

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЗАПОЛНЕНИЯ ПРИ 3D-ПЕЧАТИ МОДЕЛИ НА КАЧЕСТВО ИЗВЛЕЧЕНИЯ ЦИФРОВОГО ВОДЯНОГО ЗНАКА

Д.А. Сукач¹, А.И. Максимов¹

¹Самарский университет, г. Самара
e-mail: maksimov.ai@ssau.ru

Аннотация

В рамках данной работы проводится исследование влияния процента заполнения модели на качество извлечения встроенного в нее цифрового знака. Цифровой знак представляет из себя комбинацию геометрических фигур, распечатываемых на внутренней стороне стенки детали. В работе исследуются различные паттерны и доли заполнения фигуры. Приводятся зависимости мер сходства между эталонными изображениями знака и фотографическими изображениями моделей, а также обсуждаются дальнейшие направления развития исследований.

Ключевые слова: защита изделий 3д печати, цифровые водяные знаки, FDM печать, защита авторского права

Введение

Цифровые водяные знаки (ЦВЗ) давно стали незаменимым инструментом обеспечения защиты авторских прав во множестве сфер, в том числе и в такой прикладной области, как Fused Deposition Modeling (FDM) 3D-печать [1]. FDM-печать – одна из наиболее распространенных технологий 3D-печати, при которой объекты создаются при помощи послойного наплавления термопластиковой нити [2].

Подтверждает утверждение об активном применении ЦВЗ для защиты изделий печати огромное количество работ, опубликованных по данной тематике [3-5]. Наше же внимание привлекли работа [6], в которой предлагается метод на основе добавления в модель меток на внутренней стороне изделия перед печатью. Предложенная концепция крайне проста в имплементации, не требует модификаций G-кода модели и не вносит искажения во внешние слои изделия. Однако, количественный анализ робастности в зависимости от параметров печати для метода не производится. Этот пробел мы решили устранить: в данной статье исследуется зависимость метрики структурного сходства (SSIM) от вида и доли заполнения пустот изделия, а также предложен алгоритм постобработки изображений ЦВЗ для оценки данной величины.

Исследуемый метод встраивания ЦВЗ и оценка качества извлечения

Исследуемый метод подразумевает размещение на внутренней стенке защищаемой модели матрицы (в примере авторов работы — размером 5×5), в каждой ячейке которой находится либо 1 мм выступ, либо пустота. По замыслу авторов оригинального метода подобная матрица представляет собой репрезентацию некоторой битовой последовательности, содержащей сведения, однозначно идентифицирующие авторские права на изделие.

Извлечение знака осуществляется посредством получения снимка изделия на NIR-камеру в контрольном освещении. Дальнейшая оценка извлеченного знака предполагается авторами исходного исследования экспертным образом, так что ни метрики, ни процедуры постобработки изображений авторами не предлагается. В данном исследовании в качестве метрики качества извлечения ЦВЗ используется SSIM.

Также в данной работе предлагается следующий алгоритм постобработки изображений, полученных с NIR-камеры:

1. Обрезка изображения по области интереса.
2. Обработка области интереса: применение билатеральной фильтрации, CLAHE и набора фильтров Габора из 6 ориентаций.
3. Разбиение полученной карты энергии на ячейки матрицы ЦВЗ (в данной исследовании — 5×5).
4. Поярочное сравнение с эталонной ячейкой с подсчетом SSIM.
5. Усреднение значения SSIM по всем ячейкам.

Параметры используемой модели и ее печати

Для исследования нами были изготовлены образцы (также с размером матрицы 5×5 , как и в [7]), внешний вид и размеры которых представлены на рисунке 1. Было изготовлено пять моделей с различной конфигурацией битовой последовательности для получения усредненных результатов.

