УДК 681.51

СТАБИЛИЗАЦИЯ ДВИЖЕНИЙ МАНИПУЛЯЦИОННЫХ РОБОТОВ С НЕПОЛНЫМ ИЗМЕРЕНИЕМ И С УЧЕТОМ УПРУГОСТИ ШАРНИРОВ

А.С. Андреев
Ульяновский государственный университет
Россия, 432017, Ульяновск, Л. Толстого ул., 42
E-mail: asa5208@mail.ru

О.А. Перегудова
Ульяновский государственный университет
Россия, 432017, Ульяновск, Л. Толстого ул., 42
E-mail: peregudovaoa@gmail.com

Ключевые слова: управление, робот манипулятор, упругий шарнир, неполное измерение, стабилизация, программное движение.

Аннотация: В докладе представлен новый подход к решению задачи о стабилизации программных движений роботов манипуляторов с вращательными упругими шарнирами на основе неполной обратной связи. Каскадная структура динамических моделей таких механических систем позволила применить рекурсивную процедуру метода бэкстеппинга для построения управления. С использованием метода векторной функции Ляпунова получена новая схема управления, в которой измеряются только положения роторов двигателей, а также координаты и скорости звеньев. Эта схема управления состоит из нелинейной части по обратной связи, части прямой связи, вычисленной вдоль программного движения, и слагаемого, содержащего переменные состояния динамического фильтра.

1. Введение

Задача построения управления движением манипуляционных роботов с учетом сил упругости в соединительных элементах звеньев является актуальной [3, 5]. Возникновение сил упругости обусловлено использованием кабелей, волновых приводов, ремней трансмиссии и т.д. Динамические модели роботов манипуляторов с упругими шарнирами имеют удвоенное число независимых переменных по сравнению с роботами с абсолютно жесткими шарнирами [15]. Кроме того, задача построения управления для стабилизации программных движений таких манипуляторов сложна из-за нелинейности и нестационарности уравнений движения.

Значительное количество исследований посвящено проблеме управления роботами манипуляторами с упругими шарнирами (см., например, обзор в [12]). Подход построения адаптивного управления был предложен [8] для роботов манипуляторов с гибкими сочленениями в предположении слабой эластичности шарниров с использованием теории сингулярных возмущений. В работе [10] предложена адаптивная схема управления независимо от значения гибкости сустава на основе подхода, использующего свойство пассивности системы. Благодаря использованию интегральных многообразий был получен [9] адаптивный закон управления для робота манипулятора с упругими шарнирами. Результаты управления, полученные в [8–10], предполагают полное измерение состояния роботов с упругими шарнирами, а именно входы управления рассчитываются с использованием положений и скоростей вала и двигателя. В работе [14] получен как регулятор плавного отслеживания выходного сигнала с динамической линеаризацией по обратной связи, так и схема управления переменной структуры для манипуляторов с гибкими сочленениями. Для определения глобальных контроллеров слежения [4] были применены три метода стабилизации, такие как схемы на основе декомпозиции, процедура метода бэкстеппинга и подход, основанный на свойстве пассивности системы. Отметим, что применение законов управления, предложенных в [4, 6, 11, 13], предполагают измерение положений звеньев, их скоростей, ускорений, производных от ускорений, а также скоростей роторов двигателей, что не является практически возможным. Поэтому важными являются исследования по построению управления манипуляторами с упругими шарнирами на основе неполной обратной связи. В работе [3] решена задача глобальной стабилизации программных движений роботов манипуляторов с упругими шарнирами с помощью измерения только положений звеньев и роторов на основе приближенного дифференцирования и построения наблюдателя Луенбергера. Задача робастного управления для класса роботов с гибкими шарнирами с учетом задержки по времени, на основе измерения положений, решена путем использования функционалов Ляпунова-Красовского и изменения процедуры метода бэкстеппинга в работе [5]. В работах [1, 2] задача о стабилизации программных движений роботов манипуляторов с упругими шарнирами на основе неполной обратной связи и применения метода бэкстеппинга с построением вектор-функции Ляпунова. При этом остается проблема упрощения структуры управления такими механическими системами.

Целью статьи является разработка закона управления, который будет обеспечивать стабилизацию программного движения робота манипулятора с гибкими соединениями с использованием только датчиков положения звеньев и роторов двигателей и тахометров для определения угловых скоростей звеньев.

