

КОНТРОЛЬ ТЕПЛОВЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ТРУБОПРОВОДОВ ПРИ ПОМОЩИ СИСТЕМЫ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ

Матвеев Е.Л., Матвеев А.Л., Черкасова М.С., Мишенин А.Ю.
(АО «НИКИЭТ», Москва, Россия)

Введение

Вследствие воздействия силовых и кинематических факторов, таких как температура, давление, весовая нагрузка и т.п. на элементы оборудования и трубопроводов (ОиТ), в последних возникает напряженно-деформированное состояние, приводящее к перемещениям ОиТ.

Для оценки величины смещений трубопроводов и оборудования в процессе эксплуатации был разработан фрагмент системы, который в автоматическом режиме осуществляет измерение линейных перемещений контролируемых ОиТ и производит анализ полученных результатов с целью оценки технического состояния и циклической прочности контролируемых ОиТ для управления ресурсными характеристиками объекта контроля.

Использование типовых индуктивных (штоковых), ёмкостных и тросиковых датчиков не всегда возможно, т.к. требует наличия предусмотренных рабочим проектом проходов, свободных кабельных каналов и других крепёжных и монтажных конструкций для прокладки кабельных линий и установки датчиков и узлов крепления. Решение данной проблемы тесно связано с внедрением новых информационных технологий таких, как детектирование движения и распознавание образов с помощью систем компьютерного зрения.

1. Назначение системы

Разработанный фрагмент системы компьютерного зрения в автоматическом режиме осуществляет измерение расстояния между начальным положением точек контроля на ОиТ, которое фиксируется в программном обеспечении (ПО) после установки и проведения калибровочных работ измерительного канала, и их текущим положением, измеренным в результате эксплуатации оборудования, а также анализ полученных результатов с целью оценки технического состояния и циклической прочности контролируемых ОиТ с решением следующих измерительных и диагностических задач:

- непрерывное автоматическое измерение расстояния контролируемых ОиТ;
- анализ результатов измерений по специальным алгоритмам с целью выявления предаварийных и аварийных уровней перемещений контролируемых ОиТ в соответствии с заданными уставками;
- выдача сигнализации при превышении предаварийных и аварийных уровней перемещений контролируемых ОиТ;
- использования полученных данных для оценки циклической прочности и управления ресурсными характеристиками контролируемых ОиТ;
- выдача результатов контроля оперативному персоналу.

2. Метод измерения расстояния

Для контролируемых ОиТ измерение расстояния, полученного с помощью разработанного фрагмента системы компьютерного зрения, в точках контроля для каждого из трёх взаимно перпендикулярных направлений осуществляется с помощью оптических первичных преобразователей перемещений на базе измерительных комплектов, состоящих из видеокамер, установленных на неподвижных строительных и

металлических конструкциях в контролируемых помещениях, и «мишеней», монтируемых при помощи узлов крепления непосредственно в точках контроля ОиТ.

«Мишень» представляет собой регулярный объект с чередующимися контрастными черными и белыми квадратами в формате «шахматной доски».

Камеры принимают световой поток (изображение) от текущего отображения «мишеней». Изображения с камер передаются в вычислительный комплекс (ВК) системы для обработки в программном обеспечении (ПО) по специальным математическим алгоритмам и определения текущего местоположения «мишени» в пространстве с целью измерения расстояния между начальным положением точек контроля и их текущим положением в трёх взаимно перпендикулярных направлениях.

Все вычисления по данному алгоритму проводятся автоматически с помощью ПО системы, установленного на ВК.

3. Предварительная калибровка измерительного канала

Перед началом эксплуатации, а также после ремонта, замены технических средств и т.п. измерительный канал должен пройти калибровку. Для этого делается серия снимков «мишени», не менее 20, в разных проекциях, то есть под разным углом относительно фокальной оси, и в разных местах расположения «мишени» на изображении. На рисунке 1 представлены изображения «шахматной доски» в различных ориентациях, предоставляющих достаточно информации, чтобы полностью определить расположение этих изображений в глобальной системе координат (относительно камеры), а также встроенных параметров камеры.

