

К. АРТЕМОВ, С. А. КОЛЮБИН
 Университет ИТМО, Санкт-Петербург

УПРАВЛЕНИЕ КОЛЛАБОРАТИВНЫМИ РОБОТАМИ В ДИНАМИЧЕСКОМ ОКРУЖЕНИИ ПО ДАННЫМ СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ

В докладе рассматривается задача планирования траекторий и управления движением для коллаборативных манипуляционных роботов в динамическом окружении по данным системы технического зрения. Ключевым результатом является алгоритм планирования траектории и управления движением в реальном времени на основе метода потенциальных полей в условиях действия на робота внешних сил. Апробация полученных результатов проводилась посредством компьютерного моделирования на примере манипулятора KUKA iiwa.

Введение. Коллаборативные роботы предназначены для работы совместно с людьми. Соответственно, для них актуальной является задача безопасного функционирования с избеганием столкновений с препятствиями в динамическом окружении, что требует от системы управления робота возможности планирования траектории движения в режиме реального времени, а также использование регуляторов по импедансу на основе данных различных сенсоров.

Предлагаемое в докладе решение опирается на результаты, представленные в работах [1] и [2]. В работе [1] был предложен метод управления с использованием компьютерного зрения, в работе [2] – метод планирования траектории на основе потенциальных полей. Основной результат представляемой работы заключается в интеграции метода визуального сервоуправления и планирования траектории с регулятором по импедансу в рамках единой системы управления. Метод синтеза динамических регуляторов совместно с методом визуального управления был представлен в [3]. Таким образом, обеспечивается следование рабочего инструмента манипуляционного робота за целевым объектом, находящимся в поле зрения установленной на нем видеокамеры, с отклонением от рассчитанной траектории движения пропорционально внешнему силовому воздействию.

Постановка задачи. Требуется управлять коллаборативным манипуляционным роботом с избыточным количеством степеней свободы и закрепленной на его последнем звене видеокамерой, в условиях, когда в рабочем пространстве робота возможны неизвестные стационарные и подвижные препятствия.

Математическая модель объекта управления имеет вид

$$M(q)\ddot{q} + N(q, \dot{q}) + J^T(q)f_{ext} = u, \quad (1)$$

где $M(q)$ – матрица инерции робота, $N(q, \dot{q}) = C(q, \dot{q}) + g(q) + h(q, \dot{q})$, $C(q, \dot{q})$ – матрица кориолисовых и центробежных сил, $g(q)$ – вектор гравитации, $h(q, \dot{q})$ – вектор сил трения, $f_{ext} \in \mathbb{R}^6$ – вектор внешних сил и моментов, действующих на рабочий орган манипулятора, u – вектор управляющих воздействий, q, \dot{q}, \ddot{q} – векторы обобщенных координат, скоростей и ускорений, $J(q)$ – матрица Якоби манипуляционного робота, выраженная относительно рабочего инструмента. Внешняя сила f_{ext} может быть измерена посредством датчика силы либо получена ее оценка на основе измерений моментов в сочленениях.

Цель управления задается в виде

$$\|e(t, f_{ext})\| \leq k\Delta(f_{ext}), \quad \text{для } t > T, \quad (2)$$

где $e(t, f_{ext}) = x_f(t, f_{ext}) - x(t)$ – отклонение пространственного положения рабочего инструмента робота от желаемой траектории движения, $x(t) \in \mathbb{R}^6$, $x_f(t, f_{ext}) \in \mathbb{R}^6$ – текущее и желаемое положение рабочего инструмента робота, область сходимости $\Delta(f_{ext})$ пропорциональна действию внешней силы и задаваемый разработчиком постоянный коэффициент $k > 0$, T – время переходного процесса.

Основной результат. В соответствии с [4] и с учетом f_{ext} цель управления (2) может быть обеспечена регулятором следующего вида

$$u = \hat{M}(q)\alpha + \hat{C}(q, \dot{q})\dot{q} + \hat{g}(q) + [\hat{M}(q)J^{-1}(q)K_M^{-1} - J^T(q)]f_{ext}, \quad (3)$$

где $\alpha = J^{-1}(q) \left[\dot{x}_f^* - \dot{J}\dot{x} - K_M^{-1} \left(K_D(\dot{x}_f - \dot{x}) + K_P(x_f - x) \right) \right]$ учитывает результаты расчета желаемой траектории инструмента x_f, \dot{x}_f и \ddot{x}_f на основе метода потенциальных полей, а за счет

выбора диагональных матриц коэффициентов K_M, K_D, K_P можно варьировать податливую реакцию на внешние воздействия, \hat{M}, \hat{C} и \hat{g} – оценки соответствующих матриц динамической модели (1), \dot{J} – первая производная матрицы Якоби манипуляционного робота.

