

ФОРМЫ ДВИЖЕНИЯ АНТРОПОМОРФНОГО МАНИПУЛЯТОРА

Бохонский А.И., Варминская Н.И.

Ключевые слова: оптимальное управление, обратная задача динамики, критерии формы движения.

Аннотация. С использованием принципа действия (в форме Лагранжа), энергетического критерия и мультипликативного критерия энергодействия выявлена предпочтительная форма движения руки антропоморфного манипулятора с жесткими звеньями при оптимальном движении – за фиксированное время разгон из состояния покоя с последующим торможением до нового состояния покоя.

MOVEMENT FORMS OF ANTHROPOMORPHIC MANIPULATOR

Bokhonsky A.I., Varminskaya N.I.

Keywords: optimal control, inverse problem of dynamics, movement form criteria.

Abstract. Using the influence principle (the Lagrange form), the energy criterion and the multiplicative energy criterion, the preferred form of arm movement of an anthropomorphic manipulator with rigid links during optimal movement is revealed: acceleration from the quiescence state and deceleration to the new quiescence state in a fixed time.

Стимулированию интенсивных исследований оптимального управления манипуляционными роботами [1] способствовал достигнутый в свое время уровень теории оптимального управления и ее приложений в технике [2, 3 и др.].

Конструированию оптимальных управлений перемещением объектов как абсолютно твердых тел и деформируемых систем посвящены, например, работы [4-7]. Был найден класс кососимметричных управлений, оптимальных в смысле существования экстремумов реверсионно восстановленных функционалов-критериев (переход от функций, отражающих свойства конструируемого движения, через уравнение Эйлера и функционалу-критерию). Ряд технических приложений такого подхода отражен в работах [4, 5].

Следует отметить, что практическая реализация оптимальных управлений сопряжена с решением новых задач, учитывающих не только энергоемкость управления, но и поиск приемлемой формы движения многозвенных исполнительных механизмов для достижения цели движения – конечного состояния центра масс схвата с грузом.

Цель дальнейших исследований – оценка форм движения на примере руки антропоморфного манипулятора с привлечением принципа действия, расчета энергоемкости оптимального движения, использованием «обобщенного мультипликативного критерия энергодействия».

1. Оптимальное управление вращением жестких звеньев манипулятора для достижения конечного состояния покоя центра масс схвата с грузом

Для оптимального управления вращением жестких звеньев манипулятора, работающего в горизонтальной плоскости, принят критерий

оптимальности по аналогии с известным критерием в случае поступательного движения [2, 3]: $J = \int_0^T \varepsilon^2 dt$, где ε – угловое ускорение (управление).

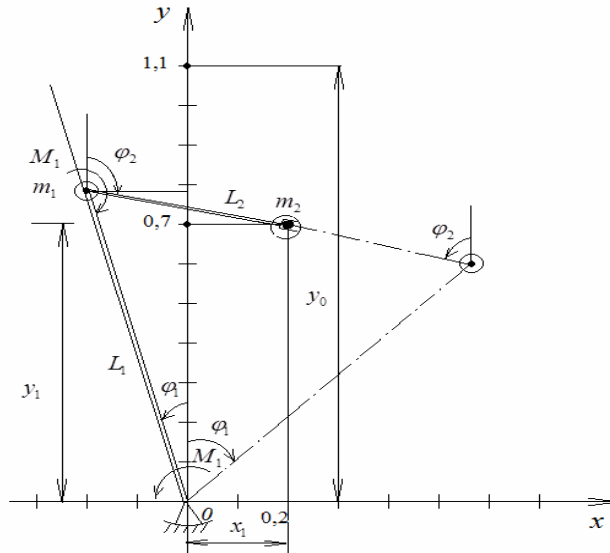


Рис. 1. Схема движения звеньев антропоморфного манипулятора по первой форме (пунктирные линии) и по второй (сплошные линии)

При заданных краевых условиях $\varphi(0) = 0$, $\dot{\varphi}(0) = \omega(0) = 0$, $\varphi(T) = \varphi_*$, $\dot{\varphi}(T) = \omega(T) = 0$ с использованием вариационного исчисления получены зависимости для углов поворотов, угловых скоростей и угловых ускорений звеньев руки манипулятора:

$$\varepsilon(t) = \frac{6\varphi_*}{T^2} \left(1 - \frac{2t}{T}\right), \quad \omega(t) = \frac{\varphi_*}{T^2} \left(6t - \frac{6t^2}{T}\right); \quad \varphi(t) = \frac{\varphi_*}{T^2} \left(3t^2 - \frac{2t^3}{T}\right). \quad (1)$$

