

Коротков Сергій Станіславович

Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, м. Київ

ORCID 0000-0002-4090-5934

Кузьміч Ірина Богданівна

Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, м. Київ

ORCID 0000-0001-7439-3343

Лащевська Наталія Олександрівна

Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, м. Київ

ORCID 0000-0003-2148-115X

Волошин Віталій Віталійович

Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, м. Київ

ORCID 0009-0000-2983-8817

ІНТЕГРАЦІЯ КАМЕРИ В СИСТЕМУ FDM-ДРУКУ ДЛЯ ПОКРАЩЕННЯ ЯКОСТІ ДРУКУ

Анотація: Ця стаття присвячена дослідженню можливостей покращення якості FDM-друку (Fused Deposition Modeling) за допомогою інтеграції камери у систему контролю процесу друку. У сучасних технологіях адитивного виробництва FDM-друк є одним з найпоширеніших методів виготовлення 3D-об'єктів завдяки його доступності та широкому спектру використання. Однак, процес часто супроводжується різними дефектами, такими як зміщення шарів, недостатня екструзія, перегрів або недостатнє нагрівання матеріалу, проблеми з адгезією до платформи. Ці недоліки не тільки погіршують якість кінцевого виробу, але й призводять до додаткових витрат часу та матеріалів.

Інтеграція камери в систему FDM-друку пропонує рішення для раннього виявлення дефектів у процесі друку, що дозволяє проводити автоматизоване коригування параметрів друку в режимі реального часу. Камери дозволяють проводити моніторинг процесу на кожному етапі друку, аналізуючи шари матеріалу, їх розміщення та якість поверхні. Алгоритми обробки зображень і машинного навчання дають можливість швидко і точно виявляти дефекти, прогнозувати можливі відхилення від норми та автоматично змінювати параметри друку, щоб уникнути погіршення якості виробу. Окрім автоматичного виправлення параметрів друку, система може пропонувати користувачу конкретні рекомендації щодо покращення налаштувань обладнання в разі виявлення проблем, які неможливо виправити в автоматичному режимі. Такий підхід значно підвищує точність і надійність процесу друку, зменшуючи кількість бракованих виробів і покращуючи продуктивність виробництва.

У статті також розглянуто перспективи подальшого розвитку цієї технології, зокрема використання більш потужних алгоритмів машинного навчання для підвищення точності аналізу та прогнозування дефектів, інтеграцію хмарних технологій для віддаленого моніторингу процесів друку, а також використання нових типів камер (наприклад, інфрачервоних або 3D-камер) для ще точнішого контролю якості. Таким чином, інтеграція камери в систему FDM-друку є важливим етапом у розвитку адитивних технологій, що дозволяє значно підвищити якість друкованих виробів і оптимізувати процес виробництва.

Ключові слова: FDM-друк, адитивні технології, інтеграція камери, обробка зображень, машинне навчання, контроль якості, автоматизація, дефекти друку, 3D-друк, корекція параметрів друку.

Serhii Korotkov

State University of Information and Communication Technologies

ORCID 0000-0002-4090-5934

Iryna Kuzmich

State University of Information and Communication Technologies

ORCID 0000-0001-7439-3343

Natalia Lashchevska

State University of Information and Communication Technologies

ORCID 0000-0003-2148-115X

Vitalii Voloshyn

State University of Information and Communication Technologies

ORCID 0009-0000-2983-8817

INTEGRATION OF A CAMERA INTO AN FDM PRINTING SYSTEM TO IMPROVE PRINT QUALITY

This article explores the possibilities of improving the quality of FDM (Fused Deposition Modeling) printing through the integration of a camera into the print process control system. FDM is one of the most widely used methods in additive manufacturing due to its accessibility and broad range of applications. However, the printing process is often accompanied by various defects such as layer shifting, under-extrusion, overheating or underheating of the material, and adhesion issues with the print bed. These problems not only degrade the quality of the final product but also lead to increased time and material costs.

Integrating a camera into the FDM printing system offers a solution for early defect detection during the printing process, enabling automated adjustments of printing parameters in real time. Cameras allow for continuous monitoring of the print process at each stage, analyzing material layers, their alignment, and surface quality. Image processing algorithms and machine learning techniques facilitate the rapid and accurate identification of defects, predict potential deviations, and automatically modify print parameters to prevent quality deterioration. In addition to automatic parameter correction, the system can provide users with specific recommendations for improving equipment settings if issues are detected that cannot be addressed automatically. This approach significantly enhances the precision and reliability of the printing process, reducing the number of defective products and improving production efficiency.

