

АГРОПРОМЫШЛЕННАЯ ИНЖЕНЕРИЯ

УДК 621.865.8

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ МАНИПУЛЯТОРА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО РОБОТА

И.А. Несмиянов¹, кандидат технических наук, доцент

В.В. Жога², доктор физико-математических наук, профессор

В.Е. Павловский³, доктор физико-математических наук, профессор

Н.С. Воробьева¹, кандидат технических наук, доцент

¹Волгоградский государственный аграрный университет

²Волгоградский государственный технический университет

³Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, г. Москва

В статье представлено решение задачи позиционирования и траекторного синтеза манипулятора погрузочного робота. Предложена система управления для реализации программных движений. Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований.

Ключевые слова: манипулятор, система управления, программное движение.

*Работа выполнена при поддержке Российского фонда
фундаментальных исследований (13-08-00387 – а), (12-08-00301 – а).*

В манипуляторах на основе механизмов параллельной структуры (МПС) функции металлоконструкции и приводов совмещены. Поэтому они воспринимают нагрузку подобно пространственным фермам, и как следствие, обладают повышенной точностью позиционирования при высоких значениях скорости и ускорения грузозахватного устройства [5]. Манипулятор с механизмами параллельной структуры, по сравнению с манипулятором с последовательно соединёнными звеньями, характеризуется высоким показателем грузоподъёмности, сравнительно небольшой металлоёмкостью.

К недостаткам манипуляторов параллельной структуры относятся ограниченность рабочей зоны, небольшая манипулятивность, отсутствие оптимальных алгоритмов управления [3].

В связи с этим актуальны задачи оптимизации геометрических, кинематических и силовых параметров манипуляторов параллельной кинематической структуры и разработка методик их расчета и проектирования [4].

Манипулятор погрузочного робота

Основу манипулятора составляет пространственный приводной механизм в виде треугольной пирамиды со звеньями переменной длины в качестве исполнительных звеньев (рис. 1) [1].



Рисунок 1 – Конструкция манипулятора робота

Механизм содержит три звена 2, 3, 4, концы которых закреплены с помощью специальных двухподвижных шарниров на поворотном основании 5, что позволяет изменять зону обслуживания. Противоположные концы звеньев соединены специальным шарнирным узлом 6, обеспечивающим пересечение геометрических осей этих звеньев в одной точке, что исключает появление изгибающих моментов от внешних нагрузок. Поворотное основание 5 имеет возможность поворачиваться за счёт звена переменной длины 4.

Задача позиционирования

Общая задача перемещения исполнительного элемента (схвата) разделяется на три этапа: позиционирование схвата, обеспечиваемое геометрией механизма, синтеза его траектории в пространстве, ограниченном рабочей зоной, и определение закона движения по полученной траектории.

Позиционирование схвата манипулятора при выполнении технологических операций состоит в перемещении его из начального состояния, которое определяется координатами точки $M_0(X_{M0}, Y_{M0}, Z_{M0})$, в конечное положение $M_k(X_{Mk}, Y_{Mk}, Z_{Mk})$. Причём, при известной начальной конфигурации манипулятора, определяемой обобщёнными координатами l_{i0} , требуется найти конечную конфигурацию l_{ik} . Так как число обобщённых координат манипулятора, равное четырём, превышает число обобщённых координат схвата, равное трём, то есть манипулятор обладает ненулевой маневренностью, то заданному конечному положению объекта соответствует множество конфигураций системы (рис. 2).