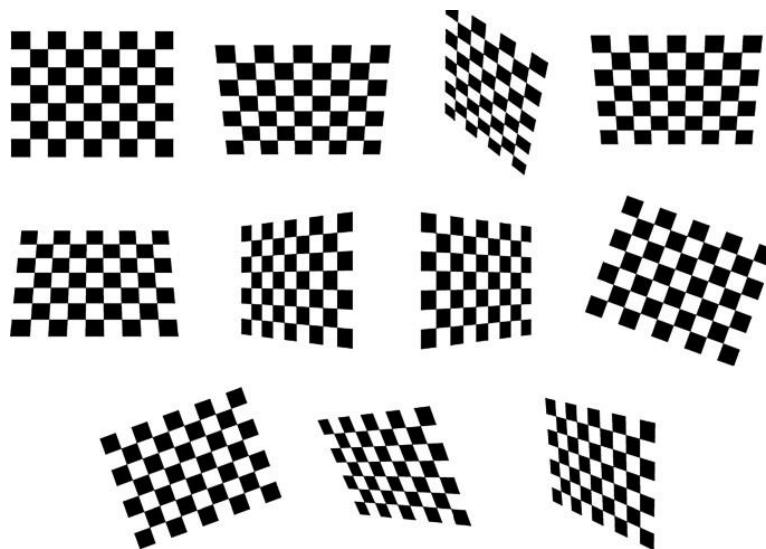


Рис. 1. Изображения «шахматной доски» в различных ориентациях

В результате автоматизированной калибровки определяются коэффициенты дисторсии, при учете которых исключаются искажения, вносимые камерой (объективом) в геометрию изображения «мишени». Также при калибровке вычисляется матрица встроенных параметров камеры, которая задает параметры соответствия точек между объектом и его изображением. Для каждого канала калибровку нужно проводить только один раз.

Значительный вклад в качество калибровки и, в конечном счете, в точность измерений оптического измерительного канала вносит точность определения размера ячейки «шахматной доски», используемой в качестве «мишени».

При обработке изображений используется информация о расположении угловых точек (углов) и расстоянии между ними на «шахматной доске». По изображению с

известными параметрами преобразования координат угловых точек (рассчитанными в процессе калибровки) определяется текущее положение «шахматной доски» в пространстве, которое жестко связано с точкой контроля.

Текущее положение точки контроля сравнивается с начальным (нулевым) для определения расстояния между текущим и начальным положениями объекта контроля.

4. Обработка результатов измерений

Обработка результатов измерений производится в ВК с помощью ПО в автоматическом режиме в соответствии с заложенными в него специальными алгоритмами расчётов.

Результаты измерения расстояния для контролируемых ОиТ, полученные с помощью фрагмента системы компьютерного зрения, выводятся в окне основной программы в виде числа, рассчитанного по формуле евклидовой метрики:

$$d_{ab} = \sqrt{(X_n - X_0)^2 + (Y_n - Y_0)^2 + (Z_n - Z_0)^2},$$

где (X_0, Y_0, Z_0) – пространственные координаты точки контроля в начальном положении; (X_n, Y_n, Z_n) – пространственные координаты точки контроля в текущем положении.

Таким же образом выводится информация о выявлении превышений перемещений ОиТ значений предупредительной и аварийной уставок.

Для автоматического резервирования базы данных по заданному расписанию в составе ПО в фоновом режиме функционирует программный модуль, вся информация о ходе выполнения операций модулем записывается в журнал событий.

5. Программа оценивания погрешностей измерения расстояния

С целью проверки точности разработанных алгоритмов была проведена оценка погрешностей измерений, полученных с помощью системы компьютерного зрения.

Теоретическое и экспериментальное обоснование погрешности измерения расстояния с помощью системы компьютерного зрения основано на результатах сравнения измерений расстояний по трем осям, полученных с помощью разработанного фрагмента системы с оптическими первичными преобразователями на базе видеокамеры, с относительными линейными перемещениями, полученными с помощью поверенных средств измерений (СИ).

В качестве поверенных СИ были выбраны датчики линейных перемещений лазерные триангуляционные optoNCDT серии ILD1710-XBL (номер в ГРСИ РФ: 75034-19), а также штангенциркуль ШЦ-III-400-0,05 губк. 100 ЧИЗ (стандарт: ГОСТ 166-89, номер в ГРСИ РФ: 72189-18).

В испытаниях использовался стенд-имитатор линейных перемещений вдоль трех осей, к которому крепилась специальная «мишень» и датчики линейных перемещений лазерные триангуляционные для контроля точности реальных перемещений (рис. 2). Также на «мишень» стенда был направлен оптический трехкоординатный первичный преобразователь на базе видеокамеры HIKVISION DS-2DY3420IW-DE4 S6. С помощью штангенциркуля измерялся размер квадрата «мишени».

