

РАЗРАБОТКА СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПРОЦЕССА 3D ПЕЧАТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНСТРУМЕНТОВ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

Куценко М.А., Коровецкий Д.А.

*Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского»,
Владивосток*

Ключевые слова: 3D-печать, компьютерное зрение, искусственный интеллект, детекция дефектов, TensorFlow Lite, Raspberry Pi, активное обучение, контроль качества.

Аннотация: представлена автоматизированная система контроля качества 3D-печати на базе компьютерного зрения и искусственного интеллекта. Система, реализованная на Raspberry Pi 4 с использованием дообученной модели MobileNetV2 (TensorFlow Lite), детектирует дефекты печати в реальном времени и автоматически приостанавливает процесс при критических отклонениях. Архитектура включает модуль захвата видео, детектор дефектов, контроллер принтера с Klipper, веб-интерфейс и модуль активного обучения. Эксперименты подтверждают работоспособность: нейросеть классифицирует основные типы дефектов, веб-интерфейс обеспечивает удалённый мониторинг, механизм активного обучения повышает точность детекции. Система готова к практическому применению для снижения брака и экономии материалов.

DEVELOPMENT OF A SPECIALIZED COMPUTER VISION SYSTEM FOR QUALITY CONTROL IN 3D PRINTING USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE

Kutsenko M.A., Korovetskiy D.A.

Admiral Nevelskoy Maritime State University, Vladivostok

Keywords: 3D printing, computer vision, artificial intelligence, defect detection, TensorFlow Lite, Raspberry Pi, active learning, quality control.

Abstract. This paper presents an automated quality control system for 3D printing based on computer vision and artificial intelligence. Implemented on Raspberry Pi 4 using a fine-tuned MobileNetV2 model (TensorFlow Lite), the system detects printing defects in real-time and automatically suspends the process upon critical deviations. The architecture comprises a video capture module, defect detector, Klipper-integrated printer controller, web interface, and active learning module. Experiments confirm operability: the neural network classifies main defect types, the web interface enables remote monitoring, and active learning improves detection accuracy. The system is ready for practical application to reduce failed prints and conserve materials.

Аддитивные технологии в последние десятилетия продемонстрировали существенный прогресс, превратившись из инструмента прототипирования в полноценный метод производства конечных изделий. Широкое распространение настольных 3D-принтеров сделало технологию доступной для малого бизнеса, образовательных учреждений и частных пользователей. Однако, несмотря на доступность оборудования, вопрос контроля качества процесса печати остаётся недостаточно решённым, особенно в бюджетном сегменте. Большинство доступных 3D-принтеров не оснащены встроенными системами мониторинга, что

вынуждает пользователя либо постоянно контролировать процесс, либо полагаться на удачу. Статистика сообществ пользователей указывает на то, что от пятнадцати до двадцати пяти процентов печатей заканчиваются неудачей вследствие различных дефектов, таких как образование спагетти, сдвиг слоёв, коробление или недоэкструзия. При времени печати от четырёх до двадцати четырёх часов каждая неудача приводит к значительным потерям пластика, электроэнергии и, что наиболее критично, времени.

Существующие решения проблемы можно разделить на три категории. Первая включает открытые платформы типа OctoPrint с плагинами мониторинга, которые не требуют дополнительных затрат, но не предоставляют возможностей детектирования дефектов на основе искусственного интеллекта. Вторая категория представлена облачными сервисами, такими как Obico, которые обеспечивают детекцию дефектов, но создают зависимость от интернет-соединения и требуют регулярной оплаты подписки. Третья категория включает в себя дорогостоящие закрытые системы промышленного уровня, стоимость которых превышает возможности большинства частных пользователей. Таким образом, наблюдается потребность в разработке локальной, недорогой системы мониторинга, способной работать автономно без облачной зависимости и обладающей возможностью самообучения в процессе эксплуатации.

Целью настоящей работы является создание автоматизированной системы контроля процесса 3D-печати, способной в реальном времени обнаруживать дефекты с использованием дообученной модели искусственного интеллекта и методов компьютерного зрения. Система должна анализировать процесс печати путём сравнения фактического результата с ожидаемой трёхмерной моделью и при обнаружении критических отклонений приостанавливать печать для предотвращения брака. Ключевым требованием является обеспечение автономной работы системы без зависимости от облачных сервисов, что гарантирует минимальную задержку обработки и независимость от качества интернет-соединения.

Решение поставленной задачи реализовано путём разработки комплексной системы 3D Print Vision Monitor версии 4.0, архитектура которой построена по модульному принципу на языке программирования Python. В качестве вычислительной платформы выбран одноплатный компьютер Raspberry Pi 4 с операционной системой Raspberry Pi OS, что обусловлено достаточной вычислительной мощностью для запуска нейросетевых моделей, низким энергопотреблением и наличием необходимых интерфейсов подключения периферии. Для захвата изображения использована веб-камера Full HD разрешения с подключением через USB-интерфейс, установленная под оптимальным углом для получения полного обзора области печати. В качестве управляющей платы 3D-принтера применена BigTreeTech Octopus Pro с прошивкой Klipper, обеспечивающая гибкое управление через последовательный порт UART [1]. Настройка оборудования включала прошивку платы управления Klipper путём компиляции исходного кода под процессор платы с последующей записью на microSD-карту, настройку последовательной связи между Raspberry Pi и платой управления, разработку и печать на 3D-принтере крепления камеры из PETG-пластика, обеспечивающего жёсткую фиксацию без вибраций.

