

Матвій Горбач

Аспірант, науковий керівник Вайганг Г.О.

Національний університет біоресурсів і природокористування України, Київ, Україна

m.horbach@nubip.edu.ua

КОНТРОЛЬ ЯКОСТІ 3D-ДРУКОВАНИХ ВИРОБІВ ЗА ДОПОМОГОЮ КОМП'ЮТЕРНОГО ЗОРУ

Анотація. Комп'ютерний зір революціонізує 3D-друк, забезпечуючи моніторинг в реальному часі, виявлення дефектів, автоматизовану оптимізацію процесів і пост-друкарський контроль у галузях, з тенденціями до гібридних AI-систем, синтетичних даних та мультисенсорної інтеграції для підвищення ефективності та зменшення відходів.

Ключові слова: 3D, AI, VISION.

У сучасному світі адитивне виробництво, або 3D-друк, стає ключовим інструментом для створення складних конструкцій у галузях від аерокосмічної промисловості до медицини. Однак, попри переваги, такі як персоналізація та швидкість прототипування, 3D-друк стикається з викликами у забезпеченні стабільної якості. Дефекти, як-от нерівності шарів, тріщини чи деформації, можуть призвести до відходів матеріалів і браку продукції. Тут на допомогу приходить комп'ютерний зір (computer vision, CV) – технологія, що використовує камери та алгоритми штучного інтелекту для моніторингу та аналізу процесу друку в реальному часі. Цей підхід дозволяє виявляти проблеми на ранніх етапах, оптимізувати параметри та автоматизувати контроль, значно підвищуючи ефективність виробництва.

Комп'ютерний зір інтегрується в процес 3D-друку на кількох рівнях: моніторинг під час друку (in-situ), пост-друкарський аналіз та автоматизоване сортування. Основна ідея полягає в захопленні зображень або відео шарів друку за допомогою камер, їх обробці алгоритмами машинного навчання та порівнянні з цифровою моделлю (CAD-файлом). Це дозволяє не лише виявляти дефекти, але й коригувати параметри принтера в реальному часі, наприклад, швидкість екструзії чи температуру.

Щодо методів застосування комп'ютерного зору, то одним з базових методів є автоматичне виявлення дефектів. Камери фіксують зображення кожного шару, а алгоритми, такі як YOLO (You Only Look Once) від Ultralytics, аналізують їх на наявність аномалій: викривлення, прогалини, невідповідність контурів чи нерівномірну екструзію. Наприклад, система Phase3D використовує структуроване світло для сканування поверхні та порівняння з очікуваним дизайном, виявляючи розбіжності з точністю до мікронів. Це особливо важливо для матеріалів, чутливих до деформацій, як-от полімери чи метали.

Інший підхід – багатоступеневий аналіз зображень. У застосовується моноокулярна сегментація для перевірки висоти з боку та контурів зверху. Алгоритми multi-template matching та iterative closest point (ICP) вирівнюють зображення з моделлю, а Gaussian mixture models кластеризують текстуру для виявлення внутрішніх дефектів, таких як повітряні бульбашки чи нерівності заповнення. Час аналізу одного шару становить менше хвилини, що робить процес quasi-real-time для великих об'єктів.

У фармацевтиці CV застосовується для контролю 3D-друкованих ліків. Дослідження з MDPI демонструє тренування моделей машинного навчання на фотореалістичних віртуальних зображеннях, згенерованих у Blender. Моделі виявляють дефекти, як-от пере- або недовипалення (over-cured/under-cured), тріщини, з точністю до 80% для капсул і таблеток. Використовуються алгоритми Decision Trees та Random Forest для класифікації "добрий/поганий" стан, з препроцесингом через OpenCV (зміна

розміру, градації сірого). Це неструктивний метод, на відміну від традиційних, як NIR-спектроскопія, і дозволяє персоналізоване виробництво в point-of-care.

