

**Метод калибровки параметров FDM-печати с применением
кросс-поляризации для оценки высоты дорожки**

Молчанов А. О.¹

Научный руководитель – канд. техн. наук, Пантюхин Игорь Сергеевич.¹

¹Университет ИТМО

Molchanov.AO@yandex.ru

Введение

3D-печать на базе послойного наплавления (FDM/FFF) предназначена для быстрого изготовления функциональных деталей. Однако точность и повторяемость геометрии изделий во многом зависит от калибровки параметров экструзии и формирования дорожки. При этом даже при хорошо настроенном принтере итоговые отклонения могут ухудшаться из-за вариативности филамента (производителя, цвета, партии, условий хранения) [1], и изменений физических параметров оборудования и режимов печати (точности и скорости перемещений, подача, температура, настройки слайсера) [2].

Калибровка принтера обычно выполняется итеративно (печать тестовой модели, визуальная оценка оператором, правка параметров, повтор), что имеет большие затраты времени и материалов. Современные решения с техническим зрением в таких системах ориентированы только на выявление критических дефектов и отказов, в то время как оценка высоты или ширины дорожки встречает трудности из-за отражений от пластика, паразитных теней и зависимости RGB-наблюдения от цвета и оптических свойств материала [3].

Одним из путей повышения надёжности оптического контроля может быть применение кросс-поляризации и структурированного освещения, позволяющих исключить зеркальные блики и получать данные на отражающих поверхностях [4]. В данной статье представлен метод калибровки параметров FDM-печати, когда ширина дорожки измеряется по снятию калибровочной башни с использованием кросс-поляризованной оптической системы.

Основная часть

Предложенная конфигурация использует сбоку от области печати камеру и проектор структурированного света, оба снабжённые линейными поляризаторами, ориентированными перпендикулярно друг другу (перекрёстная поляризация). Такая система позволяет существенно уменьшить отражения от полимерной поверхности и сохранить чёткие контуры дорожки с меньшим влиянием текстуры и оптических свойств пластика. Использование структурированного освещения же даёт возможность сформировать устойчивые к внешнему свету условия для измерений.

Калибровка параметров печати проводится поэтапно на специально разработанной калибровочной башне. После печати определённого числа слоёв (один этаж башни), печать приостанавливается, каретка экструдера отъезжает от области печати, после чего сканируется боковая поверхность напечатанного этажа башни. По результатам сканирования определяется фактическая высота дорожки и её отклонение от задаваемой, после чего параметры печати корректируются (в первую очередь коэффициент подачи, а затем при возможности температура, скорость и прочие

характеристики). Далее печатается следующий этаж и цикл повторяется. Так настройка параметров печати заменяется с субъективного процесса в автоматизированный цикл «печать, измерение, коррекция», что позволяет быстрее откалибровать принтер под пластик и уменьшить участие оператора.

При разработке данного метода был изучен ряд современных подходов для сканирования деталей и коррекции в FDM-печати, включая методы контроля экструзии и выявления режимов недостаточной и избыточной экструзии [2], методы визуального и тепловизионного контроля, применяемые при мониторинге и выявлении дефектов [3] и прочие. Выбор наблюдения с использованием поляризованного и структурированного света обоснован его устойчивостью к бликам и отражениям, присущим пластиковым поверхностям [4]. В практической реализации разработана электронная модель сборки и установки системы (камера/проектор/поляризаторы/крепления) с акцентом на постоянной геометрии наблюдения и повторяемой юстировке по отношению к области печати.

Выводы

В ходе работы проведена проверка реализованного метода настройки параметров печати FDM с использованием кросс-поляризации для измерения высоты слоя на основе разработанного метода и проверена устойчивость наблюдения структурированного поляризованного света к бликам на полимерных изделиях. Получены следующие результаты:

1. Определены причины разброса геометрии при FDM-печати одинаковыми пластиками, в том числе вариабельность PLA-филамента и чувствительность результатов к параметрам печати, что подтверждает необходимость частой перенастройки при смене материала/партии;
2. Разработана и смоделирована система бокового контроля (состоящая из камеры, проектора структурированного света и поляризаторов), позволяющая получать воспроизводимые геометрические условия измерения;
3. Предложена методика калибровки «этаж башни, сканирование, компенсация параметров, следующий этаж», позволяющая нацелено компенсировать недоэкструзию и переэкструзию по измерительной высоте слоя, в отличие от основных грубых подходов, настроенных на обнаружение ошибок печати;
4. Отсканированы поверхности печати с оценкой точности определения высоты слоя не хуже $\pm 0,05$ мм, что применимо для практической настройки подачи и устойчивости геометрии.

Литература

1. Andronov V., Beránek L., Krůta V., Hlavůňková L., Jeníková Z. Overview and Comparison of PLA Filaments Commercially Available in Europe for FFF Technology // *Polymers*. 2023. Vol. 15, No. 14. Art. 3065.
2. Li H., Yu Z., Li F., Yang Z., Tang J., Kong Q. Monitoring the extrusion state of fused filament fabrication using fine-grain recognition method // *Journal of Manufacturing Processes*. 2024. Vol. 125. P. 306–320.
3. Ferraris E., Zhang J., Van Hooreweder B. Thermography based in-process monitoring of Fused Filament Fabrication of polymeric parts // *CIRP Annals*. 2019. Vol. 68, No. 1. P. 213–216.
4. Huang X., Wu C., Xu X. et al. Polarization structured light 3D depth image sensor for scenes with reflective surfaces // *Nature Communications*. 2023. Vol. 14. Art. 6855. DOI: 10.1038/s41467-023-42678-5.