2. Формулировка задачи

Рассмотрим модель многозвенного робота манипулятора с упругими шарнирами, определяемую в виде [7]

$$A(q)\ddot{q} + C(q,\dot{q})\dot{q} + g(q) + D(\dot{q} - \dot{Q}) + K(q - Q) + d(q,\dot{q}) = 0, \tag{1}$$

$$J\ddot{Q} + D(\dot{Q} - \dot{q}) + K(Q - q) = u, \tag{2}$$

где векторы $q \in R^n$ и $Q \in R^n$ представляют собой углы поворота звеньев манипулятора и роторов двигателей соответственно, $A(q) \in R^{n\times n}$ – матрица инерции звеньев, $J \in R^{n\times n}$ – диагональная матрица инерции роторов двигателей относительно осей соответствующих звеньев, $J = diag\{j_1, j_2, \ldots, j_n\} > 0$, кориолисовы и центробежные моменты описываются вектором $C(q,\dot q)\dot q$, функция $g(q)$ представляет собой гравитационные моменты, $D = diag\{d_1, d_2, \ldots, d_n\} > 0$ – матрица коэффициентов вязкого трения в шарнирах, $d(q,\dot q)$ – вектор вязкого трения для звеньев манипулятора, $K = diag\{k_1, k_2, \ldots, k_n\} > 0$ – матрица коэффициентов жесткости в шарнирах и $u \in R^n$ – входной крутящий момент.

Для модели робота (1), (2), определим множество X программных движений в виде

$$X = \{q^{(0)}(t) : [t_0, +\infty) \to R^n : \quad \|\dot q^{(0)}(t)\| \leqslant g_1, \quad \|\ddot q^{(0)}(t)\| \leqslant g_2\},$$

где функции $q^{(0)}(t)$ дифференцируемы по крайней мере дважды по t, g_i $(i = 1, 2)$ – некоторые положительные постоянные, $t_0 = const \geqslant 0$.

Предположим, что Q, q и $\dot q$ измеримы. Сформулируем задачу стабилизации программного движения робота (1), (2), как построение закона управления $u = u(t, Q, q, \dot q)$, обеспечивающего равномерную асимптотическую устойчивость движения $q^{(0)}(t) \in X$.

3. Решение задачи

Для динамической модели робота (1), (2) определим новый вектор состояния $(q, \dot q, S)^T$ и новое управление v следующим образом

$$S = D\dot Q + K(Q - q),$$

$$v = DJ^{-1}u + (DJ^{-1}D - K)\dot q + KD^{-1}Kq - KD^{-1}KQ.$$

Тогда получим уравнения состояния в виде

$$A(q)\ddot q + C(q,\dot q)\dot q + g(q) + D\dot q + d(q,\dot q) = S,$$

$$\dot S = (-DJ^{-1} + KD^{-1})S + v.$$

Пусть $q^{(0)}(t) \in X$ – заданное программное движение робота. Определим функцию $S^{(0)}(t)$ следующим образом

$$\begin{aligned} S^{(0)}(t) = A(q^{(0)}(t))\ddot q^{(0)}(t) + C(q^{(0)}(t), \dot q^{(0)}(t))\dot q^{(0)}(t) + \\ + g(q^{(0)}(t)) + D\dot q^{(0)}(t) + d(q^{(0)}(t), \dot q^{(0)}(t)). \end{aligned}$$

Введем отклонения

$$x = q - q^{(0)}(t), \quad \dot x = \dot q - \dot q^{(0)}(t), \quad y = S - S^{(0)}(t).$$

Тогда динамические уравнения в отклонениях примут вид

$$\begin{aligned} &A^{(1)}(t,x)\ddot x + C^{(1)}(t, x, 2\dot q^{(0)}(t) + \dot x)\dot x + R_1(t,x) + R_2(t,x,\dot x) = y, \\ &\dot y = (-DJ^{-1} + KD^{-1})y + v^{(1)}, \end{aligned}$$

где $A^{(1)}(t,x) = A(q^{(0)}(t) + x)$, $C^{(1)}(t,x,\dot x) = C(q^{(0)}(t) + x, \dot x)$, $R_1(t,x) = (A(q^{(0)}(t) + x) - A(q^{(0)}(t)))\ddot q^{(0)}(t) + (C^{(1)}(t,x,\dot q^{(0)}(t)) - C^{(1)}(t,0,\dot q^{(0)}(t)))\dot q^{(0)}(t) + g(q^{(0)}(t) + x) - g(q^{(0)}(t)) +$

