

М. А. Попков^{1✉}, В. Р. Янгальшев¹, А. В. Мареев¹

Разработка программного обеспечения для реализации методики калибровки высокоточного малобюджетного цифрового инклинометра, предназначенного для использования в системах мониторинга деформаций

¹Сибирский государственный университет геосистем и технологий,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: Popkov-MA2023@sgugit.ru

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы разработки программного обеспечения для автоматизации процесса калибровки малобюджетного видеоинклинометра (ВИМ) с компенсацией влияния внешних факторов. Представлены алгоритмы компьютерного зрения для детектирования пузырька уровня, методы калибровки устройства на основе линейной регрессии и градиентного бустинга (CatBoost), а также реализация графического интерфейса пользователя. Описано проведение экспериментальных исследований точности измерений и программной компенсации температурного дрейфа. Показана практическая применимость разработанного программного обеспечения в системах мониторинга деформаций зданий и сооружений, особенно в условиях Крайнего Севера.

Ключевые слова: видеоинклинометр, калибровка, компьютерное зрение, CatBoost, температурный дрейф, мониторинг деформаций, OpenCV, PySide6

М. А. Попков^{1✉}, V. R. Yangalyshev¹, A. V. Mareev¹

Development of software for implementing a calibration method for a high-precision, low-cost digital inclinometer intended for use in deformation monitoring systems

¹Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: Popkov-MA2023@sgugit.ru

Abstract. The article discusses the issues of software development for automating the calibration process of a low-budget video clinometer (VIM) with compensation for external factors. Computer vision algorithms for detecting level bubbles, device calibration methods based on linear regression and gradient boosting (CatBoost), as well as the implementation of a graphical user interface are presented. Experimental studies of measurement accuracy and software compensation of temperature drift are described. The practical applicability of the developed software in systems for monitoring deformations of buildings and structures, especially in the conditions of the Far North, is shown.

Keywords: video inclinometer, calibration, computer vision, CatBoost, temperature drift, strain monitoring, OpenCV, PySide6

Введение

С развитием технологий автоматизированного геодезического мониторинга возрастает потребность в недорогих, но точных приборах для измерения углов наклона. Одним из перспективных решений является использование малобюджетных видеоинклинометров (ВИМ), основанных на анализе положения пузырька

уровня в цилиндрической колбе. Такие устройства позволяют минимизировать затраты на оборудование и одновременно поддерживать высокую точность измерений.

Особый интерес представляет применение ВИМ в условиях Крайнего Севера, где активное таяние вечной мерзлоты вызывает значительные деформации грунтовых оснований инженерных сооружений. Для повышения надежности измерений необходимы эффективные методы калибровки и программная компенсация влияния внешних факторов, таких как температура окружающей среды и освещенность [1].

Методы и методики

Программное обеспечение было реализовано на языке Python с использованием фреймворка PySide6 для создания графического интерфейса [2]. Архитектура системы включает следующие модули:

- модуль захвата видеопотока – осуществляет получение кадров с камеры ESP32-CAM;
- модуль обработки изображения – выполняет преобразование изображения в оттенки серого, бинаризацию, выделение контуров пузырька;
- модуль определения координат пузырька – вычисляет центр пузырька и передает данные в модуль калибровки;
- модуль калибровки – реализует линейную регрессию и градиентный бустинг (CatBoost) для перевода пиксельных координат в угловые значения;
- модуль компенсации температурного дрейфа – корректирует угол наклона на основе данных с датчика температуры DS18B20;
- модуль хранения данных – записывает результаты измерений в формате .csv и видеопоток в .avi.

Графический интерфейс пользователя – обеспечивает управление параметрами, визуализацию изображения и отображение текущих данных.

Для наглядного представления логики работы программного обеспечения была разработана диаграмма деятельности, представленная на рис. 1. На данной диаграмме отражены ключевые этапы работы системы: начиная с захвата видеопотока и заканчивая компенсацией температурного дрейфа и сохранением данных.

