

УДК 681.51

О СТАБИЛИЗАЦИИ ДВИЖЕНИЙ АНТРОПОМОРФНОЙ РУКИ РОБОТА

Е.В. Дороговцева

Ульяновский государственный университет
Россия, 432000, Ульяновск, Л. Толстого ул., 42
E-mail: dorogovtsevaev@mail.ru

Е.А. Сутыркина

Ульяновский государственный университет
Россия, 432000, Ульяновск, Л. Толстого ул., 42
E-mail: katherine.kudashova@yandex.ru

Ключевые слова: антропоморфная рука робота, стабилизация движения, синтез управления.

Аннотация: Рассматривается задача об управлении движением антропоморфной руки робота с тремя степенями свободы. Решаются задачи о робастной стабилизации произвольного положения руки без измерения ее угловых скоростей и глобального отслеживания траектории руки робота посредством построения непрерывного и дискретного законов управления. Решение достигается применением новых методов исследования задач об устойчивости интегро-дифференциальных и дискретных уравнений типа Вольтерра и отслеживании траектории голономной механической системы.

1. Введение

Дальнейшее интенсивное развитие техники и производства предъявляет повышенные требования к работе робототехнических систем. Поэтому, несмотря на многочисленные исследования по разработке математических методов конструирования структур управления такими системами, проводимые с 60-х годов прошлого века, такие исследования остаются актуальными. К числу актуальных задач относятся работы по управлению манипуляторами без измерения скоростей [1, 2, 4–9], по построению управления, стабилизирующего заданное программное движение робота, в нелокальной нестационарной постановке [2, 9].

Целью настоящей работы является решение задачи о стабилизации движения антропоморфной руки робота в нелинейной нестационарной постановке, в том числе, при измерении только угловых координат ее положения.

2. Решение задачи о стабилизации заданного положения и программного движения

Рассмотрим математическую модель антропоморфной руки робота, изображенной на рис. 1.

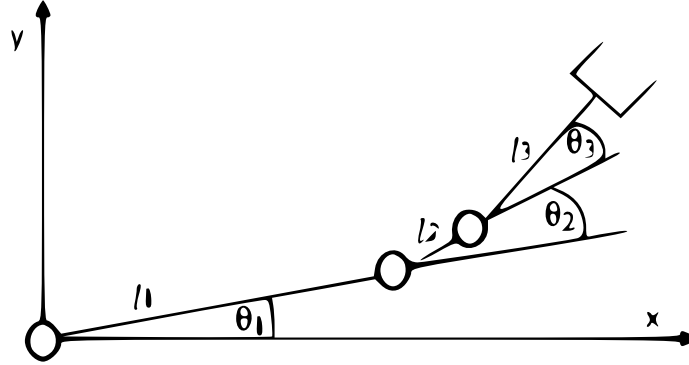


Рис. 1. Антропоморфная рука робота

Рука моделируется в виде трех массовых стержней, соединенных шарнирами, шарнир O_1 закреплен. Положим, что движение происходит в вертикальной плоскости, положение системы определяется углами поворотов θ_1 первого стержня по отношению к некоторой оси O_1x , двух других – углами θ_2, θ_3 относительно предыдущего стержня. Длины стержней – l_1, l_2, l_3 , положения центров масс определяется длинами l_{c1}, l_{c2}, l_{c3} , моменты инерции каждого стержня относительно его центра масс есть I_1, I_2, I_3 .

Составим уравнения движения системы в векторно-матричном виде в форме Лагранжа

$$A(\theta)\ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} = M + U,$$

где $\theta = (\theta_1, \theta_2, \theta_3)'$ – вектор угловых координат стержней, $A(\theta) \in R^{3 \times 3}$ – матрица инерции, $C(\theta, \dot{\theta})$ – матрица кориолисовых и центробежных сил инерции, $M \in R^3$ – вектор моментов внешних сил, действующих на систему (гравитационных, диссипативных и т.д.), $U \in R^3$ – вектор управляющих сил.

Пусть $(\theta_1^0, \theta_2^0, \theta_3^0)$ – любое заданное положение руки робота. Положим

$$U_i = M_i - k_i \sin \frac{x_i(t)}{2} - p_i \int_0^t e^{s_i(\tau-t)} \sin \frac{x_i(\tau)}{2} d\tau, \quad i = \overline{1, 3}, \quad x_i = \theta_i - \theta_i^0$$

$$\begin{aligned} M_1 &= g(m_1 l_{c1} + m_2 l_1 + m_3 l_1) \cos \theta_1^0 \cos x_1 + \\ &+ g(m_2 l_{c2} + m_3 l_2) \cos(\theta_1^0 + \theta_2^0) \cos(x_1 + x_2) + \\ &+ m_3 g l_{c3} \cos(\theta_1^0 + \theta_2^0 + \theta_3^0) \cos(x_1 + x_2 + x_3), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_2 &= g(m_2 l_{c2} + m_3 l_2) \cos(\theta_1^0 + \theta_2^0) \cos(x_1 + x_2) + \\ &+ m_3 g l_{c3} \cos(\theta_1^0 + \theta_2^0 + \theta_3^0) \cos(x_1 + x_2 + x_3), \end{aligned}$$

