

УДК 681.303.083

## Разработка информационно-измерительной системы с использованием роботов-манипуляторов

Куликова Олеся Дмитриевна<sup>(\*)</sup>

kulikovaod@student.bmstu.ru

Позднякова Екатерина Дмитриевна

pozdneyakova@bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

**Аннотация.** Статья посвящена рассмотрению вопросов применения роботов-манипуляторов для реализации информационно-измерительной системы. Показаны преимущества использования робота-манипулятора, основные критерии выбора датчиков. Проведены экспериментальные оценки погрешности определения координат роботом-манипулятором по оси  $z$ , по осям  $x$  и  $y$ . Определены формулы, по которым величина погрешности определения координаты роботом-манипулятором по оси  $z$ , по осям  $x$  и  $y$  могут быть оценены.

**Ключевые слова:** робот-манипулятор, измерительная система, величина погрешности, координаты, датчики

## Development of an information and measurement system using robotic manipulators

Kulikova Olesya Dmitrievna<sup>(\*)</sup>

kulikovaod@student.bmstu.ru

Pozdneyakova Ekaterina Dmitrievna

pozdneyakova@bmstu.ru

BMSTU, Moscow, Russia

**Abstract.** The article is devoted to the consideration of the use of robotic manipulators for the implementation of an information and measurement system. The advantages of using a robotic arm and the main criteria for selecting sensors are shown. Experimental estimates of the error in determining coordinates by a robot manipulator along the  $z$  axis, along the  $x$  and  $y$  axes have been carried out. Formulas have been defined by which the magnitude of the error in determining the coordinate by the robot arm along the  $z$  axis,  $x$  and  $y$  axes can be estimated.

**Keywords:** robot arm, measuring system, error value, coordinates, sensors

**Введение.** В условиях растущей потребности в автоматизации производственных процессов, роботы-манипуляторы становятся незаменимым инструментом. Они предназначены для измерения линейных и угловых размеров базовых геометрических элементов, а также поверхностей сложной формы и их взаимного расположения [1].

Актуальность работы на роботах-манипуляторах вместо ручных средств измерений обусловлена несколькими факторами, которые влияют на эффективность и точность контроля качества в современном производстве. Преимущества роботов-манипуляторов перед ручными измерениями: высокая точ-

ность и повторяемость измерений; автоматизация и повышение производительности; многофункциональность; исключение субъективной погрешности.

**Материалы и методы.** Рассмотрим преимущества робота-манипулятора:

**Мобильность и портативность.** Роботы-манипуляторы имеют возможность измерения непосредственно на объекте, без необходимости перемещения детали на стационарную машину. Это особенно важно для габаритных и тяжелых объектов.

**Простота использования и быстрота развертывания.** Относительно простой интерфейс и управление, требуется меньше времени на подготовку к измерениям.

**Экономичность.** Можно рассмотреть различные случаи, например, необходимость измерения на прямо месте, использование портативной роботоманипуляторов может быть экономически выгоднее, чем транспортировка детали на стационарную машину.

**Многофункциональность.** Многие современные модели роботоманипуляторов позволяют использовать различные виды датчики, благодаря чему расширяется список функций, который можно выполнять при помощи одного робота.

Принципиальная схема робота-манипулятора состоит из следующих блоков [2]:

1. Питание: преобразование сетевого напряжения до необходимого постоянного уровня выполняется благодаря адаптеру питания, обеспечивающего выходное напряжение не ниже 12 В.

2. Управление: управление роботом происходит удаленно с компьютера через Wifi-соединение. Для установления связи между компьютером и роботом-манипулятором используется специальный IP-адрес.

3. Программное обеспечение: для отправки управляющих команд роботу-манипулятору на компьютере устанавливается специальное программное обеспечение, которое обеспечивает взаимодействие с устройством по локальной сети.

4. Измерительная система: на роботе-манипуляторе устанавливается измерительная система, благодаря которому получаем результаты эксперимента. Получаемые измерения передаются и обрабатываются на компьютере оператора [3].