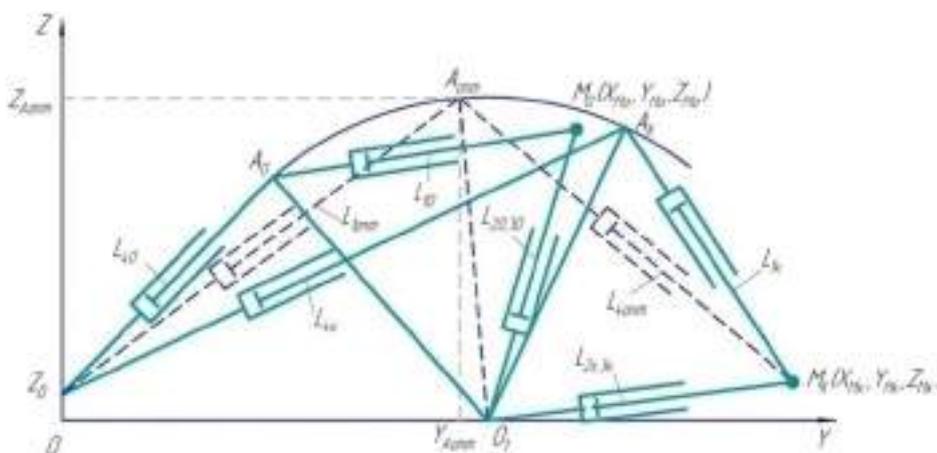


Рисунок 2 – Перевод схвата манипулятора из начального положения в конечное (плоскость ZOY)

Координаты центра схвата M в декартовой системе неподвижных координат $OXYZ$ и длины звеньев манипулятора, связаны уравнениями

$$\begin{cases} X_M^2 + (Y_M - Y_A)^2 + (Z_M - Z_A)^2 = L_1^2, & (X_M - X_B)^2 + (Y_M - Y_B)^2 + Z_M^2 = L_2^2, \\ (X_M - X_C)^2 + (Y_M - Y_C)^2 + Z_M^2 = L_3^2, & Y_M^2 + (Z_A - Z_D)^2 = L_4^2, \end{cases} \quad (1)$$

где X_M, Y_M, Z_M – координаты точки M в неподвижной системе координат; $X_B = -X_C, Z_A, Y_B = Y_C, Z_D$ – координаты точек крепления звеньев манипулятора.

Длины звеньев l_{2k}, l_{3k} определяются однозначно из выражений (1), а длины звеньев $l_{1k}(Y_A, Z_A), l_{4k}(Y_A, Z_A)$ находятся из условия минимума квадратичной функции

$$\hat{O}(Y_A, Z_A) = C_1(L_{1k} - L_{10})^2 + C_4(L_{4k} - L_{40})^2, \quad (2)$$

и ограничений типа равенства

$$f(Y_A, Z_A) = Z_A^2 + (Y_B - Y_A)^2 - O_1 A^2 = 0, \quad (3)$$

и неравенств [7].

$$l_{1\min} \leq l_1 \leq l_{1\max}, \quad l_{4\min} \leq l_4 \leq l_{4\max}. \quad (4)$$

В соответствии с теоремой Куна-Такера, необходимые условия стационарности записываются в виде

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Phi^*}{\partial Y_A} &= C_1 \frac{\partial (l_{1k} - l_{10})^2}{\partial Y_A} + C_4 \frac{\partial (l_{4k} - l_{40})^2}{\partial Y_A} + \lambda_1 \frac{\partial f(Y_A, Z_A)}{\partial Y_A} - \lambda_2 - \lambda_3 = 0, \\ \frac{\partial \Phi^*}{\partial Z_A} &= C_1 \frac{\partial (l_{1k} - l_{10})^2}{\partial Z_A} + C_4 \frac{\partial (l_{4k} - l_{40})^2}{\partial Z_A} + \lambda_1 \frac{\partial f(Y_A, Z_A)}{\partial Z_A} = 0. \end{aligned} \quad (5)$$

Здесь $\lambda_2 \begin{cases} \geq 0, & \text{if } Y_A = Y_{A\min}, \\ = 0, & \text{if } Y_A > Y_{A\min}, \end{cases} \quad \lambda_3 \begin{cases} \geq 0, & \text{if } Y_A = Y_{A\max}, \\ = 0, & \text{if } Y_A < Y_{A\max}. \end{cases}$

из которых и находятся значения $L_{1k}(Y_A, Z_A)$, $L_{4k}(Y_A, Z_A)$.

Разработаны методики расчёта программного перемещения рабочего органа манипулятора из начального положения в конечное при движении по синусоидальному закону изменения ускорений штоков исполнительных звеньев и по прямой.