$$M_3 = m_3 g l_{c3} \cos(\theta_1^0 + \theta_2^0 + \theta_3^0) \cos(x_1 + x_2 + x_3),$$

$$k_1 > g(m_1 l_{c1} + m_2(l_1 + l_{c2}) + m_3(l_1 + l_2 + l_{c3})) + \frac{p_1}{s_1},$$

$$k_2 > g(m_2 l_{c2} + m_3(l_2 + l_{c3})) + \frac{p_2}{s_2}, \quad k_3 > gm_3 l_{c3} + \frac{p_3}{s_3}, \quad p_j, s_j > 0 \quad (j = \overline{1,3})$$

На основании работ [7, 8] можно утверждать, что это управление обеспечивает нелокальную стабилизацию любого заданного положения $(\theta_1^0, \theta_2^0, \theta_3^0)$ системы. Численное моделирование движения роботизированной антропоморфной руки для положения $\theta = 0$ при действии указанного управления проводилось при следующих параметрах:

$$I_1 = 0.12 \text{ кг} \cdot \text{м}^2, \quad I_2 = 0.12 \text{ кг} \cdot \text{м}^2, \quad I_3 = 0.12 \text{ кг} \cdot \text{м}^2,$$

$$m_1 = 2.5 \text{ кг}, \quad m_2 = 15 \text{ кг}, \quad m_3 = 2 \text{ кг},$$

$$l_1 = 0.5 \text{ м}, \quad l_2 = 0.1 \text{ м}, \quad l_3 = 0.5 \text{ м}, \quad l_{c1} = 0.2 \text{ м}, \quad l_{c2} = 0.05 \text{ м}, \quad l_{c3} = 0.5 \text{ м},$$

$$s_1 = s_2 = s_3 = 2, \quad p_1 = p_2 = p_3 = 220.$$

На рис. 2 показаны результаты численного моделирования. Видно, что происходит стабилизация заданного положения руки практически в течение 10 секунд.

Далее в работе показано, что наличие полной диссипации (даже малой) позволяет достичь этого результата также посредством релейного дискретного управления вида

$$U_i = M_i(x_1(nT), x_2(nT), x_3(nT)) - k_i \sin(nT),$$

$n \in \mathbb{Z}^+$, T – шаг дискретизации, определяемый эффектом диссипации.

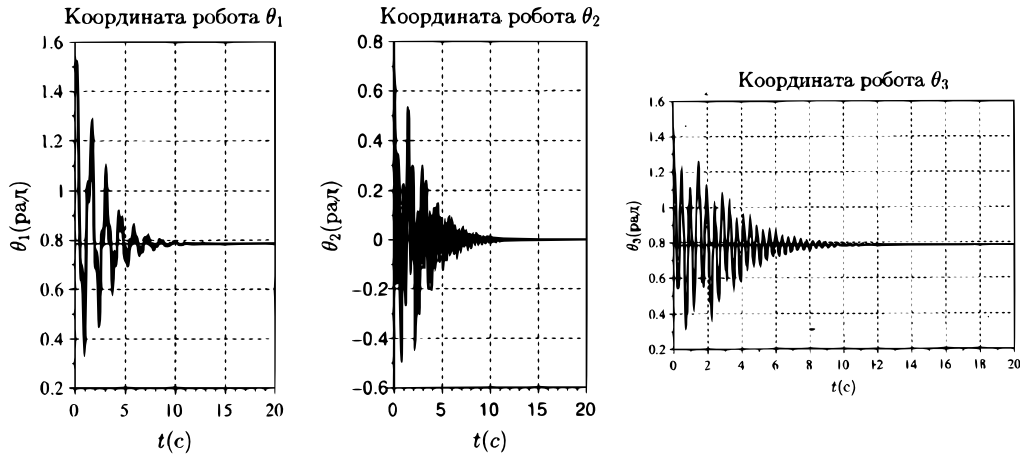


Рис. 2. Стабилизация заданного положения $\theta = 0$

Пусть $(\theta_1^0(t), \theta_2^0(t), \theta_3^0(t))$ – какое-либо программное движение робота, реализуемое управлением

$$U^0(t) = A(\theta(t))\ddot{\theta}_0(t) + C(\theta_0(t), \dot{\theta}_0(t))\dot{\theta}_0(t) - M(\theta_0(t)).$$

Введем возмущения $x = \theta - \theta^0(t)$, $\dot{x} = \dot{\theta} - \dot{\theta}^0(t)$.