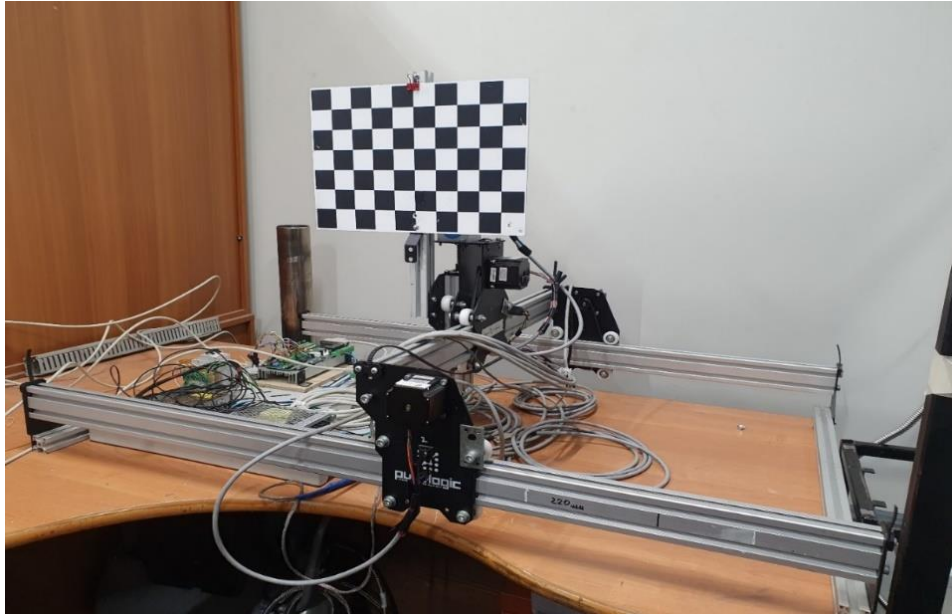


Рис. 2. Стенд-имитатор линейных перемещений

При планировании проведения проверок и выбора числа и характера расчётных тестов с помощью зарегистрированных СИ было необходимо найти компромисс между ограничением объёмов работ и представительностью полученных результатов, при определении количества необходимых тестов были приняты следующие критерии:

1) Из-за ограничений стенда было решено выбрать 20 «сечений» диапазона измерения расстояния вдоль горизонтальной оси X , находящейся в плоскости, параллельной плоскости «мишени»; 10 «сечений» диапазона измерения расстояния вдоль вертикальной оси Y , находящейся в плоскости, параллельной плоскости «мишени»; и 18 «сечений» диапазона измерения расстояния вдоль оси Z , параллельной фокальной оси видеокамеры и перпендикулярной к плоскости «мишени».

Положение системы координат в пространстве, представленной в виде правой тройки векторов, а также направления осей изображены на рисунке 3.