**Результаты.** Основные критерии, которые стоит учитывать при выборе датчиков — первичных преобразователей для оценки по осям  $x$  и  $y$  [4]:

Тип измерений: отсутствие контакта с измеряемой поверхностью;

Точность измерений: робот выполняет невысокоточные измерения;

Условия эксплуатации: внешние факторы влияют на результаты измерения;

Габариты робота-манипулятора.

Рассмотренные датчики:

Фотоэлектрический датчик — это один из типов датчиков, которые используются модулированный световой пучок, который прерывается или отражается от целевого объекта.

Недостатки: ограниченная дальность действия; стоимость датчика; диаметр светового луча;

Индуктивный датчик совместно с подключением цифрового выходного сигнала.

Недостатки: связь двух или более датчиков; зависимость от внешних характеристик; время срабатывания индуктивного датчика; низкая чувствительность.

Машинное зрение.

Преимущества: минимальное затрачиваемое время на проведение эксперимента; точное детализирование изображения; вес и габариты измерительного устройства.

Алгоритм методики калибровки робота-манипулятора по оси  $z$  заключается в следующем:

Производится проверка функционирования всех устройств измерительного комплекса каждого по отдельности.

Устанавливается концевая мера длины определенного значения на ровную поверхность, например, измерительную плиту.

Проводится установка робота-манипулятора в положение, в котором при помощи индикатора часового типа считывается результат измерения. Преимущество индикатора часового типа в данном методе заключается в своей высокой чувствительности и простоте использования.

Производится обнуление координаты  $z$  при помощи концевой меры длины и индикатора часового типа. Индикатор преднамеренно устанавливается на нескольких оборотах своего циферблата.

Реализуется движение робота-манипулятора по выбранной траектории — подъем на один шаг вверх по оси  $Z$ . Данный принцип можно назвать «сравнение с мерой».

Получение значений практическим путем.

Производится обработка результатов измерений.

Реализуется возврат робота в исходное положение.

Производятся многократные измерения.

**Обсуждение полученных результатов.**

**Экспериментальная оценка погрешности определения координат роботом-манипулятором по оси  $z$**

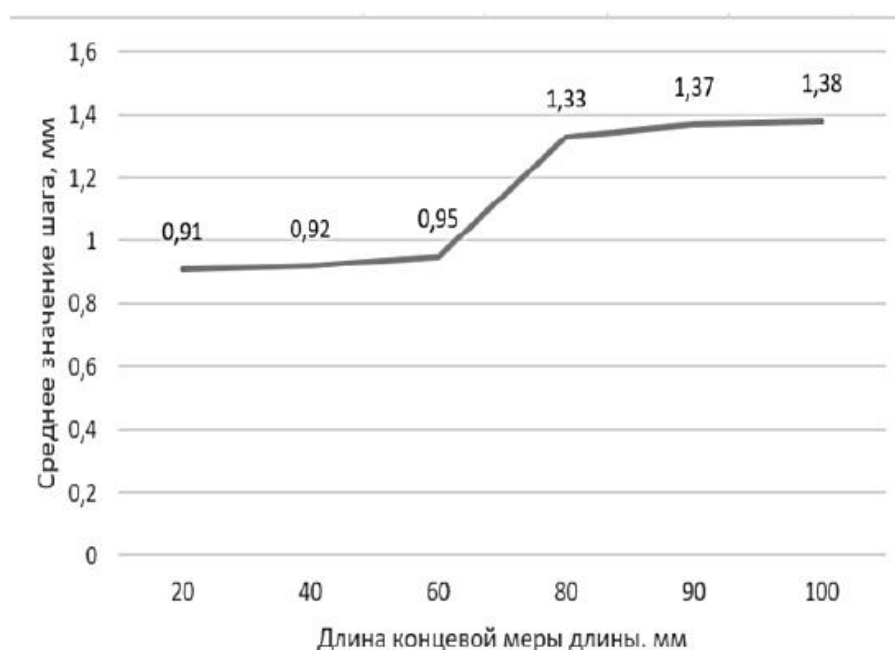
При проведении измерений с использованием роботов-манипуляторов необходимо учитывать такие погрешности как погрешность дрейфа, погрешность от усилия индикатора, отклонение при возврате индикатора в исходное положение (табл. 1, см. рисунок) [5].

