

УДК 681.3

DOI: <http://dx.doi.org/10.20535/2219-380414201672548>

Добролюбова М. В.¹, доцент, к.т.н., Шнира А. В.², бакалавр,
Чапалюк Б. В.³, бакалавр, Алімов А. І.⁴, бакалавр

СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ, КОНТРОЛЮ ТА КЕРУВАННЯ ДЛЯ 3D-ПРИНТЕРІВ ТИПУ REPRAP З FDM-ТЕХНОЛОГІЄЮ ДРУКУ

En

The problems of 3D-printing process monitoring, verification and control and the way how to achieve the best results of quality for 3D-printed models by improving the design and software for RepRap3D-printers with FDM printing technology are considered in the article.

The developed subsystem of measuring and control of temperature parameters and subsystem of 3D-printer carriage movement and rotation speed measurement are described.

Subsystems allowed to control the printing process, to correct models at the beginning of their developing and in the preparation of 3D-printer operation, automatically stop printing in the cause of physical object mismatch the digital model.

Thus embedding quality control in the printing process the Japanese approach of Jidoka is applied in the process of printing implementation and distribution of function of people and machines (autonomization). It provides the equipment noninteraction, the ability to distinguish quality details from imperfect ones without operator by means of control card (Shuharta cards). Statistical regulation technology process is carried out by using 8 developed and programmed tests.

In the scope of the subsystem of 3D-printer carriage movement and rotation speed measurement contact and non-contact measurement methods are applied.

In the scope of this thesis the analysis of data classification methods and has been done, basic principles of deep machine learning which are the basis for choosing the optimal classification method for a subsystem of 3D-printer carriage movement measurement have been investigated.

The software has been designed both for the mobile operating system Android and for the personal computer.

In the scope of the monitoring and control system for repprap3D-printer with FDM printing technology a single database of printed models enabled to process data obtained at any level was designed.

Finally, there has been created the recommendation system for 3D-printer setup which could be applied by a user for saving print materials and time for training 3D-printer operator, reducing the number of print experimental models that determine optimal parameters for printing particular model.

¹ Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут", кафедра автоматизації експериментальних досліджень

² Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут", факультет авіаційних і космічних систем

³ Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут", факультет авіаційних і космічних систем

⁴ Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут", факультет авіаційних і космічних систем

Ru Изложены проблемы мониторинга, контроля и управления 3D-печатью и пути достижения лучших показателей качества конечных моделей с помощью усовершенствования конструкции и стандартного программного обеспечения, типовых 3D-принтеров конструкции RepRap с FDM-технологией печати.

Вступ

Швидкий розвиток сучасних технологій сьогодні відкриває багато шляхів подолання традиційних обмежень виробництва перед науковцями та інженерами. Одним з таких способів є 3D-друк, тобто пошарове створення фізичного об'єкту за віртуальною тривимірною моделлю [1-3]. Він надає можливість випробовувати велику кількість ідей, вдосконалювати їх шляхом виправлення помилок моделі на ранніх стадіях проектування без значних фінансових витрат та створювати дуже міцні, стабільні і легко відтворені компоненти, розробляти тільки перспективні проекти.

На теперішній час в Україні на ринку існують три основні види 3D-принтерів, що використовують наступні технології: *SLA* – лазерна стереолітографія; *SLS (Selective Laser Sintering)* – селективне лазерне спікання; *FDM (Fused Deposition Modeling)* – моделювання плавленням – технологія адитивного синтезу, яка будує прототипи і кінцеві вироби пошарово з термопластику інженерного класу [1]. Наразі найбільш популярним методом друку є *FDM*. Принцип його роботи – витратний матеріал (наприклад, пластик) дозовано подається в екструдер, в якому плавиться і тонкою цівкою виходить через сопло. Перший шар пластику лягає на робочу поверхню плити-столу для друку (*print bed*). Наступні шари лягають поверх попереднього. Оскільки гарячий пластик добре склеюється з попереднім шаром – на виході отримується цілісний об'єкт. Але 3D-принтери відрізняються не лише за технологією друку. Вони поділяються на так звані бюджетні (типи *RepRap*, тобто *Replicating Rapid-prototyper* – відновлювальний механізм для швидкого прототипування, – від 300 \$ та *DIY-kit* від 600 \$ до 1000 \$), повністю укомплектовані та одразу готові до безпосередньої роботи (пристрої від *MakerBot*, *Ultimaker*, *Picaso* – від 1000 \$ та вище), комерційні та промислові (сотні тисяч доларів).

