

УДК 681.303.082

Анализ и оценка погрешностей в системах с роботизированными манипуляторами

Куликова Олеся Дмитриевна

lesya-black003@yandex.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Основной целью исследования является повышение точности измерений и эффективности процесса контроля качества продукции. Предложены методы калибровки робот-манипуляторов по различным осям, включая алгоритмы обработки экспериментальных данных и оценку общих погрешностей измерений. Приведен подробный анализ методик калибровки, методов уменьшения ошибок и технических особенностей реализации. Экспериментально доказано, что использование разработанных подходов позволяет значительно уменьшить погрешности измерений и обеспечить стабильность работы измерительных систем. Выводы основаны на теоретическом обосновании и эмпирических исследованиях, проведенных с применением современных технологий и программного обеспечения. Полученные результаты представляют интерес для предприятий, заинтересованных в повышении качества производимой продукции и оптимизации технологических процессов.

Ключевые слова: *робот-манипулятор, точность, первичный преобразователь, погрешность, измерительная система, машинное зрение*

Введение. В настоящее время на машиностроительных предприятиях в условиях крупносерийного производства активно поднимается вопрос выбора верной степени автоматизации, а именно многокоординатных обрабатывающих центров, приспособлений, промышленных координатно-измерительных машин или роботов, а также вопросы подключения и обмена данными оборудования с системами управления высокого уровня. На данный момент все больше внедряются координатные измерения для автоматизации работы своих многочисленных производств и цехов. Координатно-измерительная машина типа «рука» предназначена для таких задач, как измерения линейных и угловых параметров деталей, контроль качества готовой продукции и измерение сложных поверхностей или измерения в труднодоступных местах.

Материалы и методы. Робот-манипулятор — это переносное измерительное устройство, которое используется для измерения различных параметров. Его конструкция имеет несколько сочлененных звеньев и работает в трехмерной системе координат.

Роботы-манипуляторы используют координатный метод измерения. Он заключается в необходимости последовательно находить координаты точек в трехмерном пространстве. Важно отметить, что необходимо обеспечивать стабильный контакт между измерительным инструментом и поверхностью измеряемой детали, благодаря чему уменьшается вероятность появления погрешностей.

Координаты для измерений задаются оператором измерительной машины или с помощью управляющей программой. Для того, чтобы повысить точности измерений, выбираются опорные или реперные точки на поверхности измеряемой детали, которые помогают для дальнейших измерений.

Рассмотрим принципиальную схему работы робота-манипулятора.

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

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

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

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

При анализе потребностей необходимо учесть требуемую для продукции точность измерений, размеры и типы измеряемых объектов.

При выборе следует учесть особенности производственного процесса и требуемую автоматизацию. Рассматривая конвейеры производства, основной задачей измерительного контроля является измерение большого количества однотипных деталей. Габариты деталей зависят от конкретного производства. Автоматизация процессов позволяет сократить время выполнения этапов и исключить фактор, связанный с невнимательностью оператора.

Алгоритм методики калибровки по оси Z. В самом начале перед проведением экспериментальной части производится проверка функционирования всех используемых измерительных устройств.

Суть данной методики заключается в использовании концевых мер длины разных номинальных значений и индикатор часового типа в качестве измерительной системы. Преимущество индикатора часового типа в данном методе заключается в своей высокой чувствительности и простоте использования.

Проводится установка робота-манипулятора в положение, в котором при помощи индикатора часового типа считывается результат измерения, и установка «нуля». Значение, которое было выбрано для этого 2,21 мм, потому что движение робота-манипулятора имеет дискретный характер.

Это означает, что перемещение происходит не плавно, а дискретными шагами, заданными системой управления. Таким образом, точность позиционирования ограничена дискретностью шага.

Реализуется движение робота-манипулятора по выбранной траектории — подъем на один шаг вверх по оси Z. Данный принцип можно назвать «сравнение с мерой», производятся многократные измерения и обработка результатов измерений.

Экспериментальная часть 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.

Для получения результатов измерений шток индикатора, который установлен на роботе-манипуляторе, устанавливается на минимальных оборотах на циферблате, чтобы оставлять мультипликативную составляющую погрешности в минимальных значениях. Это позволяет снизить влияние погрешностей, которые увеличиваются пропорционально скорости вращения, обеспечивая наиболее достоверные результаты.

Далее после установки нуля нужно убедиться его правильности и оценить разброс значений. Так как индикатор не имеет погрешности усилия, поэтому может быть некоторое отклонение от начального значения. Отклонения при возврате робота в исходное положение и результаты измерений при разных значениях концевых мер длины представлены в табл. 1. Рассматривая представленные экспериментальные результаты измерений, важно отметить, что разброс полученных значений зависит от величины концевой меры длины.