По графическим зависимостям погрешностей от концевых мер длины была выбрана линейная модель. Для определения общей погрешности робота-манипулятора для различных координатных осей использовался метод наименьших квадратов. Точный подбор оптимальной прямой линии, которая лучше всего соответствует экспериментальным данным, то есть минимизирующей суммарные квадраты отклонений от экспериментальных точек.

Таблица 1

## Результаты измерений для концевых мер разного номинального значения

| №  | Отклонение возврата, мм                      |       |       |       |       |       | Результаты измерений, мм                     |      |      |      |      |      |
|----|----------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|----------------------------------------------|------|------|------|------|------|
|    | номинальное значение концевой меры длины, мм |       |       |       |       |       | номинальное значение концевой меры длины, мм |      |      |      |      |      |
|    | 20                                           | 40    | 60    | 80    | 90    | 100   | 20                                           | 40   | 60   | 80   | 90   | 100  |
| 1  | −0,04                                        | −0,10 | 0,06  | 0,04  | −0,12 | 0,09  | 0,98                                         | 0,95 | 0,86 | 1,49 | 1,59 | 1,28 |
| 2  | 0,07                                         | −0,04 | −0,03 | 0,03  | 0,07  | 0,13  | 0,85                                         | 0,92 | 0,93 | 1,31 | 1,31 | 1,14 |
| 3  | −0,02                                        | −0,07 | 0,09  | −0,08 | 0,05  | 0,12  | 0,87                                         | 1,01 | 1,03 | 1,55 | 0,94 | 1,11 |
| 4  | −0,05                                        | −0,03 | 0,06  | −0,09 | 0,06  | −0,12 | 0,89                                         | 0,84 | 0,84 | 1,24 | 1,43 | 1,80 |
| 5  | 0,07                                         | 0,07  | −0,05 | 0,11  | −0,05 | 0,07  | 0,90                                         | 0,94 | 0,87 | 1,12 | 1,39 | 0,97 |
| 6  | 0,02                                         | 0,05  | −0,09 | −0,08 | −0,04 | 0,10  | 0,94                                         | 0,88 | 0,94 | 1,36 | 1,15 | 1,76 |
| 7  | 0,06                                         | 0,08  | 0,08  | −0,04 | 0,10  | −0,06 | 0,98                                         | 0,91 | 1,05 | 1,31 | 1,67 | 1,82 |
| 8  | −0,04                                        | 0,08  | −0,07 | 0,06  | −0,06 | −0,08 | 0,99                                         | 1,02 | 1,02 | 1,42 | 0,99 | 1,01 |
| 9  | −0,01                                        | 0,02  | 0,05  | 0,05  | 0,02  | 0,13  | 0,92                                         | 0,88 | 0,98 | 1,13 | 1,45 | 1,24 |
| 10 | −0,07                                        | −0,04 | −0,02 | −0,09 | −0,04 | 0,10  | 0,93                                         | 0,98 | 0,89 | 1,39 | 0,96 | 1,37 |
| 11 | 0,06                                         | 0,09  | 0,03  | 0,02  | −0,05 | −0,12 | 0,92                                         | 0,87 | 0,87 | 1,20 | 0,92 | 1,11 |
| 12 | 0,04                                         | −0,03 | −0,03 | −0,01 | 0,08  | 0,05  | 0,93                                         | 0,82 | 0,93 | 1,35 | 1,63 | 1,52 |
| 13 | 0,07                                         | 0,07  | −0,09 | 0,02  | −0,05 | −0,07 | 0,82                                         | 0,97 | 1,04 | 1,41 | 1,18 | 1,81 |
| 14 | 0,03                                         | 0,05  | 0,10  | 0,04  | 0,11  | 0,09  | 0,83                                         | 0,96 | 0,99 | 1,33 | 1,46 | 1,19 |
| 15 | —                                            | —     | —     | —     | —     | —     | 0,97                                         | 0,93 | 0,86 | 1,25 | 1,51 | 1,12 |
| 16 | —                                            | —     | —     | —     | —     | —     | 0,94                                         | 0,89 | 1,03 | 1,37 | 0,94 | 1,75 |
| 17 | —                                            | —     | —     | —     | —     | —     | 0,87                                         | 0,86 | 0,94 | 1,29 | 1,16 | 1,44 |



Функциональная зависимость исследуемых величин

При проведении измерений шток индикатора устанавливается на минимальных оборотах на циферблате, чтобы оставлять мультипликативную погрешность в минимальных значениях.