Программное ядро системы включает модуль захвата видео, детектор дефектов на базе нейросети TensorFlow Lite, контроллер принтера, веб-интерфейс на фреймворке Flask, базу данных SQLite и модуль активного обучения Active Learning. Основу системы детекции составляет дообученная нейросетевая модель на базе архитектуры MobileNetV2 [2], конвертированная в формат TensorFlow Lite [3] для эффективной работы на одноплатном компьютере [4]. Процесс обучения модели включает сбор датасета из реальных фотографий процесса 3D-печати, разметку изображений по классам дефектов, применение трансферного обучения с использованием предобученной модели, квантование весов для ускорения инференса и конвертацию в формат TFLite. Принцип детекции основан на сравнении фактического изображения с камеры с ожидаемым результатом печати: трёхмерная модель предварительно расслаивается, и каждый слой сравнивается с фотографией реального процесса. Нейросеть анализирует отклонения траектории экструдера, обнаруживая такие аномалии как образование спагетти, сдвиг слоёв, коробление, чрезмерное образование нитей и недоэкструзию. При обнаружении дефекта с уверенностью выше порогового значения система отправляет команду принтеру на паузу, сохраняет снимок в базу данных и формирует уведомление пользователю [5].

Веб-интерфейс предоставляет пользователю дашборд с видеопотоком в реальном времени, статистикой текущей сессии, графиками для анализа трендов дефектов и системных метрик, элементами управления принтером, интерфейсом верификации обнаруженных дефектов для активного обучения и функцией экспорта данных в формат CSV [6]. База данных SQLite хранит историю всех обнаруженных дефектов с метаданными, сессии мониторинга и системные метрики, обеспечивая возможность ретроспективного анализа. Механизм активного обучения позволяет системе улучшаться со временем: пользователь подтверждает или исправляет метки обнаруженных дефектов через веб-интерфейс, после чего эти данные добавляются в датасет для периодического дообучения модели.

Разработанная система представляет собой полнофункциональную демо-версию, находящуюся на завершающей стадии разработки. Основные цели проекта достигнуты: программный код работает стабильно, веб-интерфейс функционирует корректно, нейросеть успешно обнаруживает дефекты и инициирует приостановку печати. Архитектура системы включает модуль захвата видео, детектор дефектов на базе TensorFlow Lite, контроллер принтера, веб-сервер, базу данных и модуль активного обучения. Дообученная модель анализирует каждый кадр и классифицирует его по классам дефектов, при обнаружении критических отклонений система приостанавливает печать и сохраняет данные в базу. Веб-интерфейс предоставляет видеопоток в реальном времени, статистику, графическую аналитику, управление принтером, интерфейс верификации и экспорт данных. Механизм активного обучения обеспечивает способность системы к самообучению через верификацию пользователем обнаруженных дефектов с последующим добавлением подтверждённых данных в обучающий датасет. Ключевые достижения включают стабильно функционирующий код, полнофункциональный веб-интерфейс мониторинга, успешное обнаружение основных типов дефектов нейросетью, автоматическую

паузу при критических дефектах и возможность дообучения модели в процессе эксплуатации. На рисунках 1 и 2 представлены изображения Веб-интерфейса и фрагмент конфигурационного файла config.yaml системы 3D Print Vision Monitor v4.0 с параметрами деморежима, камеры, детектора дефектов и управления принтером

