Bionic algorithm synchronous control of smooth movement of multiparameter systems

Mityushov E. A., Misyura N.E., Berestova S.A.
mityushov-e@mail.ru , n_misura@mail.ru , s.a.berestova@urfu.ru
Ural Federal University named after the first President of Russia
B.N. Yeltsin, Ekaterinburg

Abstract

We give of the bionic approach to the algorithms description of a smooth synchronous movement of robotic systems. We give a formal definition of a smooth motion. It is shown that the solution of tasks smooth motion reduces to finding a dimensionless control functions. For example, the decision of a robot manipulator control problem with two degrees leads to the mathematical model of a single-channel synchronous control.

Keywords

Bionic robotics, smooth movement, control through force, single-channel synchronous control, vector-polynomial law of motion.

Бионический алгоритм синхронного управления плавным движением многопараметрических систем

Берестова С.А., Мисюра Н.Е., Митюшов Е.А.
mityushov-e@mail.ru , n_misura@mail.ru , s.a.berestova@urfu.ru
Уральский федеральный университет имени первого Президента России
Б.Н.Ельцина, Екатеринбург

Аннотация. Предложен бионический подход к разработке алгоритмов плавного синхронного движения робототехнических систем. Дается формальное определение плавного движения, которое используется для решения поставленной задачи синхронного управления и может быть применено к решению широкого класса задач биомеханики. Показано, что решение задачи синхронного управления плавным движением сводится к нахождению одной безразмерной функции управления. На примере решения задачи о бионическом управлении роботом манипулятором с двумя степенями свободы показана связь рассмотренной математической модели синхронного управления с решением задачи одноканального силового управления робототехническими системами.

Ключевые слова: бионическая робототехника, плавное движение синхронное управление, силовое управление, одноканальное управление, векторно-полиномиальный закон движения.

Введение

Прогресс в развитии современных автоматизированных производств и робототехники во многом определяется техническими возможностями создания синхронного управления многопараметрическими механическими системами, осуществляющими рабочую фазу движения по программе пуск-разгон-торможение-остановка. Современные средства сенсорного контроля движения при достаточно большой номенклатуре производимых датчиков не могут пока конкурировать по точности и скорости с соответствующими органами живых организмов. Тем не менее, сетевые протоколы необходимые для обеспечения требуемой скорости передачи данных, превышающей таковые в живых организмах, доступны для создания программного обеспечения управления движением многопараметрических технических систем по стандартам SERCOS, SERCOS III, Profinet IRT и EtherCAT с общими функциями управления скоростью, положением, силой или давлением, а также обеспечения синхронного движения по нескольким координатам.

По мере совершенствования систем сенсорного контроля при создании управляемых многопараметрических механических систем будут усиливаться бионические принципы. Очевидно, что минимизация энергетических затрат в модели бионической робототехники должна обеспечиваться плавностью движения – «…движение, которому предоставляется течь, как требует сама бионическая природа движущегося органа, оказывается особенно плавным, легким и хорошо оформленным» [1]. Поиск плавных движений – вот путь, на котором, надо искать решение задач управления робототехническими комплексами. Интуитивно понятный термин – «плавность», для включения его в создаваемую биомеханическую модель требует формализации.

Предлагается следующее определение плавного движения механической системы:

Цикл движения механической системы, начинающийся из состояния покоя и оканчивающийся покоем, называется плавным, если в начальный и конечный момент движения, скорости и ускорения точек системы равны нулю, а точки системы перемещаются по регулярным траекториям.

Попытки описать плавные движения в интуитивных понятиях биомеханики движений человеческого тела с учетом предметного опыта каллиграфического письма, танцевальных движений и техники мультипликации (inbetweening) [2,3] хорошо согласуются с этим определением. При этом, если обеспечение плавности движения живых организмов осуществляется за счет «…синергии, охватывающей всю мускулатуру и весь двигательный аппарат сверху донизу» [1], то в технических системах плавность и синхронность движения может быть достигнута созданием специального закона кинематического управления, который реализуется за счет программной синхронной работы соответствующих сервоприводов.