На основании работы [4] можно найти, что управляющее воздействие

$$U = U^0(t) + B(\dot{x} + p(x)), \quad p(x) = \left(\sin \frac{x_1}{2}, \sin \frac{x_2}{2}, \sin \frac{x_3}{2} \right)'$$

является стабилизирующим, где $B \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ – матрица коэффициентов усиления.

На рис. 3 показаны результаты численного моделирования движения роботизированной антропоморфной руки для отслеживаемой траектории

$$\theta_1^0 = 0.2t \text{ рад.}, \quad \theta_2^0 = 1.5 + \sin(0.5t) \text{ рад.}, \quad \theta_3^0 = 0.5 \sin(0.5t) \text{ рад.}$$

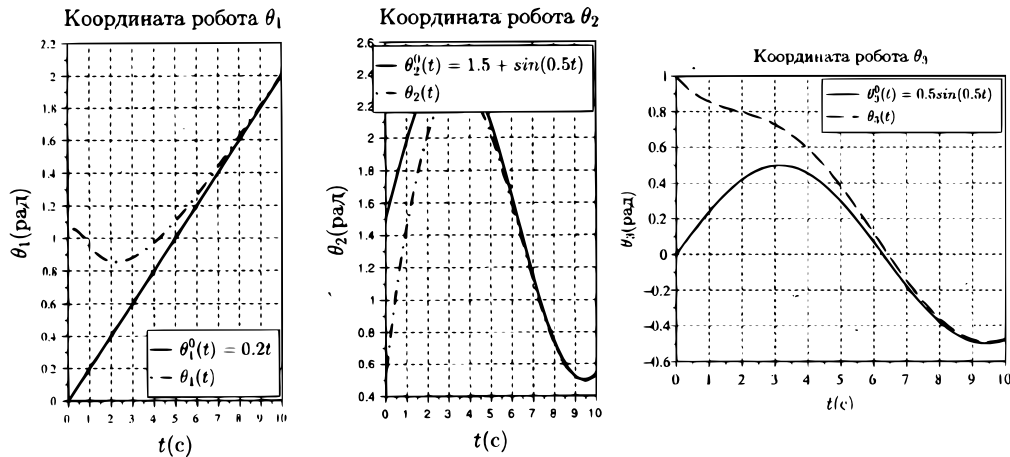


Рис. 3. Стабилизация программного движения робота $\theta^0(t)$

Результаты работы [3] позволяют утверждать, что аналогичный результат имеет место при дискретном управлении.

3. Заключение

В работе представлено решение задачи о стабилизации заданного положения антропоморфной руки робота ограниченным управлением без измерения угловых скоростей. Дано решение задачи о глобальном отслеживании траектории руки робота и проведен численный анализ. Показано, что аналогичные условия стабилизируемости имеют место при использовании метода дискретной аппроксимации.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания по НИР (проект 9.5994.2017/БЧ) и Российского фонда фундаментальных исследований (проект 18-41-730022р-а).

Список литературы

1. Андреев А.С., Перегудова О.А. О стабилизации программных движений голономной механической системы без измерения скоростей // Прикладная математика и механика. 2017. Т. 81, Вып. 2. С. 137-153.
2. Андреев А.С., Перегудова О.А. Нелинейные регуляторы в задаче о стабилизации положения голономной механической системы // Прикладная математика и механика. 2018. Т. 82, Вып. 2. С. 156-1576.
3. Андреев А.С., Сутыркина Е.А. Об устойчивости нелинейных дискретных уравнений Вольтерра // Научно-технический вестник Поволжья. 2018. Вып. 11. С. 13-16.

4. Andreev A.S., Peregudova O.A. Trajectory tracking control for robot manipulators using only position measurements // International Journal of Control. 2017.
5. Bartolini G., Pisano A. Global output-feedback tracking control and load disturbance rejection for electrically-driven robotic manipulators with uncertain dynamics // International Journal of Control. 2003. Vol. 76, No. 12. P. 1201-1213.
6. Burkov I.V. Stabilization of mechanical systems via bounded control and without velocity measurements // 3rd Russian-Swedish Control Conference. St. Petersburg, Russia. 1995. P. 37-41.
7. Dixon W.E., Zergelolu E., Dawson D.M. Global robust output feedback tracking control of robot manipulators // Robotica. 2004. Vol. 22. P. 351-457.
8. Moreno-Valenzuela J., Santibanez V., Campa R. On output feedback tracking control of robot manipulators with bounded torque input // International Journal of Control, Automation and Systems. 2008. Vol. 6. No. 1. P. 76-85.
9. Nicosia S., Tomei P. Robot control by using only position measurements // IEEE Transactions on Automatic Control. 1990. Vol. 35, No. 9. P. 1058-1061.