Кинематика оптимального вращения каждого из звеньев манипулятора при любой форме движения (рисунок 1) описывается зависимостями общего вида (1). Здесь φ_* – соответственно максимальный угол поворота каждого из звеньев при достижении центром масс схвата конечной точки с координатами x_1, y_1 . С целью упрощения решения задачи исходное состояние манипулятора описывается координатой центра масс $x_0 = 0$, $y_0 = L_1 + L_2$, где L_1, L_2 – длины звеньев.

2. Принцип действия как критерий оценки формы движения руки

Каждой из двух форм движения звеньев руки соответствует общее выражение для кинетической энергии:

$$T_k = \frac{1}{2} m_1 L_1^2 \omega_1^2(t) + \frac{1}{2} m_2 \left(L_1^2 \omega_1^2(t) + L_2^2 \omega_2^2(t) + 2L_1 \omega_1(t) L_2 \omega_2(t) \cos(\varphi_1(t) + \varphi_2(t)) \right),$$

где m_1, m_2 – сосредоточенные массы, звенья предполагаются невесомыми; $\varphi_1(t), \varphi_2(t)$ – углы поворотов звеньев руки по отношению к исходному

(вертикальному) положению; $\omega_1(t)$, $\omega_2(t)$ – угловые скорости звеньев. При численном анализе принято: $m_1 = 10$ кг, $m_2 = 5$ кг.

В процедуре оценки формы движения используется принцип действия по Лагранжу: $J = \int_0^T 2T_k dt$.

На практическое на использование принципа действия для оценки форм движения манипулятора обращено внимание, например, в [8].

Общая энергия, затраченная на реализацию управлений по каждой из форм движения, найдена согласно зависимости:

$$A = \left| \int_0^T M_1(t) \dot{\varphi}_1(t) dt \right| + \left| \int_0^T M_2(t) \dot{\varphi}_2(t) dt \right|,$$

где $\dot{\varphi}_1(t)$, $\dot{\varphi}_2(t)$ – угловые скорости звеньев; $M_1(t)$, $M_2(t)$ – движущие моменты в приводах, которые для каждой из форм движения находятся с использованием уравнений Лагранжа второго рода

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T_k}{\partial \dot{\varphi}_1} \right) - \frac{\partial T_k}{\partial \varphi_1} = M_1(t), \quad \frac{d}{dt} \frac{\partial T_k}{\partial \dot{\varphi}_2} - \frac{\partial T_k}{\partial \varphi_2} = M_2(t).$$

3. Определение конечных углов поворота звеньев при достижении центром масс схвата точки с координатами x_1 , y_1 (для каждой из форм движения)

Первой форме движения (рисунок 1) соответствуют зависимости, образующие, между декартовыми координатами конечной точки (x_1 , y_1) и конечными углами поворотов (φ_1^* , φ_2^*) звеньев, систему трансцендентных уравнений:

$$\begin{aligned} L_1 \cos(\varphi_1^*) + L_2 \cos(\varphi_2^*) - y_1 &= 0, \\ L_1 \sin(\varphi_1^*) + L_2 \sin(\varphi_2^*) - x_1 &= 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Для второй формы движения система трансцендентных уравнений для определения φ_1^* , φ_2^* , соответствующих этой форме, имеет вид:

$$\begin{aligned} L_1 \sin(\varphi_1^*) - L_2 \cos(\varphi_2^*) + x_1 &= 0, \\ -L_1 \cos(\varphi_1^*) + L_2 \sin(\varphi_2^*) + y_1 &= 0. \end{aligned} \quad (3)$$

Системы уравнений (2) и (3) решены численно при следующих исходных данных: $L_1 = 0,8$ м; $L_2 = 0,4$ м; $x_1 = 0,2$ м; $y_1 = 0,7$ м.

По первой форме получено (в радианах и градусах): $\varphi_1^* = 0,7998$ (45,80°); $\varphi_2^* = 1,2065$ (69,13°). По второй форму – соответственно $\varphi_1^* = 0,2432$ (13,92°); $\varphi_2^* = 1,1923$ (101,02°).

Для проверки найденных углов при заданных длинах звеньев построены для каждой из форм конечные положения звеньев, которые подтверждают (рисунок 1) правильность найденных корней систем уравнений (2) и (3).