Постановка задачі

Через значну кількість параметрів, які впливають на якість надрукованої моделі, для 3D-принтерів з *FDM*-технологією друку створено багато версій стандартного програмного забезпечення (ПЗ) з відкритим вихідним кодом. Однією з найбільш важливих частин такого ПЗ є слайсер – програма, за допомогою якої визначається, як саме 3D-принтер буде

друкувати об'єкт (будується карта роботи принтера для кожного шару). В слайсерах зазвичай присутня величезна кількість параметрів, завдяки яким можна налаштувати процес друку так, щоб фізичний об'єкт найбільш точно відповідав цифровій моделі [1].

Головна проблема полягає в тому, що одразу підібрати необхідні параметри для якісного друку конкретної моделі буває доволі не просто і вимагає від оператора 3D-принтера присутності великого досвіду роботи. В іншому ж випадку необхідно друкувати так звані тестові моделі, на яких перевіряти, як впливають конкретні налаштування на результат друку, що потребує багату часу та достатньо дорогого витратного матеріалу.

Виходячи з вищезазначеної проблематики, актуальним завданням є побудова системи моніторингу, контролю та керування 3D-друком принтерів типу *RepRap* з *FDM*-технологією, яка б включала перелік рекомендацій для користувача по виправленню проблем і дефектів у випадку їх появи в процесі друку, що дозволить значно зекономити матеріальні ресурси підприємства і дасть можливість вивільнити час на розробку нових моделей.

Основна частина

Під час проведення моніторингу 3D-друку на принтері типу *RepRap* з *FDM*-технологією були виявлені та проаналізовані основні фактори, що впливають на точність та якість друку, зроблено їх класифікацію: за кількістю надрукованих деталей; за швидкістю, з якою відбувається друк; за рівнем відповідності фізичного об'єкту цифровій моделі. Це надало можливість визначити основні дефекти друку, які пов'язані з температурними показниками робочої поверхні плити-столу і екструдера (перегрів, роздруковка не прилипає до платформи, загинання) та переміщенням каретки 3D-принтера (прогалини та щілини на поверхнях, видавлювання залишків пластику за межі моделі, утворення павутиння, щілини між наповнювачем та контуром) [4].

Отже, за результатами проведених досліджень було виявлено, що однією з головних проблем, які виникають при друці моделі на типових 3D-принтерах *FDM*-технології та не розв'язуються за допомогою стандартного ПЗ, є невідповідність розмірів роздрукованої моделі розмірам, заданим програмно, та нерівномірне нагрівання робочої поверхні плити-столу і екструдера принтера.

Разом з цим було проведено оцінку якості технологічного процесу, яка показала, що 49,2 % значень вимірянні з перевищенням верхньої границі допуску, а 6,55 % значень виміряна з температурою менше нижньої границі допуску по температурним показникам. Отже, сумарний брак продукції становить 55,75 % [4].

Оскільки ймовірність виникнення дефекту виявилася незадовільною, була розроблена система моніторингу, контролю та керування, яка складається з двох підсистем [4], що забезпечують достатньо високу точність друку та надають можливість уникнути зайвих витрат часу і матеріалу, а саме:

- підсистема вимірювання температури (визначення температури екструдера та температури робочої поверхні плити-столу);
- підсистема вимірювання переміщення каретки принтера.

Підсистема вимірювання температури. У типовому 3D-принтері конструкції *RepRap* використовуються 2 датчики температури. Один з них – це термістор, який вимірює температуру нижньої частини (*hot-end*) екструдера, другий – термістор, що вимірює температуру нагрітої поверхні. В результаті експериментальних досліджень виявлено дефект нагрівання, який полягає у тому, що модель під час друку може охолоджуватися нерівномірно, що призводить до її деформації та невідповідності розмірів надрукованого об'єкту встановленим розмірам віртуальної моделі. Для запобігання вищезазначених проблем та визначення оптимальних параметрів друку моделей головна система 3D-принтера була оснащена додатковими датчиками температури *DS18B20*. Для регулювання температури було оптимізовано конструкцію 3D-принтера і за рахунок нанесення на внутрішню сторону робочої поверхні теплопровідної пасти, до якої прикріплено алюмінієву пластину, та виготовлення корпусу, покритого всередині фольгою. Це забезпечило більш повільне охолодження столу та підтримку температури по всьому об'ємі об'єкту, що друкується.