Пост-друкарський контроль включає розпізнавання та сортування. Система AM-Vision порівнює геометрію готових виробів з CAD-моделлю, автоматизуючи групування для подальшої обробки. У роботизованих системах, описаних у Springer, роботизована рука з CV сортує зразки на розтяг для тестування, виявляючи дефекти з високою швидкістю.

У промислових застосуваннях, як у бетонному 3D-друку, CV витягує текстуру для моніторингу якості елементів, використовуючи алгоритми сегментації для виявлення нерівностей. У медичній сфері це забезпечує точність протезів, а в автомобільній – легких компонентів без дефектів.

Таблиця 1.

Порівняння основних методів CV у контролі якості 3D-друку

Метод	Опис	Переваги	Недоліки	Застосування
Автоматичне виявлення дефектів	Аналіз зображень шарів на аномалії (YOLO, структуроване світло)	Раннє виявлення, реальний час	Висока обчислювальна потужність	Аерокосмічна промисловість [1]
Багатоступеневий аналіз	Сегментація моноокулярних зображень (ICP, GMM)	Виявлення внутрішніх дефектів	Обмежена швидкість для малих принтерів	Відкрите ПЗ для прототипування [2]
Тренування на віртуальних зображеннях	Генерація синтетичних даних (Blender) для ML-моделей	Низька вартість даних, стійкість	Менша точність на реальних варіаціях	Фармацевтика, персоналізовані ліки [3]
Пост-друкарське сортування	Геометричне співставлення з CAD (AM-Vision)	Автоматизація, швидке групування	Потребує точного освітлення	Автомобільна промисловість [4]

У масовому виробництві CV застосовується для шарового моніторингу, де камери та сенсори фіксують процес нанесення шарів у реальному часі, аналізуючи параметри, такі як товщина, текстура та геометрія.

Один з провідних підходів – використання конволюційних нейронних мереж (CNN) для виявлення дефектів. У серійному виробництві CNN інтегруються з системами зворотного зв'язку, дозволяючи автоматично коригувати параметри принтера, наприклад, швидкість лазера чи температуру екструзії. Інший метод – рекурентні нейронні мережі (RNN) для передбачення та оптимізації процесів. RNN аналізують послідовні дані з сенсорів (температура, швидкість головки), прогножуючи потенційні дефекти та рекомендуючи оптимальні налаштування для конкретних матеріалів. Для складніших задач використовуються генеративно-змагальні мережі (GAN), які генерують синтетичні зображення для тренування моделей на великих датасетах без реальних зразків.

Таблиця 2.

Порівняння підходів до роботи з даними від CV

Метод	Опис	Переваги в масовому виробництві	Виклики
CNN	Обробка зображень для виявлення дефектів (фільтри, перцептивні поля)	Швидке розпізнавання поверхневих аномалій (до 95% точності)	Висока потреба в обчислювальній потужності
RNN	Передбачення параметрів на основі послідовних даних	Зменшення простоїв, оптимізація для серій	Потреба в історичних даних
GAN	Генерація синтетичних даних для тренування та дизайну	Зниження витрат на датасети, креативний дизайн	Складність тренування