The article also discusses the future prospects of this technology, including the use of more powerful machine learning algorithms to increase the accuracy of defect analysis and prediction, the integration of cloud technologies for remote monitoring of printing processes, and the use of advanced camera types (such as infrared or 3D cameras) for even more precise quality control. Thus, integrating a camera into the FDM printing system represents a crucial step in the evolution of additive manufacturing technologies, offering significant improvements in the quality of printed products and optimization of the production process.

Keywords: *FDM printing, additive technologies, camera integration, image processing, machine learning, quality control, automation, print defects, 3D printing, print parameter correction.*

Вступ

Технологія 3D-друку за методом FDM (Fused Deposition Modeling) є однією з найбільш популярних завдяки відносній простоті використання та доступності матеріалів. Ця технологія використовується у різних галузях, починаючи від швидкого прототипування та закінчуючи виробництвом малосерійних товарів. Однак, як і будь-яка технологія, FDM-друк має низку проблем, пов'язаних із якістю виготовлення виробів.

Нерівномірне нанесення матеріалу, відхилення в товщині шарів, зсуви або деформації можуть суттєво вплинути на кінцевий результат. Щоб запобігти таким дефектам і забезпечити стабільно високу якість друку, впроваджуються системи моніторингу процесу. Одним із найперспективніших рішень є інтеграція камер для контролю якості на кожному етапі друку.

Використання камер дозволяє спостерігати за процесом у режимі реального часу, виявляти дефекти та автоматично коригувати параметри друку.

Огляд сучасних методів контролю якості FDM-друку

FDM (Fused Deposition Modeling) друк, Рис. 1 – це технологія, яка дозволяє створювати тривимірні об'єкти шляхом накладання шарів матеріалу, зазвичай пластику, один на одного. Як і будь-який інший виробничий процес, якість друку в FDM значною мірою залежить від точності дотримання параметрів процесу і відсутності дефектів на кожному етапі. Тому розробка ефективних методів контролю якості є критично важливою для досягнення високого рівня точності та стабільності.

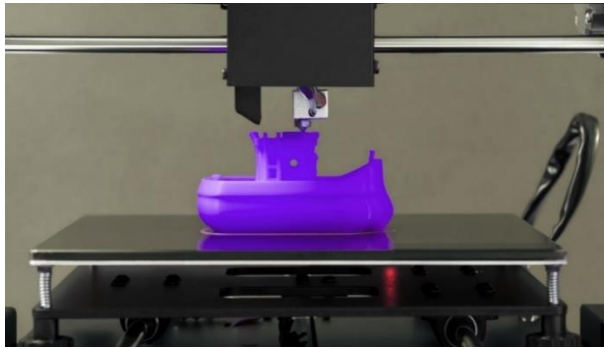


Рис. 1.1. Приклад FDM-друку

До появи систем моніторингу з камерами, основний акцент у контролі якості FDM-друку робився на механічних і програмних підходах, які базуються на параметричних вимірах і аналізі даних.

Один з найбільш простих, але ефективних методів контролю якості полягає у візуальному огляді готового виробу. Оператор може оцінити стан виробу і виявити зовнішні дефекти, такі як:

- Зміщення шарів.
- Нерівномірне нанесення матеріалу.
- Деформації поверхні.
- Неправильне злиття шарів.

Основною перевагою цього методу є його простота і можливість оперативного виявлення грубих помилок. Однак, такий підхід є суб'єктивним і може призвести до упущення дрібних дефектів, які стануть помітними тільки під час використання виробу. Для більш точного та надійного контролю процесу FDM-друку важливо звернути увагу на основне джерело інструкцій для принтера – **G-код**.

G-код є набором інструкцій, які керують рухами екструдера та іншими процесами друку. Певні дефекти можуть бути спричинені помилками в G-коді, такими як неправильні команди на рухи екструдера, непослідовні параметри швидкості або температури.

Аналіз G-коду перед початком друку дозволяє перевірити відповідність усіх команд запланованим параметрам друку. Це можна здійснити за допомогою спеціального програмного забезпечення, яке перевіряє код на наявність помилок або нестиковок. Однак цей метод не може виявити дефекти, які виникають під час друку[5,6], наприклад, через механічні проблеми принтера.