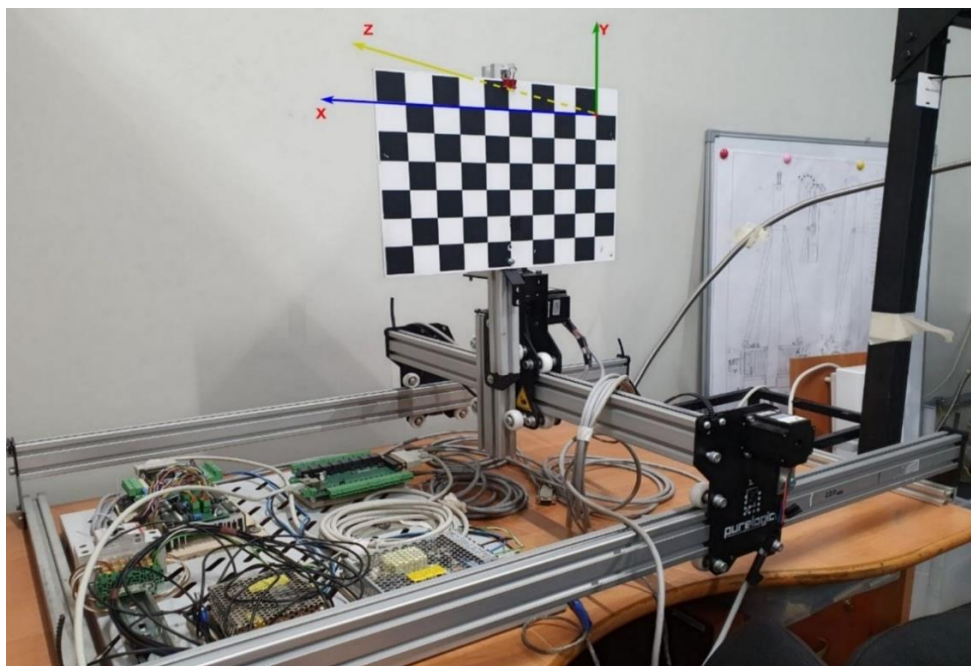


Рис. 3. Положение системы координат в пространстве стенда-имитатора

2) Испытания проводились при двух типах освещенности – «высокая освещенность» (500 lux) и «низкая освещенность» (25 lux). Для измерений использовался люксметр Testo 540.

3) При фиксированной освещенности проводились испытания с различной степенью заполнения изображения «мишенью» (около 7, 10 и 12 %).

4) Испытания проводились при четырех различных расстояниях между видеокамерой и специальной «мишенью» (3, 5, 7 и 9 м).

Таким образом, учитывая условия критериев 1-4 был сформирован объем тестовых проверок из 765 проведенных тестов, необходимый для получения достаточного массива данных по оценке погрешности расстояния с помощью разработанного фрагмента системы компьютерного зрения по трем осям в зависимости от оси и величины перемещения, освещенности, степени заполнения изображения «мишенью» и расстояния от видеокамеры до «мишени». Заданное количество тестов обеспечивает получение точных оценок измерения расстояния с помощью разработанной системы при различных критериях измерения расстояний. Количество тестов для заданных линейных перемещений позволяет сделать статистическую обработку полученных результатов и оперировать со средним значением погрешности для каждого характерного набора тестов.

В качестве независимой оценки измерения расстояния, с которой происходит сравнение оценок расстояний по трем осям, выполненных с помощью фрагмента системы компьютерного зрения, используются результаты измерений линейных перемещений, полученные с помощью датчиков линейных перемещений лазерных триангуляционных optoNCDT серии ILD1710-XBL [1], [2].

6. Оценка погрешности измерения расстояния

По результатам экспериментов была проведена оценка погрешности измерения расстояния с помощью разработанного фрагмента системы компьютерного зрения вдоль трех взаимно перпендикулярных осей, подтверждающая возможность использования этой системы по назначению с обоснованной характеристикой погрешности измерения относительных линейных перемещений.

В ходе экспериментов на натурном стенде-имитаторе линейных перемещений было зафиксировано 765 результатов измерений при трех факторах: освещенность помещения, расстояние от видеокамеры до «мишени» и степень заполнения изображения «мишенью», влиянием которых решено было пренебречь в силу доказанной незначимости факторов [3]. Также было доказано, что направление перемещения (в положительном или отрицательном направлении вдоль каждой из осей) «мишени» также не влияет на результаты измерений [4].

Таким образом, в ходе проведения анализа было выявлено, что доверительная граница погрешности оценки измерения расстояния с помощью фрагмента системы компьютерного зрения вдоль оси Z на уровне значимости 0.95, не превосходит

$$(Q_{\text{Зад}_Z} - 0.574) \text{ мм}; \pm 1.49 \text{ \%};$$

где $Q_{\text{Зад}_Z}$, мм – постулируемое относительное перемещение вдоль оси Z.

Результаты для оценки погрешности расстояния вдоль осей X и Y оказались подобными.

На рисунке 4 представлены доверительные границы погрешности измерения расстояния с помощью разработанного фрагмента системы вдоль оси Z, а также аппроксимирующая для средних значений расстояний, полученных с помощью этого же фрагмента системы [5].

