивались по значению критерия  $K$ . В

таблице 1 для одного из подпространств приведены наилучшие и наихудшие варианты сочетаний параметров.

Таблица 1 – Результаты численного эксперимента

№	$K_k$	$l_1$	$l_2$	$l_3$	$\rho_1$	$\rho_2$	$\rho_3$	$W$
Наилучшие комбинации								
258	105.7	0.39	0.33	0.29	1.0	0.85	0.77	1.33
Наихудшие комбинации								
367	205.4	0.49	0.49	0.016	1.0	0.97	0.77	1.02

Для данного подпространства минимальным значениям критерия  $K$  соответствуют комбинации параметров звеньев со средним значением вурфа  $W_{cp}^{min} = 1.3195$  ( $W = \frac{(l_1 + l_2)(l_2 + l_3)}{l_2(l_1 + l_2 + l_3)}$ ), максимальным –  $W_{cp}^{max} = 1.0425$ . Следует отметить, что среднее значение вурфа плотностей для 20 наилучших комбинаций равно  $W_{cp}^p = 1.3269$ , а вурфа масс –  $W_{cp}^m = 1.3125$ .

Результаты численных экспериментов позволяют сделать следующие выводы:

1. Между длинами, массами и плотностями звеньев модели манипулятора при которых критерий  $K$  принимает минимальное значение при длительном выполнении наиболее часто повторяющихся движений наблюдается приближенная неевклидова симметрия.

2. Изменение свойств подпространства  $\omega$  приводит к изменению соотношений между параметрами звеньев, но свойство симметрии при этом сохраняется.

Список источников

1. Кобринский А.А. Манипуляционные системы роботов: основы устройства, элементы теории/ А.А. Кобринский, А.Е. Кобринский–М.: Наука., 1985.–344 с.
2. Полякова М.А. Синтез манипулятора антропоморфной структуры по заданным свойствам рабочего пространства/М.А.Полякова, А.М.Поляков//Вестник СевГТУ. Сер. Механика, энергетика, экология.-Севастополь, 2004.-Вып.55.–С. 30-39.
3. Соболев И.М. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями/И.М.Соболев, Р.Б.Статников - М.:Наука,1981.-110 с.
4. Gribble P.L. Compensation for interaction torques during single- and multijoint limb movement/P.L.Gribble, D.J.Ostry//Journal of neurophysiology.-November 1999.-Vol.82, No.5.-P.2310-2326.
5. Dhindra A.K. A Groebner - Sylvester hybrid method for closed - form displacement analysis of mechanisms/A.K.Dhindra, A.N.Almadi, D.Kohli//Journal of mechanical design.-December 2000.-Vol.122.-P.431-438.