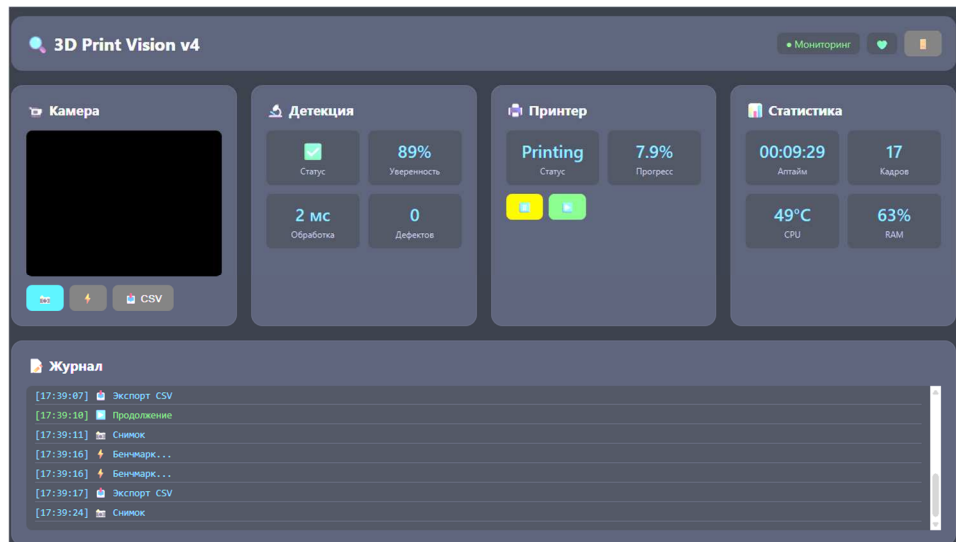


Рис. 1. Веб-интерфейс

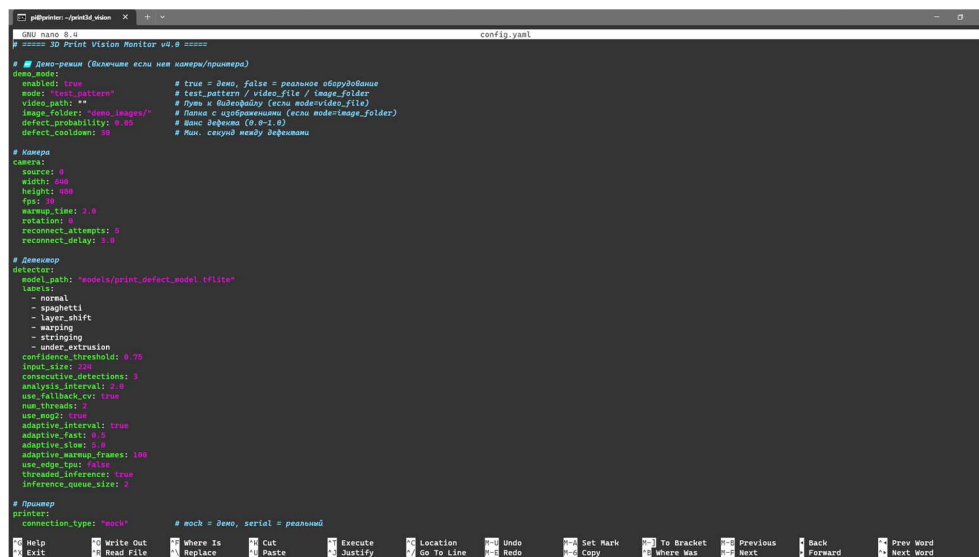


Рис. 2. Пример кода

В результате выполнения работы создана автоматизированная система контроля 3D-печати на базе компьютерного зрения и искусственного интеллекта, успешно решающая поставленную задачу обнаружения дефектов в реальном времени с автоматической приостановкой процесса при выявлении критических отклонений. Разработана и дообучена нейросетевая модель на базе архитектуры MobileNetV2 в формате TensorFlow Lite, реализован механизм сравнения трёхмерной модели с фактическим процессом печати, создан полнофункциональный веб-интерфейс для мониторинга и управления, внедрён механизм активного обучения для постоянного улучшения точности детекции, обеспечена работа на бюджетном оборудовании без зависимости от облачных сервисов. Практическая значимость разработки заключается в снижении количества неудачных печатей, экономии пластика и времени пользователя,

возможности удалённого мониторинга процесса и открытой архитектуре для модификации и расширения. Система находится на завершающей стадии разработки, основной функционал реализован и протестирован, программный код стабилен и готов к практическому применению с возможностью дальнейшего развития в направлении увеличения обучающего датасета, поддержки аппаратных ускорителей искусственного интеллекта, интеграции с дополнительными платформами управления 3D-принтерами и внедрения предиктивной аналитики для предсказания дефектов до их возникновения.

Список литературы

1. Klipper 3D Printer Firmware: API Server Documentation [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.klipper3d.org/API_Server.html.
2. Sandler M., Howard A., Zhu M., Zhmoginov A., Chen L.-C. MobileNetV2: Inverted Residuals and Linear Bottlenecks // Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2018, pp. 4510-4520. DOI: <https://doi.org/10.1109/CVPR.2018.00474>.
3. TensorFlow Lite: Machine Learning for Mobile and Edge Devices [Электронный ресурс] // Google Developers. — URL: <https://www.tensorflow.org/lite>.
4. Raspberry Pi 4 Model B: Technical Specifications [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-4-model-b/>.
5. Paraskevoudis N., Karayannis F., Koukoutsis E. Real-Time 3D Printing Remote Defect Detection (Stringing) with Computer Vision and Artificial Intelligence // Processes. 2020, vol. 8, no. 11, p. 1464. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr8111464>.
6. Settles B. Active Learning Literature Survey // University of Wisconsin-Madison, Computer Sciences Technical Report 1648. 2009, 55 p. URL: <https://burrsettles.com/pub/settles.activelearning.pdf>.

Сведение об авторах:

Куценко Максим Александрович – студент;

Коровецкий Денис Андреевич – к.т.н., заведующий лабораторией "Морской робототехники".