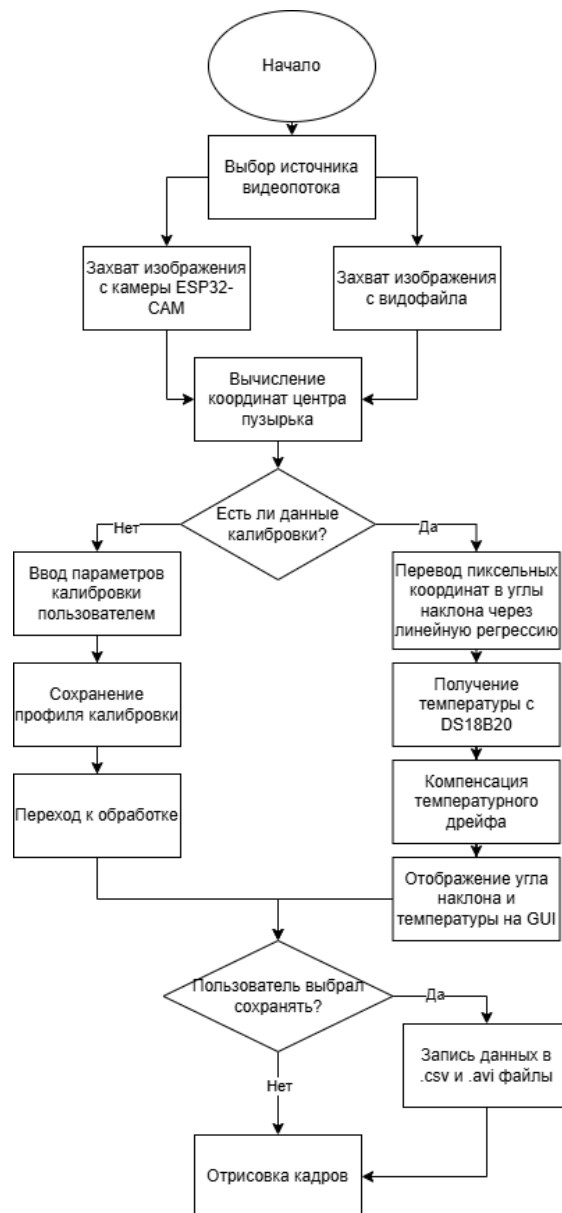


Рис. 1. Диаграмма деятельности процесса измерения угла наклона

Для перевода пиксельных координат пузырька в углы наклона были протестированы три подхода:

- линейная регрессия;
- множественная линейная регрессия;
- градиентный бустинг (CatBoost).

Наиболее высокую точность показал метод CatBoost, который позволил учесть нелинейные зависимости в поведении пузырька на краях диапазона измерений. Средняя абсолютная ошибка (MAE) составила 6,9 мкрад (1,4"), а среднеквадратическая ошибка (RMSE) – 8,7 мкрад (1,8").

Экспериментально установлено, что самонагрев камеры ESP32-CAM оказывает существенное влияние на стабильность измерений. Был разработан программный модуль, осуществляющий коррекцию угла наклона на основе данных

с датчика температуры DS18B20. После внедрения компенсации ошибка снизилась на 28–32 %, что позволило повысить надежность устройства в условиях резких температурных колебаний [3].

Результаты

Для верификации предложенной методики были проведены сравнительные испытания с эталонным инклинометром Leica Nivel 220 [4]. Точность эталонного устройства составляет:

- 5 мкрад (1") в диапазоне $\pm 1,5$ мрад (300");
- 15 мкрад (3") в диапазоне ± 2 мрад (400");
- 50 мкрад (10") в диапазоне ± 3 мрад (600").

Результаты тестирования подтвердили высокую степень соответствия между показаниями ВИМ и эталонного устройства, что свидетельствует о работоспособности разработанного программного обеспечения.

Заключение

В рамках исследования была разработана и реализована программная система калибровки малобюджетного видеоинклинометра, обеспечивающая высокую точность измерений и устойчивость к внешним воздействиям. Программа обладает кроссплатформенной совместимостью, поддерживает запись данных и видеопотока, а также позволяет проводить калибровку в реальном времени [5]. Разработанное ПО может быть использовано в системах мониторинга деформаций объектов инфраструктуры, особенно в удаленных и труднодоступных регионах, таких как Крайний Север.

Благодарности

Исследование выполнено при поддержке государственного задания «Автоматический геодезический мониторинг высокоточных датчиков вертикальных перемещений в условиях Крайнего Севера» (FEFS-2023-0003).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Карпик А.П., Мареев А.В., Попков М.А., Янгальшев В.Р., Мамаев Д.С. Малобюджетный высокоточный цифровой инклинометр на основе системы компьютерного зрения // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2023. Т. 10. № 3. С. 51–59. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54618824>.
2. DoubleCitizen. DoubleCitizen/Inklinometer. – URL: <https://github.com/DoubleCitizen/Inklinometer>.
3. OSF \ Digital Buble-level – Электронный архив исследовательских данных. – URL: <https://osf.io/pd9kj/>.
4. Leica Geosystems. Leica Nivel 220 User Manual. Switzerland, 2022 https://leica-geosystems.com/ru/products/total-stations/systems/geotechnical-sensors/leica-nivel210_220.
5. Федотова А.И., Гильванов Р.Г. Разработка кросс-платформенных приложений на языке python и фреймворке kivy. В сборнике: Интеллектуальные технологии на транспорте. 2022. № 2 (30). С. 53–58. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49489460>.

© М. А. Попков, В. Р. Янгальшев, А. В. Мареев, 2025