$d(x+q^{(0)}(t),\dot q^{(0)}(t))-d(q^{(0)}(t),\dot q^{(0)}(t))$, $R_2(t,x,\dot x))=D\dot x+d(x+q^{(0)}(t),\dot x+\dot q^{(0)}(t))-d(x+q^{(0)}(t),\dot q^{(0)}(t))$ и

$$v^{(1)}=v-\dot S^{(0)}(t)+(DJ^{-1}-KD^{-1})S^{(0)}(t). \tag{3}$$

Предположим, что функции $R_1(t,x)$ и $R_2(t,x,\dot x)$ имеют вид

$$R_1(t,x)=F(t,x)p(x),\quad R_2(t,x,\dot x)=D^{(1)}(t,x,\dot x)\dot x,$$

где $F\in R^{n\times n}$, $D^{(1)}\in R^{n\times n}$ – некоторая положительно определенная матрица, вектор-функция $p:R^n\to R^n$ ограничена, непрерывно дифференцируема и такова, что $p(x)=(p_1(x_1),p_2(x_2),\dots,p_n(x_n))^T$, $p(0)=0$, а также выполнены следующие условия

a) $|p_i(x_i)|$ периодическая функция с периодом 2π $\forall x_i\in R$; $p_i(2\pi k)=0$, $|p_i(x_i)|>0$ $\forall x_i\neq 2\pi k$ $(i=1,2,\dots,n)$ $\forall k\in Z$;

b) функция $r(x)=(r_1(x_1),r_2(x_2),\dots r_n(x_n))^T$, определяемая в виде

$$r_i(x_i)=\int\limits_0^{x_i}p_i(x_i)dx_i\quad \forall x_i\in R,\ i=1,2,\dots,n$$

ограничена, непрерывно дифференцируема и такова, что $r_i(x_i)$ – периодическая функция с периодом 4π $\forall x_i\in R$; $r_i(4\pi k)=0$, $r_i(x_i)>0$ $\forall x_i\neq 4\pi k$ $\forall k\in Z$, $i=1,2,\dots,n$.

Теорема 1. *Пусть найдутся матрицы $B_1,B_2\in R^{n\times n}$ и положительные постоянные a, b, c, α, β, δ, δ_i $(i=1,2,3)$, такие, что выполняются неравенства:*

$$\begin{aligned}
&lgn\|-\alpha abA^{(1)}(t,x)+C^{(1)}(t,x,\beta p(x)+\dot q^{(0)}(t))-D^{(1)}(t,x,\dot x)+\\
&+\beta\tfrac{\partial p(x)}{\partial x}A^{(1)}(t,x)\|\leqslant-\delta_1,\\
&\|\beta C^{(1)}(t,x,2\dot q^{(0)}(t)-\beta p(x))+\beta D^{(1)}(t,x,\dot x)+\\
&+\alpha a(\beta b-c)A^{(1)}(t,x)+hE-\beta^2A^{(1)}(t,x)\tfrac{\partial p(x)}{\partial x}-F^T(t,x)-B_1\|\leqslant 2\delta_2,\\
&\|\alpha C^{(1)}(t,x,2\dot q^{(0)}(t)-\dot x-\beta p(x))+\alpha D^{(1)}(t,x,\dot x)+\\
&+\alpha a(\alpha b-1)A^{(1)}(t,x)+hE-\alpha\beta A^{(1)}(t,x)\tfrac{\partial p(x)}{\partial x}-abE-B_2\|\leqslant 2\delta_3,\\
&\forall\dot x\in R^n:\|\dot x\|<\delta,\\
&d_i^2-k_ij_i>0\quad\forall i=1,2,\dots,n,
\end{aligned}$$

где $h=a(c-\beta b)/\alpha$.

Пусть также матрица

$$\begin{pmatrix}-\delta_1&\delta_2&\delta_3\\ \delta_2&-\beta h&0\\ \delta_3&0&-a(1-\alpha b)\end{pmatrix}$$

отрицательно определенная.