Планирование траектории. Планирование траектории с учетом возможных препятствий реализуется с использованием метода, основанного на потенциальных полях, где виртуальная сила складывается из притягивающей f_a и отталкивающей f_r компонент

$$f(x_f, x^*, x_0) = f_a(x_f, x^*) + \sum_k f_{r_k}(x_f, x_{0_k}). \quad (4)$$

Запишем уравнение, описывающее динамику препятствий и цели, в виде дифференциального уравнения масса-пружина-демпфер с учетом действия внешних сил

$$M_v \ddot{x}_f + K_v(x^* - x_f) + D_v \dot{x}_f + K_e f_{ext} = f_r(x_f), \quad (5)$$

где матрицы K_v и D_v – диагональные положительно определенные матрицы.

Целевой вектор положения x^* рабочего инструмента в (5), в соответствии с методом визуального сервоуправления, рассчитывается из

$$\dot{x}^* = -\lambda(LV)^+(s - s^*), \quad (6)$$

где $s \in \mathbb{R}^{2m}$ и $s^* \in \mathbb{R}^{2m}$ – векторы текущего и желаемого положения подвижной цели в пространстве изображения видеокамеры, m – количество визуальных признаков целевого объекта, L – матрица Якоби для камеры, V – матрица преобразования скорости из системы координат камеры в систему координат рабочего инструмента, λ – положительный коэффициент.

Интегрируя (5) и выражая переменную x_f , получим желаемую траекторию движения манипуляционного робота на каждом интервале времени $t \in [t_k, t_l]$

$$x_f(t_l) = x_f(t_k) + \iint_{t_k}^{t_l} M_v^{-1}(f_r - K_v(x^* - x_f) - D_v \dot{x}_f) dt + \dot{x}_f(t_k) dt. \quad (7)$$

Для реализации алгоритма планирования траектории, необходимо учесть ограничения на скорость движения вблизи препятствий, которые могут быть заданы в форме

$$\dot{x}_f(e_f) = \begin{cases} 0.5(v - \delta) \left(1 - \cos\left(\frac{e_f}{c_1} \pi\right) \right) + \delta, & e_f \geq c_1 \text{ и } e_f < c_2 \\ v_f, & e_f < c_1 \\ 0.5(v - \delta) \left(1 - \cos\left(\frac{e_f - c_2}{1 - c_2} \pi\right) \right) + \delta, & e_f > c_2 \text{ и } e_f < (1 - \delta) \\ 0, & \text{иначе} \end{cases} \quad (8)$$

где v – максимально допустимая скорость, константы c_1 и c_2 задают границы разгона и торможения, нормализованное расстояние на текущем участке траектории

$$e_f = \frac{x_f - x^*}{\|x_0 - x_f\| + \|x_f - x^*\|}. \quad (9)$$

Отсюда видно, что при возникновении физического либо виртуального контакта, алгоритм обеспечивает торможение с одновременным смещением рабочего инструмента манипулятора в направлении общего вектора силы отталкивания f_r и вектора скорости \dot{x}_f . Направление этого вектора определяется в зависимости от типа взаимодействия. Для случая виртуального взаимодействия, угол между векторами силы и скоростью движения рассчитывается из

$$\varphi = \arccos \frac{-f_r \times \dot{x}_f}{\|f_{ext}\| \|\dot{x}_f\|}. \quad (10)$$

Также, при приближении к препятствию, одновременно с изменением направления движения необходимо уменьшать скорость, введя для нее коэффициент масштабирования

$$k_{v, \dot{x}_f}(\varphi) = \begin{cases} 1 - k_\alpha \frac{\cos(\varphi\pi) + 1}{2}, & \text{Если } \varphi \in [-\pi, \pi] \\ 1 \end{cases} \quad (11)$$

где, в свою очередь, для обеспечения плавности изменения скорости

$$k_\alpha = \begin{cases} A \left(\frac{1 - \cos\left(\frac{\|f_r\|}{f_{max}} \pi\right)}{2} \right), & \text{Если } \|f_r\| \leq f_{max}, \\ A \end{cases} \quad (12)$$

где f_{max} – коэффициент затухания, A – положительный параметр.