Рис. 2. Температурний датчик для 3D-принтера

Контроль температури, тиску, швидкості подачі матеріалу та інших параметрів за допомогою датчиків є важливим елементом забезпечення якості друку. Наприклад:

- Температурні датчики, Рис. 2 стежать за стабільністю температури нагрівального елемента екструдера, а також платформи друку.
- Датчики швидкості подачі матеріалу, Рис. 3 допомагають контролювати обсяги подачі пластику в екструдер, що особливо важливо для забезпечення рівномірності шарів.

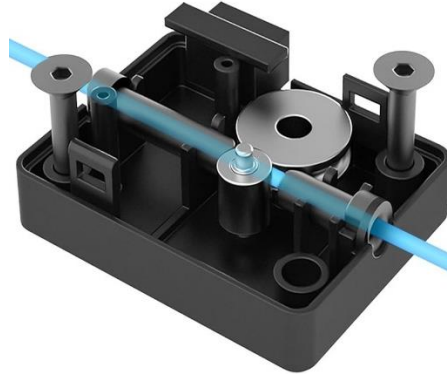


Рис. 3. Датчики швидкості подачі матеріалу для 3D-принтера

Окрім датчиків, деякі системи можуть забезпечувати автоматичний контроль параметрів друку через зворотний зв'язок із сенсорними елементами. Наприклад, зміна температури платформи чи сопла в режимі реального часу може бути виправлена на основі зворотного зв'язку від температурних датчиків. Подібні системи можуть запобігати дефектам, пов'язаним із неправильним температурним режимом.

Ці методи є ефективними для забезпечення контролю фізичних параметрів процесу, однак вони не здатні виявити візуальні дефекти, такі як неправильне нанесення матеріалу або зміщення шарів.[1]

Обґрунтування використання камери у FDM-друці

Інтеграція камер у процес FDM-друку є важливим кроком для підвищення якості та ефективності тривимірного друку. Камери дозволяють здійснювати безперервний моніторинг процесу, виявляти можливі дефекти в реальному часі і автоматизувати контроль якості, що суттєво зменшує кількість браку та оптимізує процес виробництва[4]. У FDM-друці точність нанесення шарів, контроль подачі матеріалу і правильність побудови моделі є ключовими факторами для досягнення високої якості кінцевого виробу, і саме камери дозволяють забезпечити стабільність і точність у цих аспектах.

Однією з основних переваг використання камери у FDM-друці є можливість своєчасного виявлення дефектів у реальному часі. Камери дозволяють безперервно спостерігати за нанесенням кожного шару матеріалу, аналізувати рівномірність нанесення, відстежувати точність рухів екструдера та виявляти будь-які порушення в процесі. Це дозволяє уникнути ситуацій, коли дефект виявляється лише після завершення друку, що потребує переробки всього виробу. Виявлення дефектів, Рис. 4, таких як:

- зміщення шарів,
- деформації через неправильне охолодження,
- нерівномірне нанесення матеріалу, дозволяє негайно втрутитися і скоригувати процес.

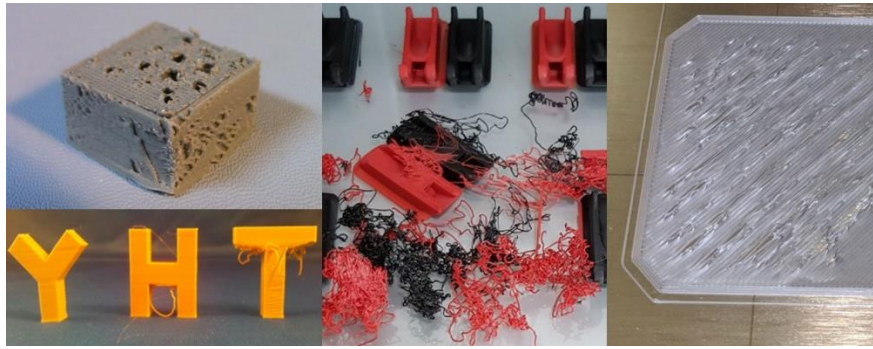


Рис. 4. Дефекти під час 3D-друку

Інтеграція камер із системами комп'ютерного зору дозволяє автоматизувати процес контролю якості. Використовуючи алгоритми машинного навчання або стандартні підходи комп'ютерного аналізу зображень, система може аналізувати знімки об'єктів і порівнювати їх з еталонними моделями або параметрами. У разі виявлення відхилень від заданих норм, система може автоматично зупинити процес друку, повідомивши оператора, або навіть самостійно коригувати параметри друку. Це зменшує вплив людського фактора на якість виробу.

