

- Методы контроля деформаций зданий и сооружений в период строительства ЛАЭС-2 с оценкой возможностей современных геодезических технологий (GPS/ГЛОНАСС, наземного лазерного сканирования, по радиолокационным снимкам, инклинометрическим наблюдениям) для решения этих задач.

При вводе объекта в эксплуатацию приоритетной задачей геодезического обеспечения является определение деформаций. В разработанных проектах нашли отражение:

- Методика контроля осадок и кренов отдельно для всех зданий и сооружений на основе использования современных средств измерений;

- Оценка возможностей перспективных методов определения деформаций: ГНС-технологий, наземного лазерного сканирования, по радиолокационным снимкам, инклинометрическим наблюдениям. Рассмотрены их преимущества и недостатки, использование за рубежом.

Созданные проекты основаны на применении современных геодезических приборов (спутниковая геодезическая аппаратура, электронные тахеометры, наземные лазерные сканеры, нивелиры, приборы вертикального проектирования, инклинометры, аппаратно-программные комплексы промышленной геодезии), а также приведены варианты их использования на строительной площадке и при монтаже технологического оборудования.

Г.Б. БУЗИК

Санкт-Петербургский горный университет, Россия

ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ КАЛИБРОВКИ И ПОВЫШЕНИЯ АБСОЛЮТНОЙ СТАТИЧЕСКОЙ ТОЧНОСТИ ПРОМЫШЛЕННЫХ РОБОТОВ – МАНИПУЛЯТОРОВ

В данной работе раскрываются возможности применения высокоточной координатоопределяющей системы на базе абсолютного лазерного трекера Leica AT960 под управлением программного комплекса SpatialAnalyzerMachine для повышения абсолютной статической точности позиционирования и ориентирования инструмента промышленными роботами – манипуляторами. Рассматриваются два приложения геодезических методов к решению задачи – выполнение калибровки робота и коррекция положения инструмента в цикле с обратной связью.

Ключевые слова: координатоопределяющая технология, калибровка манипуляционных роботов, абсолютный лазерный трекер Leica AT960, SpatialAnalyzerMachine.

Современное промышленное производство, в частности машиностроение, характеризуется высокой степенью автоматизации и повсеместной интеграцией роботизированных систем. Роботы – манипуляторы обладают высоким уровнем повторяемости положения и ориентации концевой эффектора (до 0,02 мм) и успешно выполняют такие операции, как сварка, сортировка и комплектование.

В машиностроении существуют особый класс задач, предъявляющих повышенные требования к точности абсолютного позиционирования инструмента или объекта в расчетное положение с помощью робота.

В качестве примера рассмотрим задачу выполнения роботом сверления. Допуск на итоговое положение отверстия в системе координат изделия может задаваться конструктором на уровне 0,1 мм и точнее.

Реальная характеристика абсолютной точности позиционирования робота – манипулятора обычно не указывается производителем и в спецификации представлены только данные о повторяемости.

Для проверки реального значения указанной характеристики, а также для тестирования и анализа методов увеличения этого значения, была собрана экспериментальная установка. Установка включает в себя промышленный робот – манипулятор компактного класса KUKAKR6 K900 (повторяемость $\pm 0,03$ мм) и

высокоточную координатоопределяющую систему на базе абсолютного лазерного трекера LeicaAT960MR с измерительной головкой LeicaT-Mac, под управлением программного комплекса SpatialAnalyzerMachine (производства компании NewRiverKinematics).



Рис. 1. Вид экспериментальной установки

Данная координатоопределяющая система позволяет проводить измерения пространственных координат рабочей точки инструмента с точностью, вычисляемой по формуле (1):

$$U_{x,y,z} = \pm(15\mu\text{м} + 6\mu\text{м}/\text{м}), \quad (1)$$

где $U_{x,y,z}$ – предельно допустимая ошибка определения координат одной точки.

