

## **МЕТОД УПРАВЛЕНИЯ РОБОТОМ НА ОСНОВЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАССТОЯНИЯ**

### **Аннотация:**

Данная статья посвящена рассмотрению методов калибровки кинематических параметров роботов, направленных на минимизацию ошибок, возникающих из-за отклонений в геометрии конструкций и монтаже. Рассматриваются ключевые подходы к калибровке, включая прямую и обратную калибровку, методы фильтрации данных, оптимизацию с использованием метода наименьших квадратов, а также использование современных измерительных устройств, таких как лазерные трекеры и координатно-измерительные машины (СММ). В статье также анализируется роль машинного обучения в повышении точности и гибкости системы калибровки. Применение этих методов позволяет повысить точность позиционирования роботов, что имеет важное значение для их эффективной работы в различных промышленных областях.

### **Ключевые слова:**

Калибровка кинематических параметров, робототехника, прямой метод калибровки, обратный метод калибровки, фильтрация данных, метод наименьших квадратов, лазерные трекеры, координатно-измерительные машины, тензометрические датчики, машинное обучение, точность позиционирования.

*Shuaizhao Fan*

*Student*

*Lomonosov Moscow State University*

## **ROBOT CONTROL METHOD BASED ON DISTANCE MEASUREMENT**

### **Abstract:**

This article is dedicated to the exploration of methods for calibrating the kinematic parameters of robots aimed at minimizing errors arising from deviations in the geometry of structures and assembly. Key calibration approaches are discussed, including direct and inverse calibration, data filtering methods, optimization using the least squares method, and the use of modern measuring devices such as laser trackers and coordinate measuring machines (CMM). The role of machine learning in enhancing the accuracy and flexibility of the calibration system is also analyzed. The application of these methods allows for improved positioning accuracy of robots, which is crucial for their effective operation in various industrial fields.

**Keywords:**

Kinematic parameter calibration, robotics, direct calibration method, inverse calibration method, data filtering, least squares method, laser trackers, coordinate measuring machines, strain gauges, machine learning, positioning accuracy.

Метод управления роботом на основе определения расстояния является одной из ключевых технологий, используемых для повышения точности и надежности работы современных промышленных роботов. В условиях стремительного развития робототехники и её внедрения в различные отрасли промышленности, включая автомобильную, логистическую и машиностроительную, возрастает необходимость в совершенствовании методов управления для обеспечения высокой точности позиционирования и выполнения сложных задач. Разумеется, задачей данного исследования является обозначение существующих подходов к калибровке кинематических параметров роботов, позволяющих минимизировать ошибки, возникающие в результате отклонений в параметрах конструкции и монтажа [1].

Технология управления роботом на основе определения расстояния представляет собой сложную систему, направленную на повышение точности и надежности функционирования роботов. Она основывается на использовании методов калибровки кинематических параметров с помощью измерения расстояний между различными точками рабочего пространства робота. В основе этой технологии лежит кинематическое моделирование, которое позволяет понять движения робота и его взаимодействие с окружающей средой.

Процесс измерения является критически важным этапом в калибровке и управлении роботами, так как он напрямую влияет на точность их позиционирования и выполнения задач. В современных

технологиях используются современные измерительные инструменты, такие как лазерные трекеры, координатно-измерительные машины (СММ) и тензометрические датчики, каждая из которых играет важную роль в обеспечении точности и надежности измерений [2]. Лазерные трекеры представляют собой высокоточные устройства, которые применяются для определения пространственного положения конечного эффектора робота с минимальной погрешностью. В основе работы лазерного трекера лежит использование лазерного луча для измерения расстояния до целевых точек на роботе. Лазерный трекер может отслеживать движение робота в реальном времени, обеспечивая динамическое измерение его положения с точностью до микрон. В проекте с роботом ER20-C10 лазерный трекер использовался для получения точных координат конечного эффектора, что позволило существенно повысить точность калибровки [3]. Координатно-измерительные машины (СММ) также играют важную роль в этом процессе, в сущности данные устройства позволяют измерять размеры и геометрию объектов с высокой точностью. СММ используют различные сенсоры, включая тактильные датчики и лазерные сканеры, для захвата данных о форме и положении объекта. В контексте роботов, СММ могут быть использованы для измерения параметров звеньев и сочленений, что помогает выявить отклонения от номинальных значений и корректировать их в модели робота. Тензометрические датчики используются для измерения деформаций и напряжений, возникающих в элементах конструкции робота при его движении, конечно же такие датчики могут быть установлены на звеньях робота для контроля за изменениями в его геометрии под нагрузкой. Полученные данные позволяют корректировать модель робота с учетом реальных условий эксплуатации, что повышает точность его управления. В исследовании,