Використання камер надає можливість стежити за процесом друку віддалено через підключення до мережі. Це особливо важливо для великих виробництв або тривалих процесів друку, коли постійна присутність оператора є неефективною. Завдяки камерам можна:

- спостерігати за процесом через смартфон або комп'ютер[3],
- отримувати сповіщення про можливі збої,
- контролювати кілька принтерів одночасно.

Віддалений моніторинг також дозволяє економити час і ресурси, знижуючи потребу у фізичній присутності оператора на місці.

Камери допомагають уникати зайвих витрат на матеріали шляхом своєчасного виявлення дефектів і зупинки процесу друку до того, як буде витрачена велика кількість пластику на виготовлення дефектної деталі. Наприклад, виявлення засмічення сопла або неправильної подачі матеріалу на ранніх етапах дозволяє уникнути витрат і забезпечити максимальне використання матеріалів.

FDM-друк часто використовується для створення виробів, які мають бути точними і міцними. Використання камер дозволяє підтримувати стабільну якість виготовлення, навіть у серійному виробництві або при виготовленні складних моделей. Завдяки автоматизованому моніторингу кожного шару виробу, можна вчасно виявляти будь-які зміщення або відхилення від запланованої моделі.

Камери зменшують навантаження на оператора, оскільки він може зосередитися на інших завданнях, не витрачаючи час на постійний контроль за принтером. Оператору досить отримувати сповіщення у разі виявлення проблем, що дозволяє йому ефективніше керувати кількома принтерами одночасно[7].

Використання камер також може забезпечити можливість детального аналізу процесу друку для майбутніх покращень. Відео процесу друку дозволяє досліджувати проблемні моменти, аналізувати можливі причини дефектів і оптимізувати налаштування обладнання для їх запобігання в майбутньому.

Типи камер для моніторингу FDM-друку

Сучасні камери можуть аналізувати отримані зображення і порівнювати їх із заданими параметрами або 3D-моделями. Використання різних типів камер дозволяє виявляти навіть незначні відхилення від нормального процесу друку, вони дозволяють спостерігати за процесом друку в режимі реального часу і виявляти проблеми на кожному етапі виготовлення.

Для виявлення різних типів дефектів можна використовувати різні типи камер або їх сукупність[2]:

1. Камери з інфрачервоним контролем, Рис. 5.

Інфрачервоні камери використовуються для контролю температури поверхні виробу та рівномірності охолодження. Вони дозволяють виявляти проблеми з термічним режимом, які можуть призвести до деформацій або розшарування шарів. Такі системи особливо корисні при друку великих або складних об'єктів, де температурні коливання можуть мати значний вплив на кінцевий результат.



Рис. 5. Приклад інфрачервоної камери

2. Стандартні веб-камери, Рис. 6.

Найдоступніший варіант для візуального моніторингу. Веб-камери можуть надавати достатню якість зображення для виявлення базових проблем із нанесенням шарів або деформацією. Їх основною перевагою є низька вартість і простота налаштування.



Рис. 6. Приклад веб-камери

3. Камери з високою роздільною здатністю, Рис. 7.

Високоякісні індустріальні камери забезпечують детальний контроль якості друку. Вони дозволяють виявляти дрібні дефекти, які можуть бути невидимими для стандартних веб-камер.



Рис. 7. Приклад камери з високою роздільною здатністю

Крім того, камери можуть бути інтегровані з автоматизованими системами для аналізу зображень, які базуються на машинному навчанні, здатні самонавчатися на великій кількості прикладів ідентифікації дефектів. Вони можуть автоматично аналізувати зображення,

виявляти аномалії і класифікувати дефекти за типами. Це дозволяє не тільки знаходити проблеми, але й прогнозувати можливі дефекти, виходячи з попередніх даних про друк.

Алгоритми для аналізу зображень у fdm-друці

Для забезпечення високої якості FDM-друку, інструменти для аналізу зображень є невід'ємною частиною контролю якості. Камери, що інтегруються в систему друку, дозволяють автоматизувати процес виявлення дефектів шляхом обробки зображень, використовуючи різноманітні алгоритми комп'ютерного зору та відповідне програмне забезпечення.