Окрім модернізації конструкції 3D-принтера виникла потреба і у вдосконаленні ПЗ для керування 3D-друком. Особливістю розробленого ПЗ є те, що у разі виникнення невідповідності фізичного об'єкта цифровій моделі друк припиниться автоматично. При цьому забезпечується створення бази даних з результатами моніторингу 3D-друку (рис. 1).

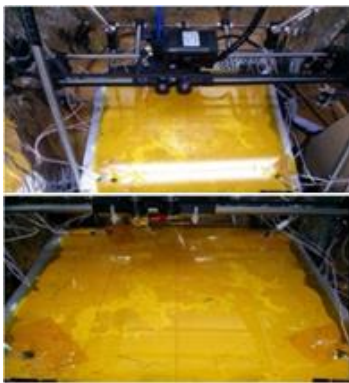


Рис. 1. Підсистема вимірювання температури

Розділ 1. Інформаційні системи

В основу модернізованого ПЗ був покладений найбільш поширений і ефективний з методів статистичного регулювання технологічних процесів – метод з використанням контрольних карт (карт Шухарта), на яких відзначають границю регулювання, що обмежує область допустимих значень, обчислених на підставі статистичних даних [5].

Реалізація статистичного методу регулювання процесу друку здійснюється в три етапи:

- проводиться попереднє дослідження стану процесу і визначається ймовірна частка дефектної продукції, а також індекс відтворюваності;
- будується контрольна карта і вибирається план контролю;
- проводиться статистичне регулювання технологічного процесу.

Статистичне регулювання технологічного процесу проводиться за допомогою 8 тестів, які розроблені та запрограмовані у ПЗ (рис. 2):

