

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ РОБОТИЗИРОВАННОГО КОМПЛЕКСА
ДЛЯ ОКРАСКИ КРУПНОГАБАРИТНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ
КОНСТРУКЦИЙ**

**DESIGNING A ROBOTIC COMPLEX
FOR PAINTING LARGE-SIZED METAL STRUCTURES**

Кодацкая А.С., студент

Грибанов А.А., к.т.н., доцент

Мещерякова А.А., к.т.н., доцент

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет
имени Г.Ф. Морозова»

г. Воронеж, Россия

vgltaapp@mail.ru

Kodatskaya A.S., Student

Gribanov A.A., CSc (Engineering), Associate Professor

Meshcheryakova A.A., CSc (Engineering), Associate Professor

FSBEI HE «Voronezh State University of Forestry and Technologies
named after G.F. Morozov»

Voronezh, Russian Federation

Аннотация: Статья посвящена проектированию роботизированного комплекса для окраски крупногабаритных металлических конструкций с использованием промышленного робота KUKA KR6 900. Рассматриваются методы решения прямой и обратной кинематических задач на основе параметров Денавита-Хартенберга, а также алгоритмы оптимизации траекторий движения для минимизации расхода материалов и повышения качества покрытия.

Summary: The article is devoted to the design of a robotic complex for painting large-sized metal structures using the industrial robot KUKA KR6 900. The methods of solving forward and inverse kinematic problems based on Denavit-Hartenberg parameters, as well as algorithms for optimizing motion trajectories to minimize material consumption and improve coating quality are considered.

Ключевые слова: роботизированная окраска, крупногабаритные конструкции, параметры Денавита-Хартенберга, прямая и обратная кинематика, KUKA KR6 900.

Keywords: robotic painting, large structures, Denavit-Hartenberg parameters, forward and reverse kinematics, KUKA KR6 900.

Автоматизация технологических процессов с использованием роботизированных систем играет ключевую роль в повышении эффективности производства, снижении брака и улучшении условий труда. Одним из таких процессов является окраска сложных конструкций, требующая высокой точности и равномерности нанесения покрытия [1]. Промышленные роботы позволяют реализовать сложные траектории движения рабочего органа, обеспечивая оптимальное распределение лакокрасочного материала. Однако разработка и отладка управляющих программ для таких роботов требует предварительного моделирования и анализа траекторий. В связи с этим создание симулятора окраски детали, с возможностью расчёта траектории и визуализации движения рабочего органа, является актуальной задачей.

Реализация проекта позволит не только получить теоретические результаты по моделированию движения робота, но и создать инструмент для предварительного тестирования управляющих алгоритмов без необходимости использования реального производственного оборудования.

Известно, что лакокрасочные материалы наносят на поверхность изделий различными методами: пневматическим распылением, распылением под высоким давлением, распылением в электрическом поле, аэрозольным распылением, электроосаждением, струйным обливом, окунанием, наливом, вальками, в барабанах, кистью и шпателем, и самым передовым методом – порошковой покраской [2-3].

Недостатки традиционных методов окраски при обработке мостовых конструкций связаны с их ограниченной гибкостью и эффективностью, что особенно критично для сложных форм, больших размеров и требований к качеству покрытия. Например, безвоздушное распыление не позволяет регулировать ширину факела, что приводит к избыточному расходу материалов и непригодности для деталей нестандартной формы или малого размера. Кроме того, высокое давление во время работы ускоряет износ оборудования и требует значительных затрат на обслуживание, что делает метод экономически нецелесообразным для масштабных проектов.

В связи с этим следует отметить, что роботизированное окрашивание – это оптимальный выбор для мостовых конструкций. Роботы способны решить ключевые проблемы традиционных методов:

- Адаптивность к сложным формам – роботы регулируют расход, скорость и угол нанесения материала, обеспечивая равномерное покрытие даже на изогнутых или многосторонних деталях.