Основними алгоритмами та методами, які використовуються для контролю якості в FDM-друці, є:

Алгоритм Канні (Canny): один із найпопулярніших алгоритмів для виявлення контурів. Він дозволяє ефективно виділяти чіткі лінії та визначати зміщення шарів або неправильні форми.

Sobel: ще один алгоритм виділення країв, що базується на обчисленні градієнтів інтенсивності пікселів у зображенні. Він корисний для виявлення дефектів, пов'язаних із нерівномірним нанесенням матеріалу або неправильним розташуванням шарів.

Алгоритм Normalized Cross-Correlation (NCC): використовується для порівняння двох зображень шляхом пошуку подібностей між ними. Це корисно для виявлення дефектів, таких як зміщення шарів або нерівності поверхні.

Метод локальних бінарних шаблонів (Local Binary Patterns, LBP) дозволяє аналізувати текстуру шляхом порівняння пікселів з їх сусідами, що дозволяє виявляти відхилення на рівні поверхні[9].

Також для контролю якості в FDM-друці використовуються алгоритми машинного навчання, зокрема нейронні мережі та алгоритми глибокого навчання, набули широкого застосування в аналізі зображень для контролю якості. За допомогою навчання на великій кількості зразків із дефектами та без них, такі системи можуть автоматично розпізнавати різні типи проблем у процесі друку:

Convolutional Neural Networks (CNN): найбільш поширений підхід для обробки зображень, що використовується для виявлення конкретних дефектів, таких як нерівні шари, пропуски або злипання матеріалу[10].

Support Vector Machines (SVM): використовуються для класифікації зображень на основі особливостей, що виділяються під час обробки зображень.

Інтеграція камери в систему fdm-друку

Одним з найважливіших кроків для створення системи контролю якості є інтеграція камери в процес FDM-друку. Від коректного налаштування обладнання залежить точність отримуваних зображень та ефективність виявлення дефектів у реальному часі. Камера повинна бути встановлена таким чином, щоб мати постійний огляд області друку, фіксуючи процес побудови кожного шару та передаючи зображення для аналізу системою машинного зору.

Для ефективного моніторингу процесу друку камера повинна бути встановлена таким чином, щоб мати повний огляд області друку. Оптимальне розташування — це таке, що дозволяє стежити за екструдером та шаром, який формується в режимі реального часу. Існує кілька варіантів розміщення камери, Рис. 8:

Фіксація на рамі принтера. Камера може бути встановлена на фіксованій позиції на рамі принтера, що дозволить слідкувати за всією областю друку.

Кріплення на рухомих частинах принтера. Це дозволяє камері пересуватися разом із екструдером, забезпечуючи детальний огляд безпосередньо за процесом друку.

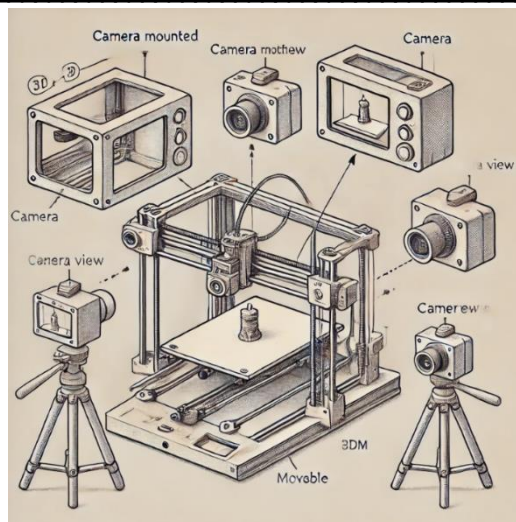


Рис. 8. Приклад інтеграції камери в процес FDM-друку

Важливо забезпечити стійкість камери та відсутність вібрацій під час роботи принтера, оскільки будь-які коливання можуть негативно вплинути на якість зображення та, відповідно, точність виявлення дефектів.

Наступний крок інтеграції в процес FDM-друку камера повинна бути фізично підключена до контролера 3D-принтера або до окремого комп'ютера, що керує процесом друку. Для цього можна використовувати інтерфейси підключення, такі як:

USB: стандартний спосіб підключення для багатьох камер, що забезпечує швидку передачу зображень на комп'ютер або контролер.