Тогда управление вида

$$\begin{aligned}
&u=JD^{-1}v^{(1)}+JD^{-1}\dot S^{(0)}(t)+(JKD^{-2}-E)S^{(0)}(t)+\\
&+(JD^{-1}K-D)\dot q-JK^2D^{-2}q+JK^2D^{-2}Q,\\
&v^{(1)}=(-DJ^{-1}+KD^{-1})(B_1p(x)+B_2w)-B_1\dot x^T\tfrac{\partial p(x)}{\partial x}+aB_2(w+b\dot x+cp(x)),\\
&\dot w=-a(w+b\dot x+cp(x))
\end{aligned}\tag{4}$$

обеспечивает равномерную асимптотическую устойчивость программного движения $q^{(0)}(t)$ робота (1), (2).

Основным отличием полученного результата от работ [1,2] является то, что найденный закон управления не требует установки акселерометров для звеньев манипулятора.

4. Заключение

В работе получены новые условия стабилизации программного движения многозвенного манипулятора с упругими шарнирами. Построен закон управления по динамической обратной связи по выходу, требующий измерения только угловых координат звеньев и роторов двигателей, а также угловых скоростей звеньев. Задача решена на основе процедуры метода бэкстеппинга и применения вектор-функции Ляпунова.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (18-41-730022р-а) и Министерства науки и высшего образования РФ (9.5994.2017/БЧ).

Список литературы

1. Andreev A., Peregudova O. On Position Stabilization and Trajectory Tracking Control for Robot Manipulators with Flexible Joints // 8th ECCOMAS Thematic Conference on Multibody Dynamics. Prague, Czech Republic, 19-22 June 2017. 2017. P. 501-510.
2. Andreev A.S., Peregudova O.A., Sobolev A.A. On global trajectory tracking control of robot manipulators with flexible joints // IFAC-PapersOnLine. 2018. Vol. 51, No. 32. P. 28-33.
3. Avila-Becerril S., Loria A., and Panteley E. Global position-feedback tracking control of flexible-joint robots // IEEE American Control Conference. July 2016, Boston, MA, United States. 2016.
4. Brogliato B., Ortega R., Lozano R. Global tracking controllers for flexible-joint manipulators: a comparative study // Automatica. 1995. Vol. 31, No. 7. P. 941-956.
5. Chang Y.C., Wu M.F. Robust tracking control for a class of flexible-joint time-delay robots using only position measurements // International Journal of Systems Science. 2016. Vol. 47, No. 14. P. 3336-3349.
6. De Luca A., Siciliano B., Zollo L. PD control with on-line gravity compensation for robots with elastic joints: Theory and experiments // Automatica. 2005. Vol. 41. P. 1809-1819.
7. De Luca A., Schroder D., Thummel M. An acceleration-based state observer for robot manipulators with elastic joints // 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation. 2007. P. 3817-3823.
8. Ghorbel F., Hung J.Y., Spong M.W. Adaptive control of flexible-joint manipulators // IEEE Control Systems Magazine. 1989. Vol. 9, No. 13.
9. Ghorbel F., Spong M.W. Adaptive Integral Manifold Control of Flexible Joint Robot Manipulators // Proceedings of the 1992 IEEE International Conference on Robotics and Automation. 1992. P. 707-714.
10. Lozano R., Brogliato B. Adaptive control of robot manipulators with flexible joints // IEEE Transactions on Automatic Control. 1992. Vol. 37, No. 2. P. 174-181.
11. Moberg S. On modeling and control of flexible manipulators. Linkoping: Linkoping University, 2007.
12. Ozgoli S., Taghirad H.D. A survey on the control of flexible joint robots // Asian Journal of Control. 2006. Vol. 8, No. 4. P. 1-15.
13. Palli G., Melchiorri C., De Luca A. On the feedback linearization of robots with variable joint stiffness // IEEE International Conference on Robotics and Automation. 2008. P. 1753-1759.
14. Sira-Ramirez H., Ahmad S., Zribi M. Dynamical feedback control of robotic manipulators with joint flexibility // IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics. 1992. Vol. 22, No. 4. P. 736-747.
15. Spong M.W. Control of flexible joint robots: a survey. (Rep. UILU-ENG-90-2203, DC-116, Coordinated Science Laboratory). University of Illinois at Urbana-Champaign, February, 1990.