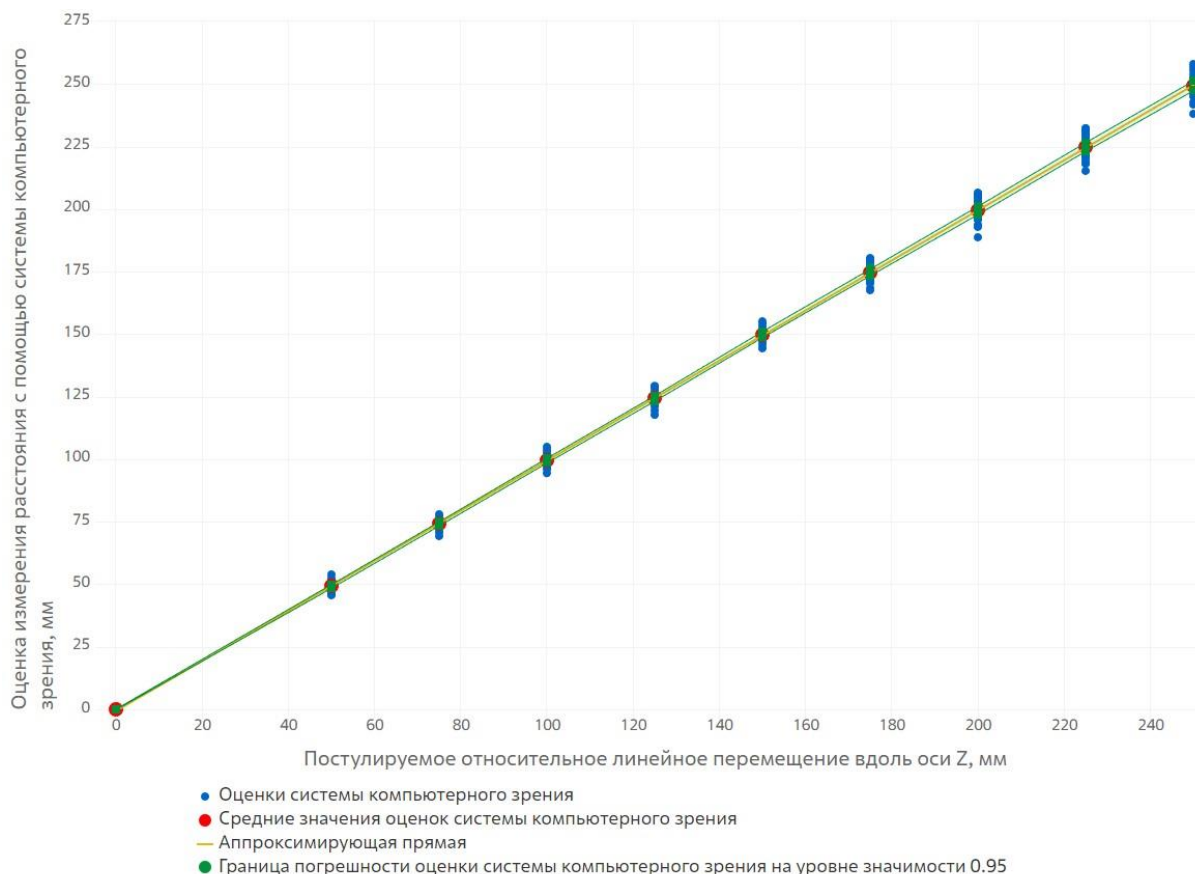


Рис. 4. Доверительные границы погрешности измерения расстояния с помощью фрагмента системы компьютерного зрения вдоль оси Z

Заключение

Таким образом, в ходе создания фрагмента системы контроля перемещений было разработано ПО, позволяющее в автоматическом режиме осуществлять измерение линейных перемещений контролируемых ОиТ и производить анализ полученных результатов с целью оценки технического состояния и циклической прочности контролируемых ОиТ для управления ресурсными характеристиками объекта контроля [6], [7].

Также была проведена оценка погрешностей измерения расстояния с помощью разработанного фрагмента системы, результаты которого показали, что основная относительная погрешность измерения расстояния составляет не более 5%.

В дальнейшем планируется расширение возможностей фрагмента системы контроля перемещений, а также его масштабирование.

Список литературы

1. ГОСТ Р 8.563-2009 «Государственная система обеспечения единства измерений. Методики выполнения измерений», 2010.
2. ГОСТ Р 8.596-2002 «Государственная система обеспечения единства измерений. Метрологическое обеспечение измерительных систем. Основные положения», 2003.
3. Сара Бослаф. Статистика для всех. / Пер. с англ. П.А. Волкова, И.М. Флямер, М.В. Либерман, А.А. Галицына. – М.: ДМК Пресс, 2017. – 586 с.
4. Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. – 2-е изд., испр. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012. – 816 с.

5. ГОСТ Р 8.736-2011 «Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения».
6. Zhengyou Zhang «A flexible new technique for camera calibration», Microsoft Research, One Microsoft Way, Redmond, USA, 1998.
7. OpenCV Tutorials // OpenCV URL:
https://docs.opencv.org/4.x/d9/df8/tutorial_root.html (дата обращения: 15.01.2023).