Задавая закон движения звеньев от l_{i0} до l_{ik} за время T исходя из условия «мягкого» трогания и касания, заключающегося в выполнении условий равенства нулю скоростей и ускорения схвата в начальном и конечном положениях,

$$l_i(t) = l_{i0} + (l_{ik} - l_{i0}) \cdot \left[\frac{t}{T} - \frac{1}{2\pi} \sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right) \right], \quad (6)$$

параметрические уравнения траектории схвата определяем из решения обратной задачи кинематики.

Оптимальная по времени перемещения схвата манипулятора траектория – это прямая. Однако такое перемещение возможно в том случае, когда все точки отрезка M_0M_k принадлежат множеству, являющемуся частью зоны обслуживания. Из уравнения прямой в пространстве, проходящей через две точки M_0 и M_k определяются зависимости координат X_M , Y_M , Z_M от длины траектории. Закон движения по прямой M_0M_k также принимался, удовлетворяющим требованиям «мягкого» касания. Таким образом, из уравнений (1) находятся законы изменения длин звеньев $l_i(t)$ без решения обратной задачи кинематики.

Траекторный синтез

Система дифференциальных уравнений, описывающих движение манипулятора с голономными связями, записывается с помощью уравнений Лагранжа с неопределёнными множителями.

Вводятся обозначения $x_1=X$, $x_3=Y$, $x_5=Z$, $x_7=\varphi$, $N_k=1, 2, 3, 4$ – управляющие усилия в звеньях манипулятора. Функции, переводящие схват манипулятора из начального положения в конечное положение за время T , находятся из условия минимума функционала [6]

$$J = \Phi(x_7(T)) + \frac{1}{2} \int_0^T \left[\dot{x}_2^2 + \dot{x}_4^2 + \dot{x}_6^2 + O_1 A^2 \cdot \dot{x}_8^2 \right] dt. \quad (7)$$

Искомые функции должны удовлетворять следующим граничным условиям $x_{2S-1}(0) = x_{2S-1,0}$, $x_{2S-1}(T) = x_{2S-1,T}$, $x_{2S}(0) = x_{2S}(T) = 0$.

Значение функции $x_7(T)$ неизвестно. Записывая необходимые условия стационарности, для $x_k(t)$, $k=1, 3, 5$ с учётом граничных условий, имеем

$$x_k(t) = \frac{-2[x_k(T) - x_k(0)]}{T^3}t^3 + \frac{3[x_k(T) - x_k(0)]}{T^2}t^2 + x_k(0). \quad (8)$$

Согласно [7], граничное условие для функции влияния

$$\lambda_7(T) = \frac{\partial \Phi[x_7(T)]}{\partial x_7(T)}, \quad \Phi(x_7(T)) = -\frac{\mu x_7^2(T)}{2T^3}, \quad (9)$$

где μ – постоянный коэффициент, значение которого определяется по результатам анализа, полученного решения и может корректироваться на стадии проектирования.

$$\ddot{x}_7(T) = const = \ddot{x}_7(t) = \frac{x_7(T)}{T^3}, \text{ и после интегрирования получаем}$$

$$\varphi(t) = \frac{\mu\varphi(T)}{6T^3}t^3 - \frac{\mu\varphi(T)}{4T^2}t^2 + \varphi(0). \quad (10)$$

Тогда при $t=T$ определяем неизвестное значение угла поворота основания в конечный момент времени $x_7 = \varphi \cdot O_1A$, а из уравнений (1) находятся законы изменения длин звеньев l_k манипулятора.

Программные усилия, необходимые для реализации системой управления синтезированных законов движения звеньев манипулятора, находятся из решения уравнений динамики.

Управление манипулятором робота

Для реализации законов программного движения робота строится система управления с обратной связью по положению, решающая задачу контурного управления.

В качестве исполнительного механизма звена манипулятора выступает линейный движитель – актуатор. Данные движители не имеют внутренней системы управления, но оснащены датчиком обратной связи, для определения состояния актуатора. Управление актуатором происходит аналогично управлению обычным электродвигателем постоянного тока, за тем исключением, что актуатор имеет ограничение вращения в виде длины штока. Также как и в электродвигателе, на вход актуатора подается постоянное напряжение, а управление скоростью происходит посредством ШИМ-сигнала.