Wi-Fi або Ethernet: для бездротового підключення камер і віддаленого моніторингу процесу друку[8].

Обробка та аналіз зображень

Після інтеграції камери до системи 3D-друку зображення, отримані під час процесу, мають бути оброблені для виявлення дефектів та оцінки якості кожного шару. Цей процес включає кілька етапів: передобробку зображень, виділення особливостей та аналіз результатів.

Основні етапи обробки зображень

1. Передобробка зображень: Перед аналізом зображення часто потребують корекції. Зображення, отримані під час друку, можуть мати різну освітленість через зміну освітлення або положення камери. Калібрування допомагає зменшити вплив цих факторів. В процесі друку можливе утворення шуму в зображеннях через вібрації або недоліки обладнання, щою їх запобігти застосовують фільтри, такі як Гаусів фільтр або медіанний фільтр, що допомагають зменшити кількість шумів, також використовуються методи згладжування або підвищення контурів, щоб краще виділити деталі шару або дефекти поверхні.

2. Сегментація зображень: Сегментація полягає у поділі зображення на окремі області, що відповідають різним частинам друкованого виробу, основні методи якої включають: порігову сегментацію (яка відокремлює фон від об'єкта на основі значень яскравості), кластеризація K-середніх (що ефективна для розбиття зображень на кілька кластерів для аналізу кожного сегмента окремо), активні контури (що дозволяє сегментувати об'єкт за допомогою пошуку контурів, що обмежують область друку).

3. Виділення ознак: На цьому етапі відбувається аналіз отриманих сегментів з метою виявлення характерних рис поверхні. Основні ознаки включають:

Форма об'єкта: перевіряється, чи відповідає форма шарів очікуваним параметрам.

Текстура поверхні: може аналізуватися для виявлення нерівностей або інших аномалій, які можуть вказувати на помилки друку.

Кольорові аномалії: у випадку використання кількох матеріалів або кольорів, зміна кольору може вказувати на проблему з екструзією або матеріалом.

4. Аналіз дефектів: Після виділення ознак проводиться порівняння результатів з еталонними значеннями для виявлення дефектів:

Шари з невідповідною висотою або товщиною можуть свідчити про проблеми з екструзією або неправильно налаштовані параметри.

Пропущені сегменти на зображенні вказують на проблеми з подачею матеріалу або збої у роботі екструдера.

Дефекти у вигляді ниток чи відкладень пластику можуть бути виявлені вказувати про проблему у виборі температурного режиму або збої у роботі температурного датчика.

Після аналізу дефектів алгоритм автоматично вносить необхідні корективи в параметри друку, якщо це можливо в режимі реального часу. Якщо ж автоматична корекція неможлива, система надає користувачу рекомендації щодо оптимальних змін у налаштуваннях, які допоможуть покращити якість друку, наприклад, змінити температуру екструдера, швидкість друку чи подачу матеріалу.

Висновки

Інтеграція камери в систему FDM-друку значно підвищує якість друкованих виробів завдяки постійному моніторингу, аналізу зображень і автоматичній корекції параметрів друку в реальному часі. Основні переваги цього підходу полягають у:

1. Ранньому виявленні дефектів: камера дозволяє вчасно ідентифікувати дефекти, такі як зміщення шарів, нерівності поверхні, недоекструзія або переекструзія матеріалу, а також проблеми з адгезією до платформи.

2. Підвищенні точності друку: автоматична корекція параметрів, таких як температура екструдера, швидкість подачі матеріалу та руху головки, допомагає уникнути виникнення дефектів і підвищує якість моделі.

3. Зменшенні втрат матеріалів та часу: своєчасне внесення корекцій мінімізує кількість браку та скорочує потребу в повторному друці, що економить ресурси та час.

4. Автоматизації процесів: система забезпечує зворотний зв'язок у реальному часі, дозволяючи не лише виявляти, але й виправляти помилки без втручання оператора, що підвищує ефективність друку.

5. Можливості використання машинного навчання: алгоритми машинного навчання можуть вдосконалити процес прогнозування та виправлення дефектів, що робить FDM-друк ще більш надійним і точним у довгостроковій перспективі.

Перспективи розвитку інтеграції камери в систему FDM-друку відкривають нові можливості для вдосконалення технології:

1. Розширення функціоналу камер: застосування багатофункціональних камер, зокрема термографічних або 3D-камер, може забезпечити точніший контроль за процесом друку, виявляючи не лише поверхневі, але й внутрішні дефекти виробів.