Индикатор не имеет погрешности усилия, поэтому есть отклонения при возврате робота в исходное положение. При включении программы происходит опускание штока индикатора. Это погрешность дрейфа. Происходит она по нескольким причинам: нестабильной работы двигателя; нестабильность конструкции.

#### **Алгоритм методики калибровки робота по осям x и y**

Устанавливается камера на рабочий орган робота: камера должна быть закреплена перпендикулярно объекту съемки, чтобы она находилась строго вертикально над поверхностью объекта.

Фиксируется расстояние по оси Z от камеры до поверхности объекта и оптимального освещения для четкого снимка КМД.

Реализуется снимок КМД;

Преобразуются значения пикселя с изображения вычислительным методом: 4.1. Определение количества пикселей со снимка по линии КМД;

5. Воспроизводится один шаг робота-манипулятора по заданным осям;

6. Проводится вычислительный анализ определения шага робота-манипулятора:

#### **Экспериментальная оценка погрешности по осям x и y**

Точность измерения зависит от параметров: освещение и вспышка при создании снимка; вес специальной техники для снимка (табл. 2).

Таблица 2

#### **Обработка результатов измерений**

| Показатели                                                              | По оси X | По оси Y |
|-------------------------------------------------------------------------|----------|----------|
| Расстояние по оси Z, мм                                                 | 187      | 187      |
| Масштаб пикселя, мкм/пиксель                                            | 144      | 144      |
| Среднее арифметическое значение шага робота, мм                         | 8,90     | 9,30     |
| Среднее квадратическое отклонение, мм                                   | 0,41     | 0,54     |
| Среднее квадратическое отклонение среднего арифметического значения, мм | 0,08     | 0,1      |

Рассматривая экспериментальные данные, устанавливается зависимость шага робота-манипулятора от количества пикселей, была выбрана линейная модель. Модель была выбрана для определения шагов робота-манипулятора по осям X и Y, которая имеет зависимость от длины детали.

Для определения общей погрешности робота-манипулятора по осям X и Y, использовался метод наименьших квадратов, который заключался в точном подборе оптимальной прямой линии, которая лучше всего соответствует экспериментальным данным, то есть минимизирующей суммарные квадраты отклонений от экспериментальных точек.

**Заключение.** Проведенная практическая серия экспериментов показала, что величина погрешности определения координаты роботом-манипулятором по оси  $Z$  может быть оценена по формуле  $\Delta = 0,7 + 0,007 \times L$ . Для более точного определения данной погрешности необходимо увеличить количество измерений, использовать эталонные меры длины высокого класса точности.

Проведенные эксперименты показали, что погрешности определения координаты роботом-манипулятором по осям  $X$  и  $Y$  может быть оценена по формуле:  $\Delta = 0,08 + 0,14 \times L$  и  $\Delta = 0,1 + 0,14 \times L$  соответственно. Для более точного определения данной погрешности необходимо увеличить количество измерений, использовать эталонные меры длины высокого класса точности.

### Список источников

- [1] Куликова Е.А., Чуваков А.Б., Петровский А.Н. *Автоматизация производственных процессов в машиностроении*. Москва, Юрайт, 2024, 252 с.
- [2] Кузнецов И.С., Лавров А.А. *Методы и средства повышения точности промышленных роботов*. Владимир, ВлГУ, 2017, 144 с.
- [3] Шестопалов К.К., Руденко М.Л., Пономарев А.С. *Информационно-измерительные системы и комплексы*. Екатеринбург, РГППУ, 2019, 136 с.
- [4] Елисеев А.А., Костюк А.В. *Микросистемная техника*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014, 311 с.
- [5] Косаревский С.В. Метод контроля геометрических параметров крупногабаритных деталей с перебазированием на координатно-измерительной машине при помощи программного обеспечения Calypso. *Технология машиностроения*, 2008, № 5, с. 27–29.