Для получения информации о состоянии актуатора используется обратная связь, которая реализована в виде потенциометра и для его оцифровывания используется аналого-цифровой преобразователь (АЦП), входящий в состав отладочной платы. Разработана структурная схема подсистемы управления манипулятором мобильного робота (рис. 3).

Система управления движением с ШИМ – управлением приводами электродвигателями постоянного тока. Основным структурным компонентом системы управления является БУП (блок управления приводами) – модуль контроллеров и усилителей мощности (ключей). БУП полностью управляет системой, имеющей 4 управляемых степеней подвижности, рассчитан на систему аналоговой обратной связи. Система управления состоит из одного БУП с возможностью управления по интерфейсу RS-232 от удаленного компьютера. Система дистанционного управления движением реализуется на базе персонального компьютера. Его задача состоит в расчете в реальном масштабе времени координированного движения всех приводов по заданной математической модели, выдаче управляющих команд на БУП и обработке данных обратной связи.



Рисунок 3 – Структурная схема подсистемы управления манипулятором

Результаты численного и экспериментального моделирования

На рис. 4-5 представлены результаты решения рассмотренной задачи для начальных значений длин звеньев манипулятора $L_{10}=235$ мм, $L_{20}=370$ мм, $L_{30}=370$ мм, $L_{40}=240$ мм, при движении схвата по прямой и при заранее неизвестной траектории для синусоидального закона изменения ускорения. Этим значениям, полученным по показаниям датчиков положения, соответствуют координаты схвата $X(0)=0$ мм, $Y(0)=340$ мм, $Z(0)=349$ мм и угол наклона основания манипулятора $\varphi(0)=0,65$ рад. Задавшись конечными значениями координат схвата, $X(T)=50$ мм, $Y(T)=580$ мм, $Z(T)=150$ мм, определяются законы изменения координат схвата $X_k(t)$, угла наклона основания модели манипулятора робота $\varphi(t)$, а по выражениям (1) – длин его звеньев.

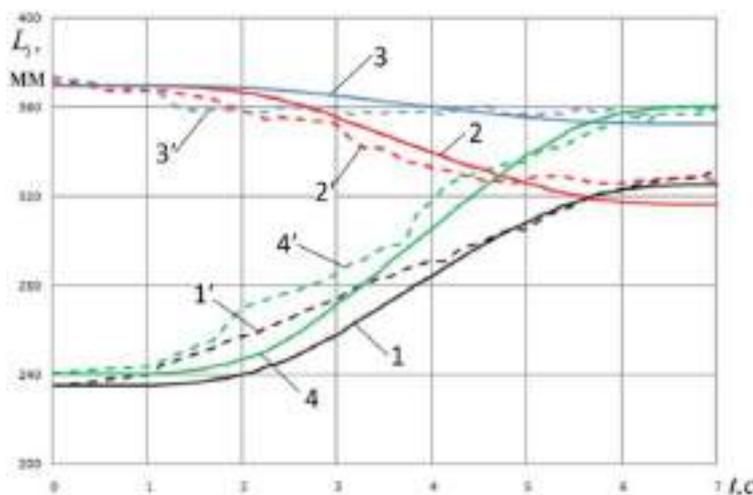


Рисунок 4 – Расчетные (кривые 1-4) и экспериментальные (кривые 1'-4') зависимости изменения длин звеньев 1-4 манипулятора от времени при синусоидальном законе изменения ускорений штоков исполнительных звеньев

Приведенные расчетные и экспериментальные зависимости изменения длин звеньев манипулятора от времени при движении схвата по прямой и при заранее неизвестной траектории для синусоидального закона изменения ускорения показали, с учетом ошибок измерений, совпадение теоретических и экспериментальных результатов, что может служить подтверждением практической реализуемости исследованных законов движения. Из рис. 4 видно, что при реализации прямолинейной траектории линейные скорости штоков звеньев 1, 2 и 3 изменяют знак, т. е. они совершают в относительном движении возвратно-поступательные движения. Причем, программные усилия, необходимые для реализации прямолинейной траектории, становятся знакопеременными.