По каждой форме построены графики изменения общей кинетической энергии (при $T=1\text{с}$) и графики движущих моментов (рисунки 2, 3). Экстремум кинетической энергии и графики движущих моментов подтверждают кососимметричный характер оптимально управляемого движения.

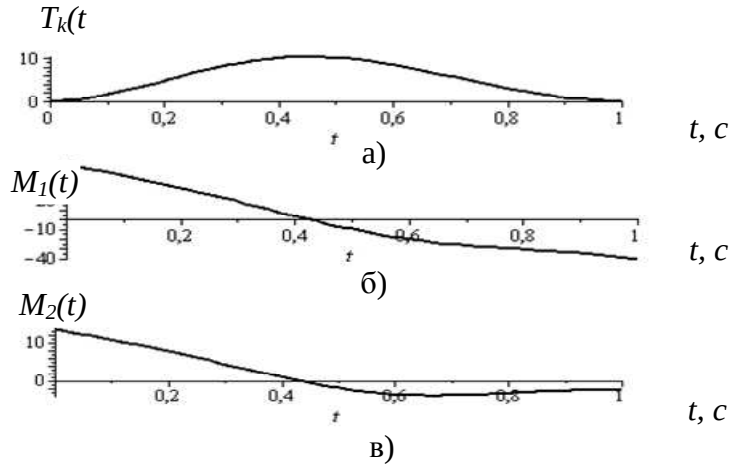


Рис. 2. Движение по первой форме: а) $T_k(t)$; б) $M_1(t)$; в) $M_2(t)$

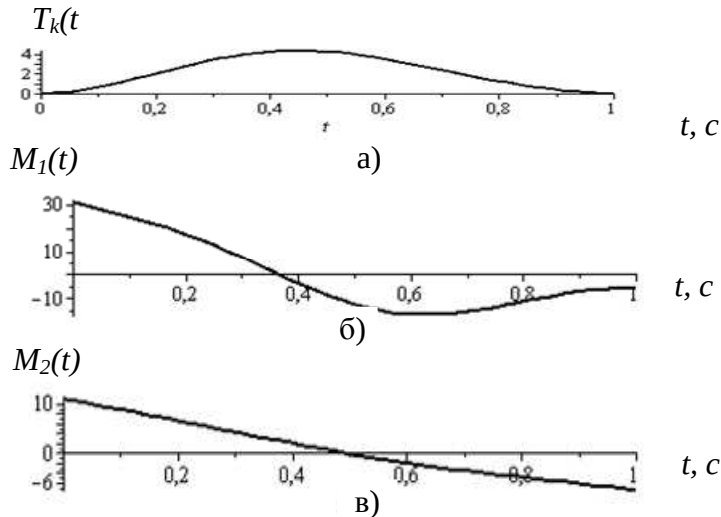


Рис. 3. Движение по второй форме: а) $T_k(t)$; б) $M_1(t)$; в) $M_2(t)$

Помимо вычисленных значений действия и энергетических затрат по каждой из форм найдены значения «мультипликативного критерия энергодействия»: $\text{ЭД} = A \cdot J \text{ (Дж}^2 \cdot \text{с)}$. Результаты вычислений сведены в таблицу 1. Как следует из таблицы, численные значения критериев подтверждают преимущество второй формы движения. С физической точки зрения энергия для реализации движения уменьшается в связи с поворотом звена 1 на существенно меньший угол по сравнению с поворотом этого звена при движении по первой форме.

Табл. 1. Результаты расчетов

Номер формы движения, конечные углы	Энергия A , Дж	Действие J , Дж·с	Энергодействие $\mathcal{E}D = A \cdot J$, Дж ² ·с	Примечание
Первая форма $\varphi_1^* = 46^\circ$, $\varphi_2^* = 69^\circ$	3,58	10,5	37,6	
Вторая форма $\varphi_1^* = 14^\circ$, $\varphi_2^* = 101^\circ$	1,69	4,44	7,49	Предпочтительная форма

Выводы

1. Рассмотренный алгоритм поиска форм движения при оптимальном управлении многосвязным манипулятором применим для различных типов управлений, сконструированных реверсионно и приведенных в работах [4, 5, 7].

2. В случае учета конечной изгибной жесткости звеньев манипулятора при использовании принципа действия в общей кинетической энергии должна учитываться энергия колебаний упругих звеньев.