- Безопасность и экология – закрытые рабочие зоны роботов минимизируют загрязнение, а система вентиляции предотвращает риски возгорания или токсичных выделений.

- Возможность быстрой перенастройки под разные материалы, что важно при работе с деталями, где требуется многоцветная или индивидуальная окраска элементов.

- Автоматизированные системы справляются с большими объёмами без потери качества, исключая «человеческий фактор».

Таким образом, переход на роботизированное окрашивание позволяет преодолеть ограничения традиционных методов, обеспечивая безопасность, экономичность и высокое качество покрытия для мостовых конструкций, где надёжность и долговечность материалов имеют первостепенное значение.

Рассмотрим решение задач прямой и обратной кинематики для шестиосевого робота KUKAKR6 900, используемого при окрашивании мостовых конструкций. На основе параметров Денавита-Хартенберга выводятся матрицы преобразования для каждого сустава робота, а также анализируется алгоритм определения конфигурации суставов по заданному положению инструмента.

Для описания кинематической цепи манипулятора KUKAKR6 900 используются параметры Денавита-Хартенберга, приведенные в таблице 1 и рисунке 1.

Таблица 1 – Параметры DH для KUKAKR6 900

Сустав	θ_i	d_i , мм	a_i , мм	α_i , °
1	θ_1	100	0	-90
2	θ_2	0	610	0
3	θ_3	0	0	90
4	θ_4	515	0	-90
5	θ_5	0	0	90
6	θ_6	90	0	0

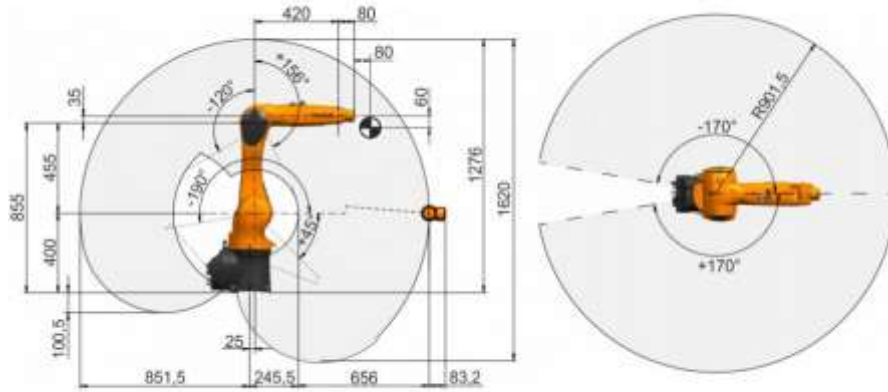


Рисунок 1 – Робот KUKA KR6 900

Каждому суставу соответствует система координат, связанная с предыдущим звеном через преобразование, задаваемое матрицей:

$$T_i = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i \cos\alpha_i & \sin\theta_i \sin\alpha_i & a_i \cos\theta_i \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i \cos\alpha_i & -\cos\theta_i \sin\alpha_i & a_i \sin\theta_i \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Матрицы преобразования для каждого сустава выводятся подстановкой параметров из таблицы 1 в общую формулу.

Результирующее положение инструмента определяется произведением матриц всех суставов:

$$T_0^6 = T_1 \cdot T_2 \cdot T_3 \cdot T_4 \cdot T_5 \cdot T_6.$$

Координаты центра инструмента (x, y, z) и углы Эйлера извлекаются из элементов T_0^6 .

Решение обратной задачи кинематики разделяется на два этапа: позиционирование (суставы 1–3) и ориентация (суставы 4–6). Для позиционирования целевая точка запястья вычисляется с учетом смещения инструмента d_6 :

$$P_{\text{запястья}} = P_{\text{цель}} - d_6 \cdot \vec{z}_6,$$

где $\vec{z}_6$ – ось Z конечного эффектора (краскопульт). Углы $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ находятся через геометрические соотношения в плоскости XZ. Например, $\theta_1 = \arctan2(P_y, P_x)$, а θ_2 и θ_3 определяются по теореме косинусов для треугольника со сторонами a_2, a_3 , и проекцией $P_{\text{запястья}}$.