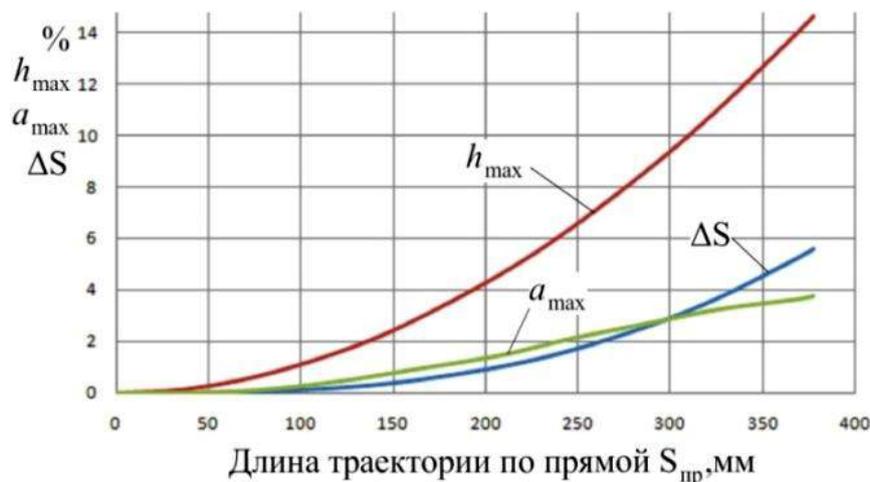


Рисунок 5 – Зависимости максимального отклонения (h_{max}) схвата манипулятора от прямолинейной траектории, увеличение длины траектории (ΔS) и отношение максимальных значений a_{max} ускорений схвата при движении по прямой и при синусоидальном законе изменения ускорения в зависимости от расстояния между точками позиционирования

При синусоидальном законе изменения ускорения штоков исполнительных звеньев, их длины при позиционировании схвата изменяются монотонно (рис. 5), и траектория схвата всегда находится в зоне обслуживания манипулятора, тогда как прямолинейная траектория схвата осуществима не для любых положений конечной точки позиционирования. Таким образом, можно утверждать, что алгоритм и система управления перемещением схвата манипулятора при синусоидальном законе изменения его исполнительных звеньев предпочтительнее.

Библиографический список

1. Аварийно-спасательная машина [Текст] : пат. 2476372 РФ, МПК С1./ В.В. Жога, В.А. Скакунов, А.В. Ерёмченко, П.В. Федченков, В.М. Герасун, И.А. Несмиянов, В.В. Дяшкин-Титов; ВолгГТУ (2013)
2. Брайсон А., Хо Ю-ши. Прикладная теория оптимального управления [Текст] /Хо Ю-ши Брайсон А. – М.: Мир, 1972. – 544 с.
3. Глазунов, В.А. Пространственные механизмы параллельной структуры [Текст]/ В.А. Глазунов, А.Ш. Колискор, А.Ф. Крайнев. – М.: Наука, 1991. – 95 с.
4. Исследование оптимальных конфигураций манипулятора-трипода с поворотным основанием [Текст] / В.М. Герасун, В.В. Жога, И.А. Несмиянов, Н.С. Воробьева, В.В. Дяшкин-Титов // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2013. – № 6. – С. 21-16.
5. Манипуляционные системы роботов [Текст] / А.И. Корендяев, Б.Л. Саламандра, Л.И. Тывес и др. – М.: Машиностроение, 1989. – 472 с.
6. О программных движениях манипулятора-трипода [Текст] /В.В. Жога, В.М. Герасун, И.А. Несмиянов, Н.С. Воробьева, В.В. Дяшкин-Титов // 6-я Всероссийская мультиконференция по проблемам управления: материалы мультиконференции. – Изд-во ЮФУ, 2013. – Т. 2. – С. 146-150.
7. Синтез программных движений манипулятора на основе пространственного механизма параллельной структуры с четырьмя поступательными парами [Текст] / В.М. Герасун, В.В. Жога, И.А. Несмиянов, Н.С. Воробьева, В.В. Дяшкин-Титов // Управление в технических, эргатических, организационных и сетевых системах (УТЭОСС-2012): материалы 5-й Российской мультиконференции по проблемам управления. – Санкт-Петербург, 2012. – С. 722-725.

E-mail: ivan_nesmiyanov@mail.ru