посвященном роботу ER20-C10, измеренные данные использовались для калибровки кинематической модели робота. Благодаря применению гибридного метода идентификации, включающего расширенный фильтр Калмана и регуляризованный частицевый фильтр, удалось существенно уменьшить среднюю ошибку расстояния с 0.4827 мм до 0.0780 мм, именно такое сокращение на 84% подчеркивает эффективность предложенного подхода [4]. Использование точных измерительных инструментов и передовых методов обработки данных позволило добиться значительного улучшения в точности и надежности управления роботом. В дальнейшем планируется разработка более точных измерительных устройств, которые смогут еще более эффективно отслеживать параметры робота в реальном времени. Экспериментальные тесты с использованием новых технологий позволят дополнительно проверить и улучшить предложенные методы, обеспечивая еще более высокую точность и надежность работы роботизированных систем в различных промышленных условиях.

В разработке систем управления роботами, особенно тех, которые основаны на измерении расстояния и калибровке кинематических параметров, широко используются различные языки программирования. Каждый из этих языков предоставляет уникальные возможности для решения специфических задач, связанных с обработкой данных, математическим моделированием и контролем над роботами [5].

Среди наиболее популярных языков для этой области является Python, безусловно его гибкость и большое количество библиотек для научных вычислений, таких как NumPy, SciPy и Pandas, делают его идеальным для анализа данных и реализации алгоритмов машинного обучения.

Для низкоуровневого управления аппаратным обеспечением и выполнения задач реального времени широко используется язык C++, ведь данный язык обеспечивает высокую производительность и позволяет эффективно работать с аппаратными интерфейсами, такими как датчики и приводы.

```
// Пример функции для расчета расстояния
double calculateDistance(const std::vector<double>& point1, const
std::vector<double>& point2) {
    double sum = 0.0;
    for (size_t i = 0; i < point1.size(); ++i) {
        sum += std::pow(point1[i] - point2[i], 2);
    }
    return std::sqrt(sum);
}

int main() {
    std::vector<double> point1 = {1.0, 2.0, 3.0};
    std::vector<double> point2 = {4.0, 5.0, 6.0};
    double distance = calculateDistance(point1, point2);
    std::cout << "Distance: " << distance << std::endl;
    return 0;
}
```

Все эти языки программирования, вместе с их мощными библиотеками и инструментами, обеспечивают полный спектр возможностей для разработки сложных систем управления роботами, начиная от анализа данных и моделирования до реального управления аппаратными средствами и их сочетание позволяет разработчикам создавать эффективные и надежные решения для задач, связанных с управлением роботами на основе измерения расстояния [6].

В рамках управления роботом на основе определения расстояния используются различные математические и технические формулы, которые помогают точно определить положение робота и скорректировать его движения.

Для определения расстояния между двумя точками на плоскости (в 2D пространстве), например, между текущим и целевым положением робота, используется следующая формула:

$$d = \sqrt{((x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2)}$$

где:

- $d$  — расстояние между точками  $(x_1, y_1)$  и  $(x_2, y_2)$ ,
- $x_1, y_1$  — координаты первой точки (например, текущее положение робота),
- $x_2, y_2$  — координаты второй точки (например, целевое положение).

Если робот работает в 3D пространстве, то формула для евклидова расстояния между точками будет выглядеть следующим образом:

$$d = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}$$

где:

- $x_1, y_1, z_1$  — координаты первой точки,
- $x_2, y_2, z_2$  — координаты второй точки.

Для робота, который использует датчики для определения расстояния (например, лидар или ультразвуковые сенсоры), необходимо преобразовать данные датчиков в систему координат робота, среди распространенных методов является использование полярных координат для определения расстояния и угла [6].

Если используется сенсор, например, ультразвуковой, то основная формула для вычисления расстояния  $d$  от робота до объекта будет основана на времени, за которое сигнал отражается от объекта:

$$d = (v_{\text{звук}} * t) / 2$$

где:

- $v_{\text{звук}}$  — скорость звука в воздухе (обычно около 343 м/с при нормальных условиях),
- $t$  — время, которое потребовалось сигналу для путешествия туда и обратно.