Для случая реального физического взаимодействия вводится монотонно убывающая функцию, которая имеет минимум, если векторы силы и скорости движения направлены в противоположные стороны и максимум, когда направления совпадают, тогда масштабирующий коэффициент имеет вид

$$k_{v,e} = g(f_{ext}, \dot{x}_f) \quad (13)$$

Таким образом, масштабирующая функция для скорости

$$k_v = \min\{k_{v,e}, k_{v,\dot{x}^*}\} \quad (14)$$

Более высокие значения коэффициентов матрицы K_v могут обеспечить более быструю сходимость к заданной точке траектории, в то время как уменьшение коэффициентов ведет к более податливому движению, что является преимуществом при физическом взаимодействии робота манипулятора с объектами в его рабочем пространстве. Достичь такого поведения системы возможно введя переменную матрицу коэффициентов, которые зависят от нормализованного расстояния до цели

$$K_v(e_f) = \max\{K_{v,max}(1 - e_d)K_{v,min}\} \quad (15)$$

Результаты моделирования. Представленный алгоритм был реализован в программной среде Matlab/Simulink с использованием параметров робота KUKA LBR iiwa. Моделирование робота манипулятора производилось с использованием рекурсивного метода Ньютона-Эйлера. Параметры алгоритмов приведены ниже:

$$K_M = 0.01I_{7 \times 7}, K_D = 5I_{7 \times 7}, K_P = 10I_{7 \times 7}, \quad (16)$$

$$M_v = 0.01I_{6 \times 6}, D_v = 10I_{6 \times 6}, K_v = 20I_{6 \times 6}, \quad (17)$$

где $I_{n \times n}$ – диагональная единичная матрица, начальная конфигурация робота

$$q_0 = [0 \quad -0.78540 \quad 1.57080 \quad 0.7854 \quad -1.5708], \quad (18)$$

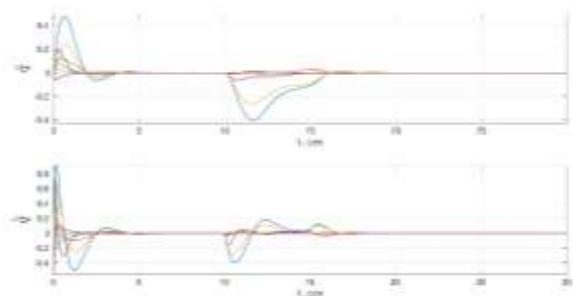


Рис. 1. Ошибка управления в конфигурационном пространстве

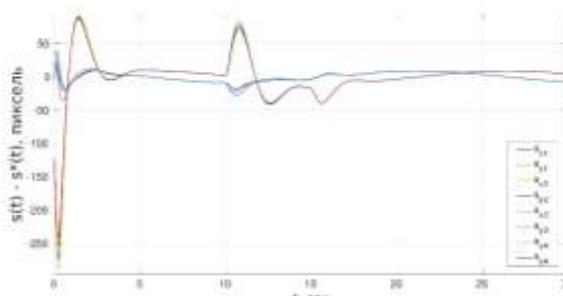


Рис. 2. Ошибка управления в пространстве изображения

Заключение. В докладе был представлен алгоритм планирования траектории в реальном времени для коллаборативного робота на основе метода потенциальных полей и с использованием управления по импедансу. Результаты моделирования (рис. 1–2) показывают, что представленный алгоритм планирования траектории и управления движением обеспечивает достижения цели управления (2) в условиях действия на робота внешних сил. Приложение предлагаемого алгоритма видится в задачах, где рабочему инструменту манипуляционного робота необходимо следить за некоторой подвижной целью, например, за деталями на вращающемся или линейном конвейере в процессе их захвата.

Работа проводилась при поддержке гранта РФФ No17-79-20341

ЛИТЕРАТУРА

1. **Chaumette F., Hutchinson S.**, Visual servo control. i. basic approaches. IEEE Robotics & Automation Magazine. 2006. Vol. 13. № 4. P. 82–90.
2. **Haddadin S., Urbanek H., Parusel S., Burschka D., Roßmann J., AlbuSchaffer A., Hirzinger G.** Real-time reactive motion generation based on variable attractor dynamics and shaped velocities. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. 2010. P. 3109–3116.
3. **Artemov K., Kolyubin S.** Design and Validation of Two-Stage Motion Control System for By-Air Quantum Key Distribution. Regular and Chaotic Dynamics. 2020 (принята)

4. Vanderborcht B., Albu-Schaffer A., Bicchi A., Burdet E., Caldwell D.G., Carloni R., Catalano M., Eiberger O., Friedl W., Ganesh G., et al. Variable impedance actuators: A review. Robotics and autonomous systems. 2013. Vol. 61. № 12. P. 1601–1614.

K. Artemov, S. Kolyubin, (ITMO University, Saint Petersburg)

Control of Collaborative Robots in a Dynamic Environment According to the Data of the Technical Vision System

The report examines the problem of trajectory planning and motion control for collaborative manipulation robots in a dynamic environment based on the data of the computer vision system. The key result is the algorithm for trajectory planning and motion control in real time based on the method of potential fields in conditions of external forces acting on the robot. The obtained results were tested by means of computer simulation using the example of the KUKA iiwa manipulator.