1. Бионический алгоритм синхронного управления движением

Пусть задана механическая система, имеющая s степеней свободы. Положение системы в произвольный момент времени определяется вектором $q=(q_1,\ \ q_2,\ \ \ldots,\ \ q_s)$, задающим точку на траектории движения в соответствующем конфигурационном пространстве. Плавное перемещение системы на интервале $[0,T]$ из положения q_0 в положение q_T ищется в виде векторного закона движения, описываемого полиномом пятой степени

$$q = at^5 + bt^4 + ct^3 + dt^2 + et + f, \quad 0 \le t \le T,$$

где a,b,c,d,e,f – векторы неопределенных коэффициентов.

С учетом определения плавного движения, векторы неопределенных коэффициентов находятся по краевым условиям

$$q(0)=q_0, \quad q(T)=q_T, \quad \dot q(0)=0, \quad \dot q(T)=0, \quad \ddot q(0)=0, \quad \ddot q(T)=0.$$

С учетом краевых условий

$$f=q_0, \qquad e=0, \quad d=0,$$
$$\begin{cases} aT^5+bT^4+cT^3=q_T-q_0, \\ 5T^4a+4T^3b+3T^2c=0, \\ 20T^3a+12T^2b+6Tc=0. \end{cases}$$

Решение системы уравнений для определения векторов a,b,c записывается равенством

$$\begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T^5 & T^4 & T^3 \\ 5T^4 & 4T^3 & 3T^2 \\ 20T^3 & 12T^2 & 6T \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} q_T-q_0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix},$$

$$\begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 6/T^5 & -3/T^4 & 1/2T^3 \\ -15/T^4 & 7/T^3 & -1/T^2 \\ 10/T^3 & -4/T^2 & 1/2T \end{pmatrix} \begin{pmatrix} q_T - q_0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Плавный закон перемещения системы из начального положения в конечное принимает вид

$$q = q_0 + (q_T - q_0)\left(6\left(\frac{t}{T}\right)^5 - 15\left(\frac{t}{T}\right)^4 + 10\left(\frac{t}{T}\right)^3\right), \quad 0 \le t \le T.$$

2. Бионический алгоритм управления движением робота манипулятора

Пусть манипулятор-колонна (рис.1) с массой стрелы $M = 20кг$ путем силового управления осуществляет перемещение детали массой $m = 100кг$ из начального положения $\vec{r}_0 = \vec{r}(0)$ в конечное положение $\vec{r}_T = \vec{r}(T)$. Найти законы изменения силы $F(t)$ и момента $M(t)$, обеспечивающие плавный перенос детали по кратчайшей траектории за время T из начального положения в конечное, если $R = 2м, \quad T = 5с, \quad s_0 = 0{,}1м, \quad s_T = 0{,}6м, \quad \varphi_0 = 0, \quad \varphi_T = \frac{\pi}{2}$.

Кратчайшей называется прямолинейная траектория движения механической системы в пространстве конфигураций. Плавный перенос подразумевает выполнение условий плавного пуска и плавного торможения, когда скорость и ускорение в начальный и конечный моменты движения переносимого груза равны нулю

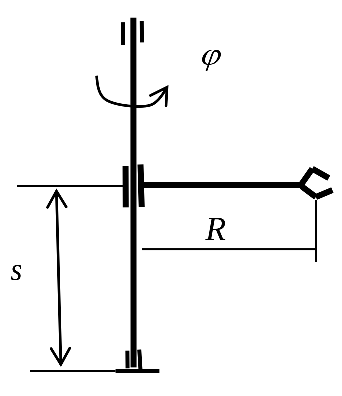
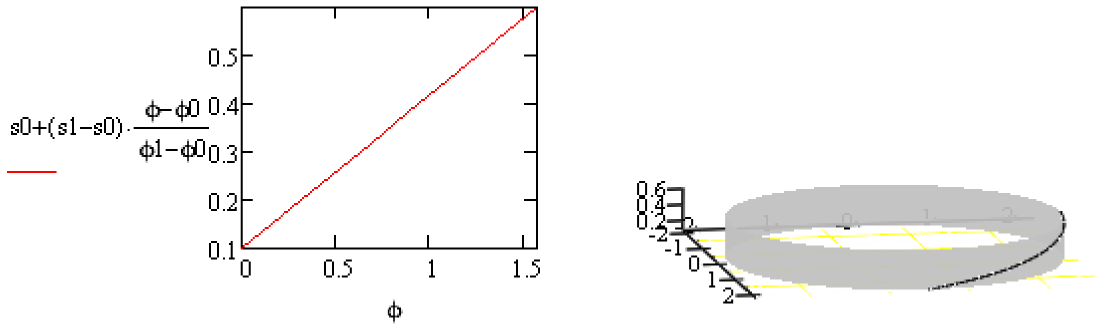


Рис. 1. Кинематическая схема манипулятора.