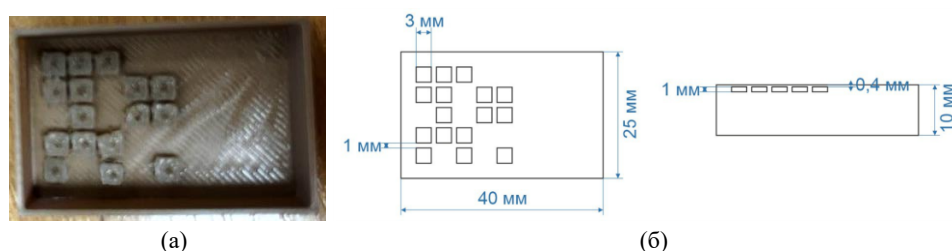


Рисунок 1 – Внешний вид детали без заполнения и задней стенки (а) и чертеж детали (б)

Печать осуществлялась с помощью принтера Flying Bear Ghost 6 со стоковым хотэндом (сопло MK8 0.4 мм, термистор NTC 100K, термоблок мощностью 50 Вт). Подготовка моделей к печати выполнялось в слайсере UltiMaker Cura. В таблице 1 представлены основные параметры, которые были использованы при печати моделей.

Таблица 1 – Параметры печати моделей

Параметр	Тип пластика	Т°С сопла	Т°С стола	Толщина слоя	Толщина дна	Толщина крышки
Значение	PLA	220°С	60°С	0,2 мм	0,4 мм	0,4 мм

Постановка экспериментального исследования

Переменными параметрами в данном исследовании являлись доля и вид заполнения детали. В ходе исследования были получены значения SSIM для долей заполнения в 0, 10, 50 и 90%. При этом исследовались следующие виды заполнения: Grid, Triangles, Cubic, Octet, Concentric, Gyroid, Lightning.

Съемка моделей осуществлялась при помощи камеры AgroCam Geo NIR. Для проведения исследований был собран экспериментальный стенд, представленный на рисунке 2. Его конструкция повторяет стенд из работы [6]: NIR-камера фотографирует модели в одинаковых контролируемых условиях при контрольном освещении.



Рисунок 2 – Внешний вид экспериментального стенда

На данном стенде был получен датасет из 105 изображений (5 моделей $\times$ 3 доли заполнения $\times$ 7 видов заполнения). Размер области интереса на изображениях составлял 75×75 пикселей. Данные изображения были обработаны предложенным в работе алгоритмом, после чего по ним была рассчитана метрика SSIM. Результаты были усреднены по моделям с одинаковыми долями и видом заполнения. Пример поэтапного прохождения изображением постобработки показан на рисунке 3.

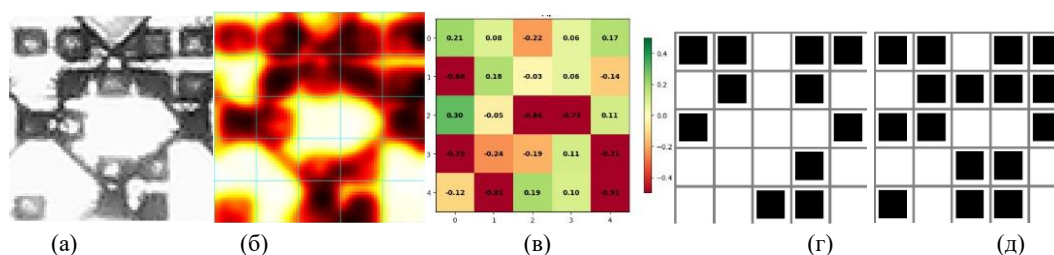


Рисунок 3 – Преобразование изображения по шагам алгоритма постобработки (а-г) и (д) эталонный ЦВЗ

Результаты экспериментального исследования

Полученные в результате экспериментального исследования зависимости представлены на рисунке 4. На нем также отмечены условные границы диапазонов долей заполнения для деталей в различных прикладных областях.