Сучасні тенденції розвитку CV у 3D-друку спрямовані на інтеграцію з іншими технологіями. По-перше, гібридні системи з AI та IoT які дозволяють проводити 24/7 виробництво з мінімальним наглядом. По-друге, використання синтетичних даних: Як показано в фармацевтичному дослідженні, генерація віртуальних зображень прискорює тренування моделей, зменшуючи витрати на реальні зразки на 90%. Тенденція до фотореалістичних симуляцій (Blender + Python) поширюється на інші галузі, роблячи QC стійким. Третя тенденція – мультисенсорна інтеграція: Комбінація CV з спектроскопією чи ультразвуком для повного 3D-сканування, як у системах для аерокосмічних деталей. Зростає роль edge computing для реального часу обробки на принтері, без хмарних серверів. Четверта – відкриті платформи: Проекти на GitHub, як open-source аналіз шарів, демократизують технологію для малого бізнесу. У 2025 році очікується зростання ринку CV для 3D-друку на 25%, з фокусом на зелені технології (зменшення відходів). Майбутнє цієї сфери лежить у глибокій інтеграції зі штучним інтелектом, переході до контролю в реальному часі та створенні комплексних цифрових двійників. Ці тенденції перетворюють 3D-друк на ще більш надійну та передбачувану технологію, повністю розкриваючи її потенціал для виробництва найскладніших та найвідповідальніших деталей у світі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Актєпе Е., Ергюн У. Підходи машинного навчання для 3D-друку на основі FDM: Огляд літератури // Прикладні науки (MDPI). – 2025. – Т. 15, № 18. – Ст. 10001. – DOI: 10.3390/app151810001. Режим доступу: <https://www.mdpi.com/2076-3417/15/18/10001>.
2. Шайхнаг А. та ін. Тенденції 3D-друку на 2025 рік: Виконавче опитування провідних компаній адитивного виробництва // 3D Printing Industry. – 2025. – Режим доступу: <https://3dprintingindustry.com/news/3d-printing-trends-for-2025-executive-survey-of-leading-additive-manufacturing-companies-236247>.
3. 3D-друк та ШІ: Дослідження впливу машинного навчання на адитивне виробництво [Електронний ресурс]. – ResearchGate, 2025. – Режим доступу: <https://doi.org/10.63623/sfv96y88>.
4. Ройєк І. та ін. Нові застосування машинного навчання в 3D-друку // Прикладні науки (MDPI). – 2025. – Т. 15, № 4. – Ст. 1781. – DOI: 10.3390/app15041781. Режим доступу: <https://www.mdpi.com/2076-3417/15/4/1781>.

MINISTRY OF EDUCATION
AND SCIENCE OF UKRAINE

NATIONAL UNIVERSITY
OF LIFE AND ENVIRONMENTAL
SCIENCES OF UKRAINE

FACULTY OF INFORMATION
TECHNOLOGY

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ
І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
БІОРЕСУРСІВ І
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

ФАКУЛЬТЕТ ІНФОРМАЦІЙНИХ
ТЕХНОЛОГІЙ

PROCEEDINGS

XIII International scientific
and practical conference

**GLOBAL AND
REGIONAL PROBLEMS OF
INFORMATIZATION IN
SOCIETY AND
NATURE USING
'2025**

13-14 November 2025

Kyiv, NULES of Ukraine

Kyiv 2025

МАТЕРІАЛИ

XIII Міжнародної науково-
практичної конференції

**ГЛОБАЛЬНІ ТА
РЕГІОНАЛЬНІ ПРОБЛЕМИ
ІНФОРМАТИЗАЦІЇ В
СУСПІЛЬСТВІ І
ПРИРОДОКОРИСТУВАННІ
'2025**

13-14 листопада 2025 року

Київ, НУБіП України

Київ 2025

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
ФАКУЛЬТЕТ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

МАТЕРІАЛИ

ХІІІ Міжнародної науково-практичної конференції

ГЛОБАЛЬНІ ТА РЕГІОНАЛЬНІ ПРОБЛЕМИ ІНФОРМАТИЗАЦІЇ В СУСПІЛЬСТВІ І ПРИРОДОКОРИСТУВАННІ '2025

13-14 листопада 2025 року

Київ, НУБіП України

Київ 2025

УДК 004

Рекомендовано до друку вченою радою факультету інформаційних технологій Національного університету біоресурсів і природокористування України (протокол № 4 від 18.12.2025).

Укладач: д.т.н., доцент Шкарупило В.В.

Збірник матеріалів XIII Міжнародної науково-практичної конференції "Глобальні та регіональні проблеми інформатизації в суспільстві і природокористуванні '2025", 13–14 листопада 2025 року, НУБіП України, Київ. – К.: НУБіП України, 2025. – 206 с.

Відповідальність за зміст публікацій несуть автори.

© Національний університет біоресурсів
і природокористування України, 2025