В качестве обобщенных координат выбираются вертикальное перемещение груза s и угол поворота стрелы φ. Следуя общему алгоритму находим, что перенос детали по кратчайшей траектории (рис. 2) за время T из начального положения в конечное осуществляется при задании следующих функций положения

$$\begin{aligned} \varphi(t) &= \varphi_0 + (\varphi_T - \varphi_0)u(t), \\ s(t) &= s_0 + (s_T - s_0)u(t). \end{aligned} \tag{1}$$

$u(t) = 6\left(\frac{t}{T}\right)^5 - 15\left(\frac{t}{T}\right)^4 + 10\left(\frac{t}{T}\right)^3$ – безразмерная функция, определяющая закон одноканального управления манипулятором, такая, что $u(0) = 0$, $u(T) = 1$; T – время цикла.



а) б)

Рис. 2. Траектория системы в пространстве конфигураций (а) и траектория детали в физическом пространстве (б)

3. Математическая модель одноканального силового управления плавным движением

По закону движения (1) заданной механической системы, совершающей плавное движение, с помощью уравнений Лагранжа ищутся обобщенные силы, соответствующие выбранным обобщенным координатам

$$F(t) = \frac{d}{dt}\frac{\partial L}{\partial \dot{s}} - \frac{\partial L}{\partial s}, \quad M(t) = \frac{d}{dt}\frac{\partial L}{\partial \dot{\varphi}} - \frac{\partial L}{\partial \varphi}, \tag{2}$$

где $L = L(s, \dot{s}, \dot{\varphi})$ - функция Лагранжа

$$L = \frac{MR^2\dot{\varphi}^2}{6} + \frac{M\dot{s}^2}{2} + \frac{m\left((R\dot{\varphi})^2 + \dot{s}^2\right)}{2} - (M+m)g(s - s_0) \tag{3}$$

(предполагается, что стрелу манипулятора можно принять за тонкий однородный стержень).

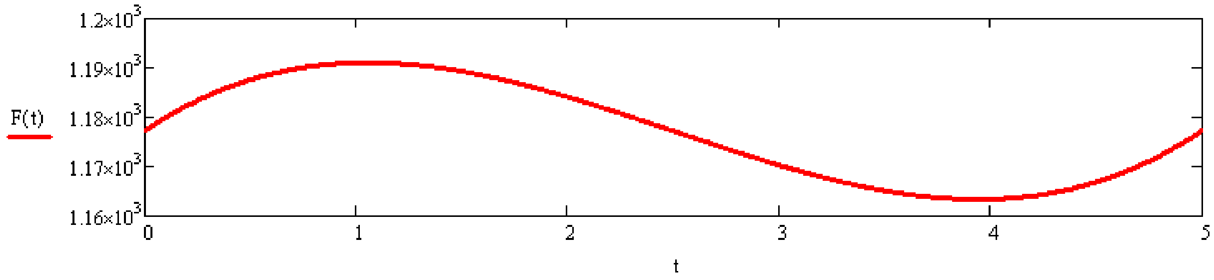
Подстановка функции (3) в уравнения (2) дает

$$F(t)=(M+m)\ddot{s}+(M+m)g,$$
$$M(t)=\left(\frac{MR^2}{3}+mR^2\right)\ddot{\varphi}.$$