Список литературы

1. Аветисян В.В. Оптимальное управление электроприводами промышленных роботов / В.В. Аветисян, Л.Д. Акуленко, А.Н. Бототник. – М.: Институт проблем механики, 1986. – 72 с.
2. Теория автоматического управления. В 2-х ч. Ч. II. Теория нелинейных и специальных систем автоматического управления / Под ред. А.А. Воронова. – М.: Высш.шк., 1977. – 288 с.
3. Солодовников В.В. Основы теории и элементов систем автоматического регулирования: Учеб. пособие. – М.: Машиностроение, 1985. – 536 с.
4. Бохонский А.И. Вариационное и реверсионное исчисления в механике / А.И. Бохонский, Н.И. Варминская. Под общ. ред. А.И. Бохонского. – Севастополь: СевНТУ, 2012. – 212 с.
5. Бохонский А.И. Актуальные задачи вариационного исчисления. – Palmarium Academic Publishing, 2013. – 77 с.
6. Bokhonsky A.I. Modelling and analysis of elastic system in motion / A.I. Bokhonsky, S.Y. Zolkiewski. – Gliwice: Wydawnictwo Politechniki, 2011. – 171 p.
7. Бохонский А.И. Реверсионный принцип оптимальности. – М.: Вузовский учебник: ИНФРА, 2016. – 174 с.
8. Бохонский А.И. Конструирование управляемого движения объектов / А.И. Бохонский, А.И. Рыжков // Мехатроника, автоматика и робототехника. – 2017. – №1. – С. 64-69.
9. Бохонский А.И. Оптимальное управление движением упругого антропоморфного манипулятора / А.И. Бохонский, Д.В. Волнухин // Вестник СевГТУ. Вып.6: Механика, энергетика, экология. – Севастополь: СевГТУ, 1997. – С. 28-32.

References

1. Avetisyan V.V. Optimal control of electric drives of industrial robots / V.V. Avetisyan, L.D. Akulenko, A.N. Bototnik. – M.: Institute for problems in mechanics, 1986. – 72 p.
2. Automatic control theory. Into 2 parts. Part II. The theory of nonlinear and special systems of automatic control / Ed. by A.A. Voronov. – M.: Higher school, 1977. – 288 p.
3. Solodovnikov V.V. Fundamentals of the theory and elements of automatic control systems: Tutorial / V.V. Solodovnikov. – M.: Mechanical engineering, 1985. – 536 s.
4. Bokhonsky A.I. Reversion and variational calculus in mechanics / A.I. Bokhonskij, N.I. Varminskaya. Ed. by A.I. Bokhonsky. – Sevastopol: SevNTU, 2012. – 212 p.
5. Bokhonsky A.I. Actual problems of variational calculus. – Pabmarium Academic Publishing, 2013. – 77 p.
6. Bokhonsky A.I. Modelling and analysis of elastic system in motion / A.I. Bokhonsky, S.Y. Zolkiewski. – Cliwice: Wydawnictwo Politechniki, 2011. – 171 p.
7. Bokhonsky A.I. The reversible principle of optimality. – M.: University textbook: INFRA, 2016. – 174 p.
8. Bokhonsky A.I. Design of controlled motion of objects / A.I. Bokhonsky, A.I. Ryzhkov // Mechatronics, automation and robotics. –2017. – №1. – P. 64-69.
9. Bokhonsky A.I. Optimal motion control of an elastic anthropomorphic manipulator / A.I. Bokhonsky, D.V. Volnuhin // News of SevSTU. Issue 6: Mechanics, energy, ecology. – Sevastopol: SevSTU, 1997. – P. 28-32.

Бохонский Александр Иванович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технической механики и машиноведения, Севастопольский государственный университет, г.Севастополь, Российская Федерация, bohon.alex@mail.ru	Bokhonsky Alexander Ivanovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Technical Mechanics and Mechanical Engineering, Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation, bohon.alex@mail.ru
Варминская Наталья Ивановна – кандидат технических наук, доцент, заведующая кафедрой физики и общетехнических дисциплин, Черноморское высшее военноморское училище им. П.С.Нахимова, г.Севастополь, Российская Федерация, nvarminska@gmail.com	Varminskaya Natalia Ivanovna – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Physics and General Technical Disciplines, Black Sea Higher Naval School named after P.S.Nakhimov, Sevastopol, Russian Federation, nvarminska@gmail.com

Received 03.04.2019