Таблица 1

Результаты, связанные с отклонением при возврате робота

Длина концевой меры длины, мм	Разброс значений отклонения, мм	Среднее значение шага, мм
20	140	0,01
40	180	0,02
60	190	0,01
80	200	0,01
90	220	0,02
100	250	0,03

Анализируя проведенные эксперименты, можно утверждать, что расчет средних значений шага робота-манипулятора имеют определенную закономерность. Результаты, полученные вычислительным методом, демонстрируют тенденцию увеличения значения шага при увеличении значения самой концевой меры длины. Полученные результаты вычислений представлены в табл. 2.

В работе робота-манипулятора происходит опускание штока индикатора. Это является погрешностью дрейфа. Происходит она по нескольким причинам:

- нестабильной работы двигателя — это колебания, рывки, неравномерность вращения или смещения;
- нестабильность конструкции — это несовершенство материалов, деформации под влиянием температурных колебаний, упругие деформации при приложении нагрузок;

– момент передачи движения одного узла к другому — это микроскопические люфты, неидеальные поверхности скольжения, неточности в сопряжениях.

Эти факторы способны накапливаться со временем и проявляться в виде систематической погрешности. Произведем расчет погрешности дрейфа.

Погрешность дрейфа появляется в том случае, когда происходит включение программы для робота-манипулятора. Рассмотрим формулу для расчета данной погрешности и полученные результаты в табл. 3:

$$\Delta_{\text{дрейфа}} = \Delta_{\text{после}} - \Delta_{\text{до}}.$$

После полученных данных о средних значениях погрешностей можно отметить в табл. 4, что наибольшее влияние на общую погрешность вносит погрешность дрейфа, которая возникает из-за нестабильных механизмов и конструкций самого робота-манипулятора.

Таблица 2

Обработка результатов измерений

Длина концевой меры, мм	Среднее арифметическое значение, мм	Среднее квадратическое отклонение, мм	Среднее квадратическое отклонение среднего арифметического, мм
20	0,91	0,05	0,01
40	0,92	0,06	0,02
60	0,95	0,09	0,03
80	1,33	0,16	0,04
90	1,37	0,26	0,06
100	1,38	0,49	0,12

Таблица 3

Погрешность дрейфа

Длина концевой меры длины, мм	Значения до включе- ния робота, мм	Значения после вклю- чения робота, мм	Погрешность дрейфа, мм
20	2,62	2,93	0,31
40	2,71	3,06	0,34
60	2,85	3,17	0,32
80	2,34	2,72	0,33
90	2,92	3,25	0,33
100	2,7	3,02	0,32

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 4

Итоги анализа влияния компонентов погрешности

Компоненты погрешности	Среднее значение погрешности, мм
Погрешность дрейфа	0,3
Погрешность от усилия	0,015
Погрешность возврата	0,02

Алгоритм методики калибровки робота-манипулятора по осям X и Y . Данная методика калибровки по осям X и Y предназначена для получения оценки погрешности определения координат роботом-манипулятором по осям X и Y .

Рассмотренные датчики. Фотоэлектрический датчик. Его недостатками являются ограниченная дальность действия и диаметр светового луча. Чтобы избежать неоднозначности, рассмотрим формулу расчета ширины луча

$$d \leq P,$$

где P — это шаг робота-манипулятора по оси X и Y ; d — ширина луча. Индуктивный датчик. У данного первичного преобразователя недостатки считаются зависимость от внешних характеристик, время срабатывания датчика и низкая чувствительность. Машинное зрение. У данного датчиками в преимуществах минимальное затрачиваемое время на проведение эксперимента, точное детализирование изображения, вес и габариты измерительного устройства.

Основные этапы методики калибровки. Подготовка оборудования — это проверка функционирования всего использованного оборудования и установка концевой меры длины на измерительную плиту.

Создание снимка концевой меры длины — это установка первичного преобразователя на рабочий орган робота-манипулятора. Данная техника должна быть закреплена перпендикулярно объекту съемки таким образом, чтобы она находилась строго вертикально над поверхностью объекта. Разрешение фотографии должно быть высоким, чтобы обеспечить максимальную детализацию.

Подведение робота-манипулятора вместе с камерой к объекту измерения, то есть до концевой меры длины, в такое положение, с которого он сможет получить четкий снимок концевой меры длины.

Фиксирование расстояния по оси Z от оборудования для фотосъемки до поверхности объекта. Важно оставлять данную высоту неизменной на всем этапе съемки.

Фиксирование оптимального освещения для четкого снимка концевой меры длины.

Реализуется снимок концевой меры длины.

Получение значения пикселя по осям X и Y с изображения благодаря использованию специальной программы для анализа изображений и определения количества пикселей со снимка по линии концевой меры длины.

Воспроизведение одного шага робота-манипулятора по заданным координатным осям.