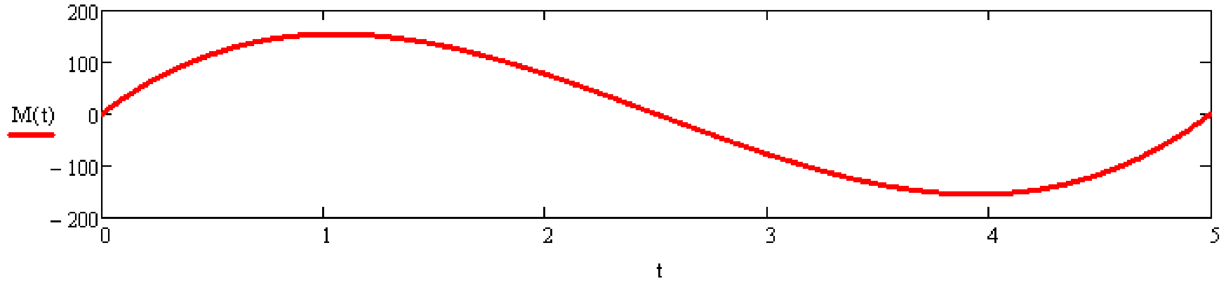
С учетом закона движения детали, находится закон силового управления

$$F(t)=(M+m)g+(M+m)(s_T-s_0)\left(\frac{120}{T^5}t^3-\frac{180}{T^4}t^2+\frac{60}{T^3}t\right),$$
$$M(t)=\left(\frac{MR^2}{3}+mR^2\right)(\varphi_T-\varphi_0)\left(\frac{120}{T^5}t^3-\frac{180}{T^4}t^2+\frac{60}{T^3}t\right).$$

На рисунке 3 приведены график изменения силы и крутящего момента при плавном переносе детали по оптимальной траектории



а)



б)

Рис. 3. Графики $F(t)$, Н (а) и $M(t)$, Н*м (б) изменения силовых воздействий

Результаты визуализация плавного движения манипулятора, которые осуществлялись в пакете символьной математики с графическим редактором MathCAD, представлены на рисунке 4.

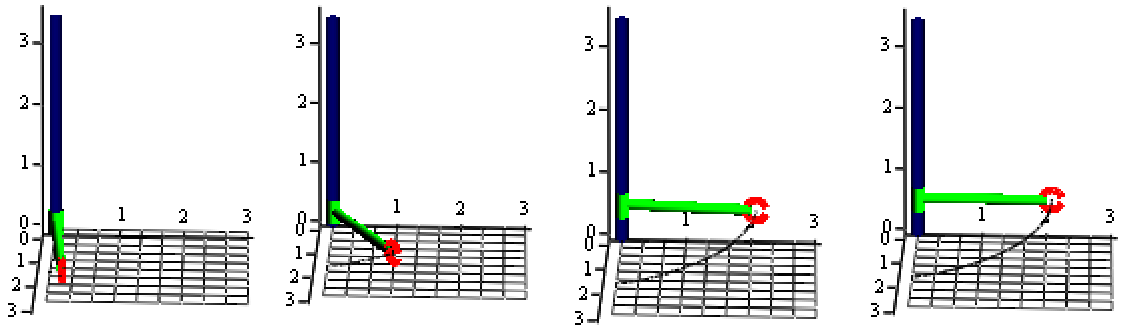


Рис. 4. Кадры анимации плавного движения робота манипулятора для моментов времени $t_1 = 1c, \quad t_2 = 2c, \quad t_4 = 4c, \quad t_5 = T = 5c$

Заключение

Рассмотренный бионический подход моделирования плавного движения робототехнических голономных систем с конечным числом степеней свободы в режиме пуск-разгон-торможение-остановка позволяет обеспечить процесс одноканального управления с использованием одной безразмерной функции управления. Движение механической системы при этом осуществляется по кратчайшей траектории в пространстве конфигураций, соединяющей начальную и конечную точку. Использование предложенной полиномиальной функции управления допускает построение более сложных кусочных траекторий движения в пространстве конфигураций с включением требуемых переходных режимов и с обеспечением гладкости функций, определяющих закон движения, до второго порядка включительно.

Литература

1. Бернштейн Н. А. Биомеханика и физиология движений: избр. психол. тр. / под ред. В. П. Зинченко ; сост. А. И. Назаров; Акад. пед. и соц. наук, Моск. психол.-соц. ин-т. — М. : Изд-во "Ин-т практ. психологии"; Воронеж: НПО "МОДЭК", 1997. 608 с.
2. Koutedakis Y. Biomechanics in dance// J. Dance Med. Sci. 2008, 12(3). P. 73–74.
3. Xie M. Feature matching and affine transformation for 2d cel animation // The Visual Computer 12, 1995. P. 419–428.