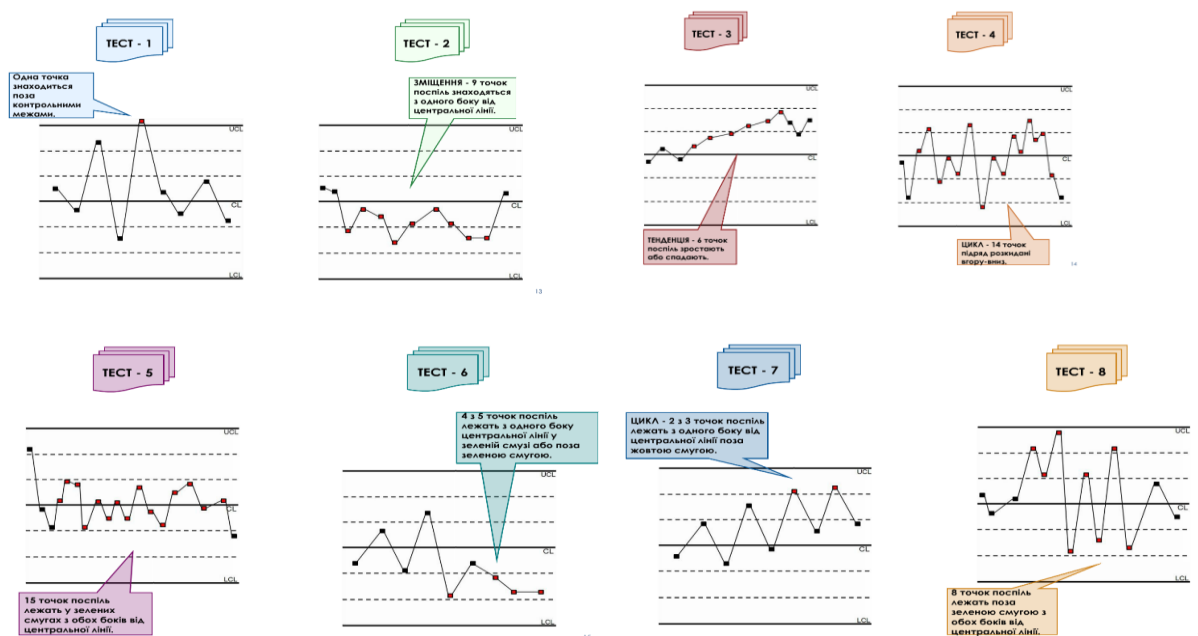


Рис. 2. Вісім тестів статистичного регулювання статистичного процесу

При цьому для вбудовування контролю якості в процес виконання друку і розподілення функції людей і машин (автономізації) застосовано японський підхід Дзидока, який забезпечує автономність устаткування, його здатність відрізнити якісні деталі від дефектних без участі оператора, за допомогою контрольних карт [4].

Отже, за допомогою розробленого ПЗ зазначеної підсистеми можна вимірювати температурні показники у 4 точках робочої поверхні одночасно та відображати їх графічно під час спостереження. При цьому, коли принтер виявляє відхилення за температурними показниками під час друку, то відразу зупиняється і сигналізує про необхідність надання допомоги.

Після стабілізації столу, була проведена додаткова оцінка якості технологічного процесу, яка показала, що сумарна ймовірність браку продукції становить 8,147 %.

Отже, розроблена підсистема дозволяє зменшити похибку вимірювання температурних показників друку до $0,2^{\circ}\text{C}$, а похибку друку до 0,1 мм.

Підсистема вимірювання переміщення та швидкості обертів каретки. В рамках системи моніторингу, контролю та керування також було розроблено підсистему вимірювання переміщення каретки 3D-принтера. Дана підсистема не входить до складу стандартного програмного забезпечення [4]. В її основу покладено використання методу контактних та безконтактних вимірювань необхідних параметрів моделі, з метою їх порівняння та виявлення більш прийняттого для контролю та корегування якості і точності моделі в процесі друку.

Метод контактних вимірювань

У типовому 3D-принтері конструкції *RepRap* використовуються 4 двигуни. З яких 3 відповідають за переміщення каретки по осях X , Y , Z та один за екструджування пластику. При застосуванні методу контактних вимірювань переміщення та швидкості обертів каретки на кожен двигун кріпиться спеціальний датчик кута повороту (механічний, інкрементний енкодер моделі № *EC12-20-20 F-S*) [6]. Такий тип датчика обумовлений тим, що при ввімкненні енкодера, відлік повороту кута починається з нуля, а не з кута, на який він був виставлений до моменту вмикання. Тим самим досягається можливість коректного перетворення величини кута оберту на відстань переміщення каретки 3D-принтера. Осі 3D-принтера і енкодери поєднуються між собою за допомогою спеціальної жорсткої втулки (рис. 3).