2. Ширше використання штучного інтелекту: подальший розвиток алгоритмів машинного навчання дозволить більш точно прогнозувати можливі дефекти та автоматично оптимізувати параметри друку під конкретні завдання. Такі системи можуть навчатися на великих наборах даних і краще адаптуватися до різних умов друку.

3. Інтеграція з хмарними технологіями: віддалений моніторинг процесу друку через хмарні сервіси дозволить операторам контролювати якість та вносити корективи на відстані, що буде особливо корисним для великих виробництв або дистанційних процесів.

4. Оптимізація процесів масового виробництва: технології автоматизації та використання камер можуть значно підвищити ефективність масового виробництва за допомогою 3D-друку, оскільки забезпечують високу точність і мінімізацію браку при великих обсягах виробів.

Інтеграція камер у систему FDM-друку продовжить еволюціонувати, підвищуючи рівень автоматизації та точності, що забезпечить подальший розвиток адитивних технологій для різних галузей виробництва й наукових досліджень.

Список літератури

1. Boschetto, A., Bottini, L., & Veniali, F. (2013). Surface roughness prediction in fused deposition modeling by neural networks. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 67(9), 2727-2742.
2. Valino, A. D., et al. (2019). Fused Deposition Modeling 3D printing: Effect of printing parameters on mechanical properties of wood PLA. *Polymers*, 11(4), 755.
3. Górski, F., et al. (2021). Application of artificial intelligence algorithms for quality control in 3D printing. *Procedia CIRP*, 104, 1695-1700.
4. Wang, T., et al. (2022). Computer vision-based defect detection for FDM 3D printing using convolutional neural networks. *Journal of Manufacturing Systems*, 63, 11-21.
5. Ahn, S., et al. (2002). Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS. *Rapid Prototyping Journal*, 8(4), 248-257.
6. Coogan, T., & Kazmer, D. (2017). In-line rheological monitoring of fused deposition modeling. *Journal of Rheology*, 61(1), 141-152.
7. Rahman, A. U., et al. (2021). Recent trends in 3D printing: A review on its applications and research. *Materials Today: Proceedings*, 47(9), 152-162. doi:10.1016/j.matpr.2021.09.172
8. Paul, J., et al. (2020). Fused deposition modeling-based additive manufacturing: Influence of printing parameters. *3D Printing and Additive Manufacturing*, 7(2), 63-78.
9. Tian, X., et al. (2021). Overview of recent advances in fused filament fabrication 3D printing technology. *Polymer Reviews*, 61(4), 679-746.
10. Yang, J., et al. (2023). AI-driven defect detection and correction in additive manufacturing. *International Journal of Mechanical Sciences*, 241, 107926.

References

1. Boschetto, A., Bottini, L., & Veniali, F. (2013). Surface roughness prediction in fused deposition modeling by neural networks. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 67(9), 2727-2742.
2. Valino, A.D., et al. (2019). Fused Deposition Modeling 3D printing: Effect of printing parameters on mechanical properties of wood PLA. *Polymers*, 11(4), 755.
3. Górski, F., et al. (2021). Application of artificial intelligence algorithms for quality control in 3D printing. *Procedia CIRP*, 104, 1695-1700.
4. Wang, T., et al. (2022). Computer vision-based defect detection for FDM 3D printing using convolutional neural networks. *Journal of Manufacturing Systems*, 63, 11-21.
5. Ahn, S., et al. (2002). Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS. *Rapid Prototyping Journal*, 8(4), 248-257.
6. Coogan, T., & Kazmer, D. (2017). In-line rheological monitoring of fused deposition modeling. *Journal of Rheology*, 61(1), 141-152.
7. Rahman, A.U., et al. (2021). Recent trends in 3D printing: A review on its applications and research. *Materials Today: Proceedings*, 47(9), 152-162.
8. Paul, J., et al. (2020). Fused deposition modeling-based additive manufacturing: Influence of printing parameters. *3D Printing and Additive Manufacturing*, 7(2), 63-78.
9. Tian, X., et al. (2021). Overview of recent advances in fused filament fabrication 3D printing technology. *Polymer Reviews*, 61(4), 679-746.
10. Yang, J., et al. (2023). AI-driven defect detection and correction in additive manufacturing. *International Journal of Mechanical Sciences*, 241, 107926.