Таким образом, $U_{x,y,z}$ является функцией от расстояния до измеряемой точки. В экспериментальной установке расстояние от лазерного трекера до измеряемого объекта составило 1.7 метра. Следовательно, предельно допустимая ошибка определения координат рабочей точки сверла составила ± 0.025 мм. Согласно спецификации ASME B89.4.19-2006 для данного вида измерительных приборов, СКО определения координат на расстоянии 1.7 метра составит ± 0.013 мм.

Система позволяет одновременно с измерением координат проводить измерение углов ориентации инструмента (оси сверла) в пространстве с точностью 0.01° ($15 \mu\text{м}/100 \text{ мм}$).

Таким образом, лазерный трекер, обеспечивая избыточную точностью измерений, позволяет выполнить надежную апостериорную оценку абсолютной статической точности позиционирования для промышленного робота – манипулятора.

Во время эксперимента, робот выполнял позиционирование и ориентирование сверла в заранее рассчитанное положение над центром отверстия в сварочном столе. Далее трекер выполнял контрольное измерение и результаты (фактическое положение рабочей точки и ориентация оси инструмента) сравнивались с номинальными значениями из расчетов.

Подобная операция позиционирования и контроля выполнялась на каждом из этапов эксперимента:

1. Позиционирование без предварительной калибровки робота. Полученные отклонения приведены в Таблице 1, строка 1 – БК.

2. Выполнение общей калибровки робота – то есть калибровки во всем рабочем диапазоне. Смысл калибровки заключается в исключении основного источника ошибок в позиционировании робота – неточностей в определении параметров Денавита – Хартенберга кинематической модели робота [1]. Данный набор параметров описывает

взаимное положение звеньев робота и используется для решения задач кинематики при позиционировании конечного эффектора.[2]

По результатам измерения пространственных координат и углов ориентации инструмента в различных положениях с помощью лазерного трекера Leica AT960MR, вычисляются отклонения от теоретических значений. Набор калибровочных положений при этом выбирается таким образом, чтобы покрывать как можно большую часть рабочего объема робота. Далее, с помощью алгоритмов SpatialAnalyzerMachine, вычисляются новые параметры Денавита – Хартенберга, под условием минимизации отклонений. Для проверки результатов, позиционирование осуществляется с использованием новой кинематической модели. Полученные отклонения приведены в Таблице 1, строка 2 – ОК.

3. Выполнение специальной калибровки робота – то есть калибровки непосредственно в рабочей зоне выполнения сверления. Принцип выполнения специальной калибровки аналогичен общей калибровке, но при этом все калибровочные позиции расположены внутри рабочей зоны интереса. Полученные отклонения приведены в Таблице 1, строка 3 – СК.

4. Позиционирование и ориентирование инструмента в цикле с обратной связью под постоянным контролем трекера. Смысл данного метода заключается в определении фактического положения инструмента, вычислении отклонений от номинального положения и передаче параметров коррекции для робота. После первой подобной итерации процесс повторяется до тех пор, пока отклонения от номинального положения не войдут в заданный предварительно допуск. Полученные отклонения приведены в Таблице 1, строка 4 – ЦОС.

Таблица 1

Условия	ΔX , мм	ΔY , мм	ΔZ , мм	ΔR_x , °	ΔR_y , °	ΔR_z , °	Добц, мм
БК	0.762	- 0.801	1.382	0.07	0.06	-0.11	1.770
ОК	0.059	0.072	- 0.668	-0.04	0.01	0.06	0.674
СК	0.031	0.064	-0.047	-0.02	0.02	0.02	0.086
ЦОС	0.017	0.011	0.004	<0.01	<0.01	<0.01	0.020

Условные обозначения в таблице 1: БК – без калибровки, ОК – общая калибровка (во всем рабочем объеме), СК – специальная калибровка (в рабочей зоне), ЦОС – цикл с обратной связью.

Результаты эксперимента, приведенные в Таблице 1, демонстрируют явную зависимость итоговой точности позиционирования от выбранного метода.

Общая калибровка позволяет повысить статическую точность во всем рабочем объеме манипулятора, но достижимая точность ограничена. Добиться более высоких значений точности, но в ограниченной рабочей зоне, позволяет выполнение специальной калибровки.