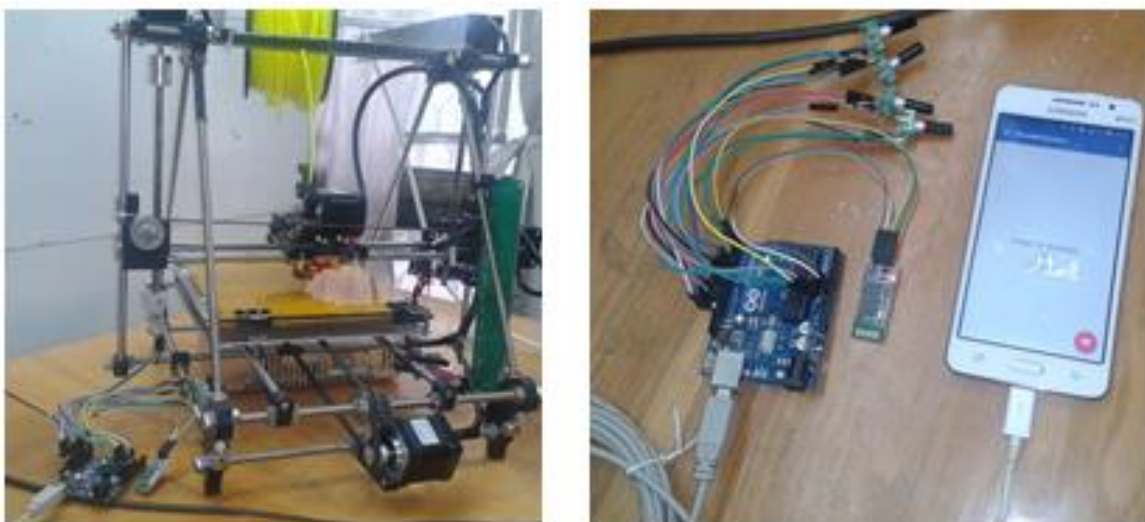


Рис. 3. Підсистема переміщення та швидкості обертів каретки

(метод контактних вимірювань)

З метою більш комфортного відображення процесу друку та виявлених дефектів було розроблена ПЗ для ПК користувача і мобільного пристрою (рис. 4). Додатки показують друк по трьох осях та у вигляді 3D-моделі, при цьому на кожному шарі друку моделі виводиться інформація про фактичні розміри надрукованого шару та про відхилення у разі їх виявлення. При суттєвому відхиленні, друк зупиняється.

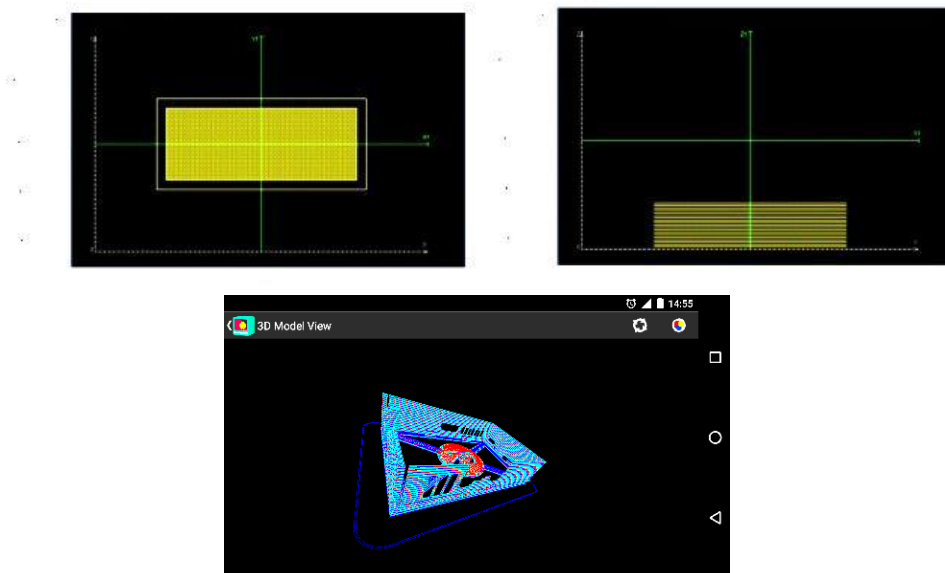


Рис. 4. Відображення надрукованої 3D-моделі у додатку для ПК і мобільного пристрою на *Android OS*

Аналіз даних проводиться при завершенні друку кожного шару моделі. Для статистичного регулювання процесу 3D-друку використано метод контрольних карт. Після застосування підсистеми, була проведена оцінка якості технологічного процесу, яка показала, що сумарна ймовірність браку продукції становить 0,2 %.

Таким чином, завдяки використанню методу контактних вимірювань переміщення та швидкості обертів каретки користувач в процесі друку має можливість отримати точні габаритні розміри об'єкту та порівняти їх з розмірами цифрової моделі. Також на основі цих даних підсистема незалежно фіксує дефекти, зупиняє друк та сигналізує про це. Основним досягненням підсистеми є зменшення похибки друку до 0,4 мм.