Проведение вычислительного анализа определения шага робота-манипулятора:

Используя рассчитанный ранее масштаб пикселя и сделанные снимки шага робота-манипулятора по заданным осям, переводим зафиксированные положения в реальные физические координаты X и Y .

Таким образом, данный метод калибровки обеспечивает возможность точного измерения шагов перемещения роботов-манипуляторов с использованием простых инструментов, например, фотографий через специальные устройства.

Экспериментальная часть по осям X и Y . Точность измерения при данном методе зависит от следующих параметров:

- освещение и вспышка при создании снимка;
- вес специальной техники для снимка;
- нестабильная работа конструкции.

Камера устанавливается на рабочий орган робота-манипулятора на определенной высоте. Важно оставлять данное расстояние по оси Z неизменным на всех этапах эксперимента. Расстояние установили равное 187 мм. Рассмотренное расстояние выбрано как крайнее нижнее положение рабочего органа при крайнем верхнем положении первого звена робота-манипулятора.

Данное расстояние является важным при проведении калибровки, потому что на различной высоте рабочего органа шаг робота будет отличаться из-за погрешностей, возникающих в местах попарных сочленений звеньев.

Далее после определения высоты нахождение рабочего органа робота-манипулятора создается снимок концевой меры длины. Данный снимок создавался для того, чтобы определить количество пикселей.

Формула для вычисления масштаба пикселя:

$$P = \frac{L}{N},$$

где L — номинальное значение концевой меры длины, мм; N — количество пикселей; P — масштаб пикселя, мм/пиксель.

Далее был произведен один шаг робота-манипулятор влево и вправо по заданным координатным осям соответственно. Рассмотрим результаты в табл. 5 для оси X и в табл. 6 для оси Y .

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.

Таблица 5

Движение робота-манипулятора по оси X

Номер измерения	Движение в левую сторону		Движение в правую сторону	
	количество пикселей	вычисленный шаг робота, мм	количество пикселей	вычисленный шаг робота, мм
1	71	9,94	64	8,96
2	65	9,10	68	9,52
3	70	9,80	62	8,68
4	69	9,66	73	10,22
5	66	9,24	70	9,80
6	69	9,66	68	9,52
7	72	10,08	65	9,10
8	70	9,80	69	9,66
9	64	8,96	66	9,24
10	73	10,22	65	9,10
11	71	9,94	63	8,82
12	67	9,38	69	9,66
13	68	9,52	70	9,80
14	69	9,66	63	8,82
15	68	9,52	69	9,66

Таблица 6

Движение робота-манипулятора по оси Y

Номер измерения	Движение вперед по оси		Движение назад по оси	
	количество пикселей	шаг робота-манипулятора, мм	количество пикселей	шаг робота-манипулятора, мм
1	64	8,96	67	9,38
2	68	9,52	63	8,82
3	62	8,68	66	9,24
4	64	8,96	66	9,24
5	63	8,82	69	9,66
6	66	9,24	62	8,68
7	60	8,40	62	8,68
8	68	9,52	63	8,82
9	71	9,94	65	9,10
10	68	9,52	68	9,52
11	73	10,22	72	10,08
12	69	9,66	73	10,22
13	63	8,82	63	8,82
14	68	9,52	69	9,66
15	69	9,66	64	8,96

Заключение. Проведенные эксперименты дают результат того, что общая формула погрешности роботом-манипулятором по оси Z , которая имеет зависимость от длины детали, оценена по формуле

$$\Delta = 0,7 + 0,007 \times L,$$

где L — длина измеряемой детали, мм.

Проведенные эксперименты и вычислительный анализ вывели общие формулы погрешности робота-манипулятора по осям X и Y :

$$\Delta = 0,08 + 0,14 \times L, \Delta = 0,10 + 0,14 \times L.$$

Для более точного определения данной погрешности необходимо увеличить количество измерений, использовать эталонные меры длины высокого класса точности.

Литература

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

Analysis and evaluation of errors in systems with robotic manipulators

Kulikova Olesya Dmitrievna

lesya-black003@yandex.ru

BMSTU, Moscow, Russia

The main objective of the research is to increase measurement accuracy and improve the efficiency of product quality control processes. Methods for calibrating robot manipulators along different axes have been proposed, including algorithms for processing experimental data and evaluating overall measurement errors. A detailed analysis of calibration techniques, methods for reducing errors, and technical implementation features has been provided. Experimental results demonstrate that using these developed approaches significantly reduces measurement uncertainties and ensures stable operation of measuring systems. The conclusions are based on theoretical justification and empirical studies conducted with modern technologies and software solutions. The obtained results will be useful for enterprises interested in improving their product quality and optimizing production processes.

Keywords: robot-manipulator, accuracy, primary transducer, error, measuring system, machine vision