Если робот использует несколько датчиков для определения своего положения, можно использовать метод триангуляции, то есть если у нас есть три сенсора, расположенные на известных расстояниях

друг от друга, то можно вычислить точное положение робота, измеряя углы или расстояния до объектов [7,8].

Если известно расстояние от робота до каждой из трех точек, то можно вычислить его положение с помощью системы уравнений:

$$distance\ 1 = \sqrt{((x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2)}$$

$$distance\ 2 = \sqrt{((x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2)}$$

$$distance\ 3 = \sqrt{((x_3 - x)^2 + (y_3 - y)^2)}$$

Здесь  $x_1, y_1, x_2, y_2, x_3, y_3$  — координаты сенсоров, а  $distance_1, distance_2, distance_3$  — расстояния до этих сенсоров.

Калибровка кинематических параметров роботов — ключевая задача, направленная на минимизацию ошибок, вызванных отклонениями в геометрии конструкций и монтаже. Существуют несколько основных методов калибровки, каждый из которых применяется в зависимости от особенностей робота и условий эксплуатации. Прямая калибровка основана на сравнении фактического положения робота с расчетным. Для этого используются данные с датчиков, таких как лазерные сканеры или камеры, для измерения точных координат робота в рабочем пространстве, в сущности своей данный метод позволяет точно определить отклонения от модели и скорректировать параметры, такие как длина звеньев и углы наклона, но все же его применение требует высокоточности измерений и может быть дорогостоящим. Обратная калибровка применяется для корректировки параметров в реальном времени с помощью датчиков, установленных на самих роботах, например, энкодеров, данный метод позволяет оперативно адаптировать систему к изменениям, но может быть менее точным из-за шума в данных сенсоров. Методы фильтрации, среди которых упомянутый фильтр Калмана или частиц, используются для учета неопределенности данных и корректировки параметров робота с учетом погрешностей измерений и внешних возмущений.

Оптимизация с использованием метода наименьших квадратов применяется для минимизации ошибок между расчетными и фактическими данными, по сути это простая и эффективная техника для калибровки роботов, однако она требует наличия большого объема точных измерений. С развитием технологий методы машинного обучения становятся все более популярными для калибровки, ведь позволяют адаптировать параметры робота на основе данных с сенсоров и опыта, полученного в процессе эксплуатации, что значительно повышает точность и гибкость системы. Интеграция различных методов калибровки позволяет компенсировать слабые стороны каждого подхода и повысить общую эффективность калибровки, что особенно важно в реальных приложениях, где точность и надежность критичны.

Подводя итоги стоит сказать, что методы калибровки кинематических параметров роботов, включая прямую и обратную калибровку, фильтрацию данных и оптимизацию с использованием метода наименьших квадратов, играют ключевую роль в обеспечении высокой точности и надежности роботизированных систем. Развитие технологий, таких как лазерные трекеры, СММ и тензометрические датчики, а также внедрение методов машинного обучения, позволяют эффективно компенсировать ошибки, вызванные конструктивными и монтажными отклонениями. В дальнейшем совершенствование методов калибровки, а также использование гибридных подходов и новых вычислительных технологий обеспечит еще более высокую точность и адаптивность систем управления, что является важным шагом для дальнейшего расширения применения роботов в различных отраслях.

## Источники и литература

1. Rehg. J.A. Introduction to robotics in CIM systems // Prentice Hall, Upper Saddle River, NY, 2000. 440 p.
2. Nof. S.Y. Handbook of industrial robotics. New York: John Wiley, 1999. 1348 p.
3. Stone H.W. Kinematic Modelling, Identification, and Control of Robotic Manipulators. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1987. 225 p.
4. Mooring B.W., Roth Z.S., DrielsM.R. Fundamentals of manipulator calibration. New York: John Wiley & Sons, 1991. 329 p.
5. MasonM.T. Mechanics of robotic manipulation. Cambridge: MIT Press, 2001. 253 p.
6. BernhardtR., AlbrightS.L. Robot calibration. London: Chapman and Hall, 1993. 311 p.
7. EverettL.J., DrielsM., MooringB.W. Kinematic modelling for robot calibration // Proc. of IEEE Int. Conference on Robotics and Automation. 1987. P.183-189.
8. Everett L., Hsu T. The theory of kinematic parameter identification for industrial robots // ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control. 1988. Vol. 110, No 3. P. 96-100