Метод безконтактних вимірювань

В рамках системи моніторингу 3D-принтеру також була розроблена підсистема вимірювання переміщення каретки з використанням безконтактних методів вимірювання. При застосуванні методу безконтактних вимірювань переміщення каретки дефекти надрукованої моделі виявляються за допомогою технологій комп'ютерного зору. При

цьому використовуються активно-пiксельнi датчики – це оптичнi датчики, що по своїй сутi є камерами, якi зараз широко розповсюдженi, наприклад, на смартфонах. Такi датчики базуються на сенсорах, створених на комплiментарних структурах метал-оксидний-напiвпровiдник (КМОН), тобто чiпах, побудованих за схемою, в якiй р-канальнi i п-канальнi польовi транзистори використовуються парами i взаємно доповнюють один одного (рис. 5).

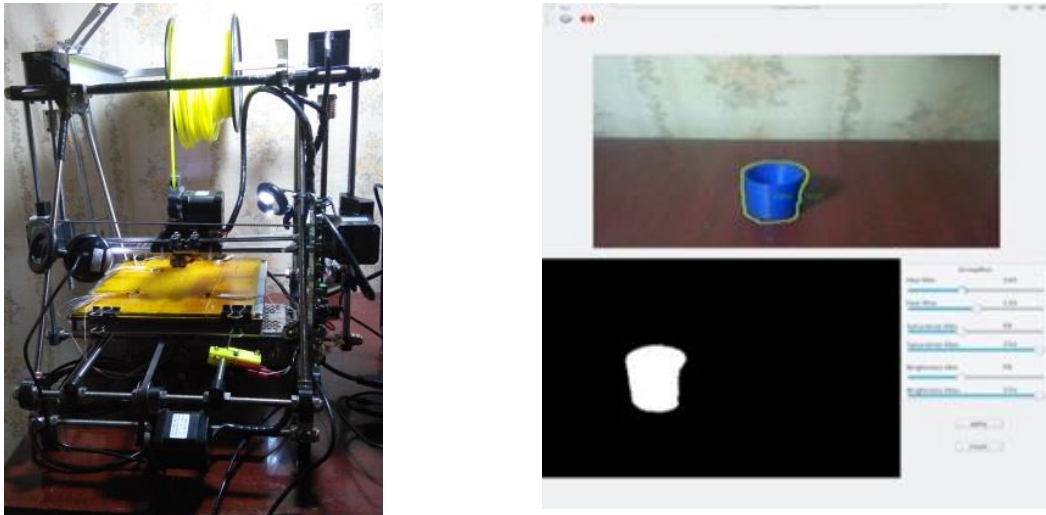


Рис. 5. Підсистема переміщення та швидкості обертів каретки (метод безконтактних вимірювань)

Ідея підсистеми полягає в тому, що необхідно побудувати власний класифікатор, за допомогою якого можна було б з високою ймовірністю класифікувати наявний дефект на деталі, що друкується [7, 8]. Після побудови такого класифікатора стало можливим отримання з високою ймовірністю сигналу про те, що при даному конкретному друці має місце дефект. Це дозволяє удосконалити роботу системи Дзидока, а також зменшити кількість хибних спрацювань системи.

При розробці такої системи комп'ютерного зору була проведена спроба вирішити наступні дві задачі – задачу представлення даних з активно-пiксельного датчика для класифікатора i задачу побудови класифікатора дефектів моделі, що друкується. Для вирішення першої проблеми, було розміщено дві відео камери, за допомогою яких фіксується стан об'єкту під час друку. Перша камера розташована зліва попереду для спостереження стану об'єкту по фронтальній i лівій частинах. Друга камера – позаду праворуч для спостереження задньої i правої частин об'єкту. Завдяки такому розташуванню камер можливо легко спостерігати i перевіряти чи не починає відставати модель від робочої поверхні друку.

Також була введена процедура калібрування камер з метою їх налаштування для роботи з певним кольором пластика. Оскільки принтер, який використовується, вмiє друкувати пластиком лише одного кольору, то з'являється можливість із самого початку орієнтуватися на певний колір

роздрукованої моделі, тобто виділяти об'єкт на зображенні з використанням бінаризації по порогу (для заданого діапазону кольору). Такий підхід дозволяє зменшити похибку детектування моделі, що друкується, а також зменшити вплив шумів на моніторинг дефектів друку.

Після того як весь об'єкт виділено, виокремлюються його контури на основному зображенні з певним запасом (приблизно плюс 10 пікселів) і робиться перетворення вихідного зображення в формат розміром 120×120, яке далі надається на вхід класифікатора. Кожен піксель враховується для класифікації присутності чи відсутності дефекту на об'єкті.