Основное преимущество всех видов калибровки заключается в необходимости проведения измерений только один раз. Далее участие координатоопределяющей системы не требуется для сохранения достигнутого уровня точности.

Наилучший результат демонстрирует позиционирование в цикле с обратной связью. Данный метод позволяет достичь предельной точности для робота – на уровне точности самой измерительной системы. Недостатком метода является необходимость постоянного участия координатоопределяющей системы в процессе позиционирования инструмента.

Таким образом, геодезические методы, то есть выполнение высокоточных измерений с помощью координатоопределяющей системы, позволяют получить надежные и стабильные результаты в плане повышения статической абсолютной точности промышленных роботов – манипуляторов.

Литература

1. Craig, J. J., Introduction to Robotics: Mechanisms and Control, Addison Wesley, New York, 1989. – 408 с.
2. Идентификация параметров кинематических моделей манипуляционных роботов: статья / С. Л. Крутиков. – М.: МГТУ им. Баумана, 2013. – 10 с.

В.А. ВАЛЬКОВ, К.П. ВИНОГРАДОВ
Санкт-Петербургский горный университет, Россия

ОПЫТ КЛАССИФИКАЦИИ ТОЧЕК ЛАЗЕРНЫХ ОТРАЖЕНИЙ ПРИ НАЗЕМНОМ СКАНИРОВАНИИ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

Наземное лазерное сканирование фасадов зданий и сооружений для составления обмерных чертежей широко применяется в России и в мире. В тех случаях, когда фасады частично закрыты растительностью и, например, защитной сеткой, возникают сложности с получением качественной трехмерной точечной модели. В таких случаях целесообразно использовать импульсные наземные сканеры с регистрацией нескольких отражений в ответ на один импульс (multitargetcapability), в первую очередь приборы Riegl серии VZ, и выделении того из них, которое относится к зданию. Но тогда в наземном сканировании нужна классификация точек лазерных отражений, по аналогии с воздушным. Приведен опыт применения пакета TerraSolid для классификации и выделения точек фасада («земли») в общем облаке точек.

Ключевые слова: наземное лазерное сканирование, трехмерная точечная модель, классификация точек лазерных отражений.

Использование наземного лазерного сканирования (НЛС) для съемки зданий и сооружений уже давно зарекомендовало себя как наиболее полный и достаточно точный способ получения всех пространственных характеристик объекта. Трехмерные точечные модели объектов (облака точек) являются основным результатом работы систем лазерного сканирования. Конечным продуктом съемки в большинстве случаев являются плоские (обмерные чертежи) и трехмерные векторные модели объектов. Так, например, результатом съемки зданий и сооружений являются поэтажные планы, обмерные чертежи фасадов, развертки внутренних стен (чертежи интерьеров) и т.д. Технологии создания архитектурных чертежей по данным лазерного сканирования не отличаются большим разнообразием. В общем, они, скорее всего, сводятся к двум основным направлениям. Первое – векторизация объекта непосредственно по облаку точек и его фрагментам. Второе (иногда более эффективное в области архитектурных обмеров) – векторизация растровых изображений (ортоизображений), которые получаются путем проекции точек лазерных отражений на плоскость.

Отметим, что основной недостаток метода любого сканирования состоит в неизбежном наличии определенного числа участков объекта, недоступных для измерений «мертвых зон». При этом оператор не всегда даже может отследить, что было снято в ходе сеанса, а что нет. Здесь хотелось бы остановиться на проблеме наземной сканерной съемки зданий и сооружений, частично закрытых растительностью, движущимися объектами (пешеходами, автомобилями), защитными сетками. Так, на рис. 1 показан фасад промышленного здания, поверх которого частично натянута защитная сетка, к фасаду примыкает качающаяся растительность, а по улице движутся пешеходы и автомобили. Все эти объекты в условиях реальной съемки фасада практически невозможно устранить. Они не так сильно мешают визуально наблюдать его детали (см. рис. 1), однако для лазерного сканирования – критичны.