Для ориентации используется свойство сферического запястья, где матрица R_3^6 выражается через углы Эйлера ZYZ:

$$R_3^6 = \begin{bmatrix} c_4 c_5 c_6 - s_4 s_6 & -c_4 c_5 s_6 - s_4 c_6 & c_4 s_5 \\ s_4 c_5 c_6 + c_4 s_6 & -s_4 c_5 s_6 + c_4 c_6 & s_4 s_5 \\ -s_5 c_6 & s_5 s_6 & c_5 \end{bmatrix},$$

где $c_i = \cos\theta_i$, $s_i = \sin\theta_i$. Углы θ_4 , θ_5 , θ_6 вычисляются через элементы матрицы R_3^6 .

При движении вдоль балки моста траектория задается последовательностью точек с нормальными к поверхности. Для каждой точки решается обратная кинематика. Выбирается конфигурация без коллизий, а углы суставов оптимизируются для минимизации перемещений. Например, при окрашивании вертикальной поверхности ориентация распылителя фиксируется перпендикулярно плоскости, что упрощает расчет θ_4 , θ_5 , θ_6 .

Таким образом, полный алгоритм расчёта траектории включает в себя поэтапное вычисление промежуточных положений по линейной интерполяции, затем для каждого такого положения – решение обратной задачи кинематики для определения необходимых углов суставов. Итоговая управляющая программа робота будет представлять собой последовательность временных отсчетов, в каждом из которых заданы углы $q_1(t), q_2(t), \dots, q_6(t)$ для обеспечения плавного и точного перемещения краскопульта по заданной траектории.

Список литературы

1. Дробина, Е. А. Интеллектуальная система управления роботизированным покрасочным комплексом / Е. А. Дробина // Инновационное развитие науки и образования : сборник статей IX Международной научно-практической конференции : в 2 ч., Пенза, 12 января 2020 года. Часть 1. – Пенза: «Наука и Просвещение» (ИП Гуляев Г.Ю.), 2020. – С. 93-95.

2. Патент № 2104807 С1 Российская Федерация, МПК В05В 12/00, В05В 13/04, В05В 15/10. Установка робота для окрашивания объектов : № 96102587/25 : заявл. 19.07.1993 : опубл. 20.02.1998 / Т. Экенберг ; заявитель Эй-биби Тралфа Робот АС.

3. Патент № 2823697 С1 Российская Федерация, МПК В05В 12/14, В05В 16/00. Универсальная окрасочная установка : № 2022115009 : заявл. 10.12.2020 : опубл. 29.07.2024 / П. Бортолотто, В. Ильо ; заявитель ДЖЕЙКО СПА.

References

1. Drobina, E. A. Intellectual control system of robotized painting complex / E. A. Drobina // Innovation development of science and education : collection of articles of IX International Scientific and Practical Conference : in 2 parts, Penza, January 12, 2020. Volume Part 1. - Penza: «Science and Enlightenment» (IP Gulyaev G.Y.), 2020. - Pp. 93-95.

2. Patent No. 2104807 C1 Russian Federation, MPK B05B 12/00, B05B 13/04, B05B 15/10. Robot installation for coloring objects : No. 96102587/25 : applied. 19.07.1993 : publ. 20.02.1998 / T. Eckenberg ; applicant Abibi Tralfa Robot AS.

3. Patent No. 2823697 C1 Russian Federation, MPK B05B 12/14, B05B 16/00. Universal painting unit : No. 2022115009 : applied for. 10.12.2020 : publ. 29.07.2024 / P. Bortolotto, V. Iglío ; applicant JEICO SPA.