Для побудови класифікатора спочатку був вибраний один із найпростіших методів класифікації – логістична регресія. Це дає змогу, використовуючи сігмоїдну функцію як гіпотезу, передбачити можливість того, що екземпляр даних, поданий на вхід регресії, належить або до класу «1», або ж до класу «0»

$$P(y=1|x) = h_{\theta}(x) = \frac{1}{1 + e^{-\theta^T x}} \equiv \sigma(\theta^T x),$$

$$P(y=0|x) = 1 - P(y=1|x) = 1 - h_{\theta}(x).$$

В підсистемі для мінімізації функції витрат використовується ітеративний алгоритм градієнтного спуску. Для цього, необхідно розраховувати функцію витрат, а також градієнт від функції витрат для кожного вибраного значення θ . Математично у векторній формі градієнт можна записати в наступному вигляді

$$\nabla_{\theta} J(\theta) = \sum_i x^{(i)} (h_{\theta}(x^{(i)}) - y^{(i)}).$$

Завдяки таким розрахункам, просто і легко натренувати класифікатор на задачу класифікації присутності або відсутності дефекту на даному друкованому об'єкті. Але такий підхід виявляється недостатнім, щоб класифікувати всі виявлені в процесі моніторингу дефекти. Тому, було використано так звану Softmax регресію або поліноміальну логістичну регресію, яка є нічим іншим, як загальним випадком логістичної регресії.

При поліноміальній логістичній регресії виникає зацікавленість в мульти-класовій класифікації, тож мітка y може приймати K різних значень. Так, для навчальної множини $\{(x^{(1)}, y^{(1)}), \dots, (x^{(m)}, y^{(m)})\}$ $y^{(i)} \in \{1, 2, \dots, K\}$.

Наприклад, для розробленої підсистеми вимірювання температури є чотири різні класи: 1 – дефект відсутній; 2 – дефект перегріву пластику; 3 – дефект відлипання пластику від робочої поверхні, 4 – дефект, коли шари при друці розділюються і розщеплюються. Подаючи тестове значення x , потрібно, щоб гіпотеза оцінювала ймовірність $P(y=k|x)$, для

кожного значення $k = 1, \dots, K$, де K для даної системи дорівнює 4. Припустимо, що необхідно оцінити ймовірність, з якою вхідний параметр належить до кожного k -го класу. Виходячи з цього, гіпотеза має повертати K -мірний вектор (сума елементів якого дорівнює одиниці), надаючи K оцінок ймовірності. Таким чином, для розробленої підсистеми функція гіпотези прийме вигляд

$$h_{\theta}(x) = \begin{bmatrix} P(y=1|x;\theta) \\ P(y=2|x;\theta) \\ P(y=3|x;\theta) \\ P(y=4|x;\theta) \end{bmatrix} = \frac{1}{\sum_{j=1}^4 e^{(\theta^{(j)})^T x}} \begin{bmatrix} e^{\theta^{(1)T} x} \\ e^{\theta^{(2)T} x} \\ e^{\theta^{(3)T} x} \\ e^{\theta^{(4)T} x} \end{bmatrix},$$

а функція витрат для поліноміальної логістичної регресії

$$\begin{aligned} J(\theta) &= - \left[\sum_{i=1}^m (1 - y^{(i)}) \log(1 - h_{\theta}(x^{(i)})) + y^{(i)} \log h_{\theta}(x^{(i)}) \right] = \\ &= - \left[\sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^K 1\{y^{(i)} = k\} \log(P(y^{(i)} = k | x^{(i)}; \theta)) \right], \end{aligned}$$

де $1\{y^{(i)} = k\}$ – функція індикатор, $1\{true\} = 1$ та $1\{false\} = 0$.

Гradient для алгоритму gradientного спуску матиме наступний вигляд

$$\nabla_{\theta^{(k)}} J(\theta) = - \sum_{i=1}^m \left[x^{(i)} \left(1\{y^{(i)} = k\} - P(y^{(i)} = k | x^{(i)}; \theta) \right) \right].$$

Таким чином, застосування описаного вище математичного апарату дало змогу створити класифікатор, який з високою ймовірністю дає відповідь, чи присутній дефект при друці, а якщо присутній, то конкретно який. Це надає можливість більш точно визначати причину виникнення дефекту та швидше з'ясувати шляхи для запобігання проблеми в майбутньому.