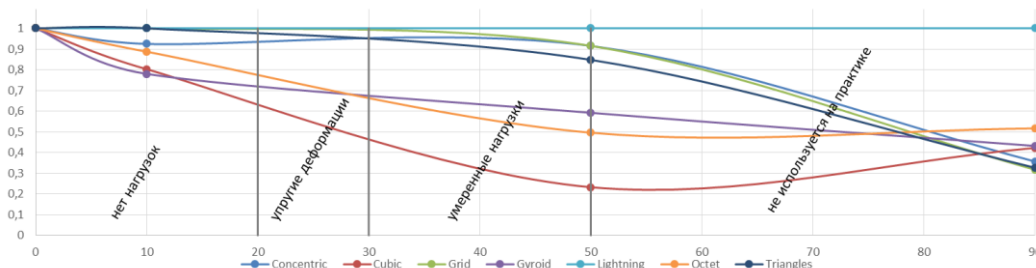


Рисунок 4 – Зависимость метрики SSIM от доли заполнения детали

Следует отметить, что на практике заполнения выше 50% используются крайне редко. В промышленности, например, для обеспечения устойчивости к крайне большим нагрузкам используют поднутрения. Можно заключить, что исследуемый метод и предложенный метод постобработки вполне пригодны для защиты авторских прав.

В качестве продолжения исследований мы рассматриваем изучение влияния прочих параметров печати на извлечение ЦВЗ, а также анализ видов заполнения детали, которые не были охвачены данным исследованием. В планах также исследование возможности извлечения подобных ЦВЗ при помощи тепловизионной камеры при предварительном нагреве или охлаждении модели.

Заключение

В данной работе количественно исследован метод внедрения ЦВЗ для нужд 3D-печати с помощью меток на внутренней стороне изделия. Предложен метод извлечения подобных знаков с количественной оценкой качества. Проведенное экспериментальное подтверждает эффективность предложенных подходов.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №22-71-10097-П, <https://rscf.ru/project/22-71-10097-П/>

Список использованных источников

1. Usama, M. Embedding information into or onto additively manufactured parts: a review of qr codes, steganography and watermarking methods / M. Usama, U. Yaman // *Materials*. – 2022. – V. 15, № 7. – P. 2596.
2. A review on the fused deposition modeling (FDM) 3D printing: Filament processing, materials, and printing parameters / R. B. Kristiawan [et al.] // *Open Engineering*. – 2021. – V. 11. – № 1. – P. 639–649.
3. Blind watermarking for 3-D printed objects by locally modifying layer thickness / A. Delmotte [et al.] // *IEEE Transactions on Multimedia*. – 2019. – V. 22. – № 11. – P. 2780–2791.
4. A 3D printing model watermarking algorithm based on 3D slicing and feature points / G. N. Pham [et al.] // *Electronics*. – 2018. – V. 7. – № 2. – P. 23.
5. Self-embedding watermarking method for G-code used in 3D printing / Z. Li [et al.] // *2021 IEEE International Workshop on Information Forensics and Security (WIFS)*. – 2021. – P. 1–6.
6. Copyright protection for 3D printing by embedding information inside 3D-printed objects / K. Uehira [et al.] // *International workshop on digital watermarking*. – Cham: Springer International Publishing. – 2016. – P. 370–378.

ANALYSIS OF THE EFFECT OF 3D PRINTING INFILL ON DIGITAL WATERMARK EXTRACTION QUALITY

D.A. Sukach¹, A.I. Maksimov¹

¹*Samara University, Samara
e-mail: maksimov.ai@ssau.ru*

Abstract

In this paper, we conduct a study on the influence of the model infill ratio on the extraction quality of a digital watermark embedded within it. The digital watermark consists of a combination of geometric shapes printed on the inner side of the part's wall. We test various patterns and infill ratios during this study. Dependencies of the similarity measures between the reference images of the mark and photographic images of the models are presented, and future directions for research development are discussed.

Keywords: 3D printed items protection, digital watermarks, FDM printing, copyright protection.