Отже, завдяки застосованим методикам та засобам модернізації конструкції принтера вдалося забезпечити більш якісний друк моделі (рис. 6).

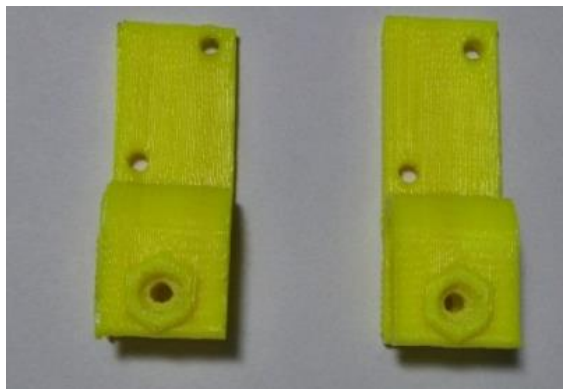


Рис. 6. Зліва надрукована модель без застосування розробленої системи, справа – із застосуванням

Висновки

Розглянуто проблеми, що виникають при друці моделі 3D-принтером типу *RepRap* на основі *FDM*-технології і шляхи їх розв'язання за рахунок розширення можливостей стандартного програмного забезпечення та вдосконалення апаратної частини, що сприяє підвищенню точності 3D-друку.

Завдяки розробленим підсистемам з'явилась можливість контролювати процес друку (мати чітке уявлення про похибки, які при цьому виникають), вносити поправки ще на початковій стадії розробки моделі і при підготовці 3D-принтеру до роботи, автоматично припиняти друк у разі виникнення невідповідності фізичного об'єкта цифровій моделі.

За результатами впровадження розроблених підсистем вдалося побудувати систему рекомендацій, яка допомагає користувачу правильно налаштувати 3D-принтер для друку конкретної моделі, і, тим самим, покращити якість та точність друку і уникнути зайвих матеріальних витрат.

Розроблена система моніторингу стає особливо актуальною при малих обсягах виробництва.

Список використаної літератури

1. Что такое 3D-печать и 3D-принтер // Проект «make-3d.ru». – Режим доступу: <http://make-3d.ru/articles/chto-takoe-3d-pechat/> – Дата доступу: 19.04.16 – Что такое 3D-печать и 3D-принтер.
2. Конструкция *FDM*-принтеров / Илья Холодов. – Режим доступу: http://www.ixbt.com/printer/3d/3d_fdm.shtml – Дата доступу: 22.04.16 – Конструкция *FDM*-принтеров.

3. Reprap wiki. – Режим доступу: http://www.reprap.org/wiki/Main_Page – Дата доступу: 22.04.16 – *Reprap wikipedia*.
4. Шнира А. В. Система моніторингу 3D-принтеру з технологією друку FDM / А. В. Шнира, Б. В. Чапалюк, А. І. Алімов, М. В. Добролюбова // Системи обробки інформації. – 2016. – Вип. 6(143). – С. 180-184.
5. Ефимов В. В. Статические методы в управлении качеством: уч. пособие / В. В. Ефимов. – Ульяновск: УлГТУ, 2003. – 134 с.
6. Datasheet EC12-20-20F-S. – Режим доступу: [http://www.remcomplekt.ru/datasheet/2-pdf/\(72911\)_EC12-20F-N.PDF](http://www.remcomplekt.ru/datasheet/2-pdf/(72911)_EC12-20F-N.PDF) – Дата доступу: 21.04.16 – Datasheet EC12-20-20F-S.
7. Hastie Trevor The Elements of Statistical Learning Data Mining, Inference, and Prediction / Trevor Hastie, Robert Tibshirani, Jerome Friedman. – Second Edition, Springer, 2014 – 764.
8. UFLDL Tutorial. – Режим доступу: <http://ufldl.stanford.edu/tutorial/> – Дата доступу 09.05.2016 – Deep Learning Tutorial.