

УДК 004.8

Казмірчук Я.М., Микитюк М.О., Мазурець О.В.

Хмельницький національний університет

АЛГОРИТМ МАСШТАБУВАННЯ ЗОБРАЖЕНЬ ПРИНТІВ НЕЙРОМЕРЕЖЕВИМИ ЗАСОБАМИ ДЛЯ ТРАФАРЕТНОГО ДРУКУ

Запропоновано нейромережевий алгоритм масштабування зображень текстильних принтів, орієнтований на вимоги промислового трафаретного друку щодо роздільної здатності та чіткості контурів. Алгоритм інтегрується в конвеєр препресу між сегментацією принта та етапами кольороподілу, поєднуючи нормалізацію зображення, виділення «чистої» області принта, суперрезолюцію на основі CNN ESPCN та контурно-орієнтовану постобробку. Експериментальні результати на корпоративному наборі принтів показали суттєве підвищення чіткості дрібних деталей, стабільності контурів і сумісності з подальшими етапами кольороподілу порівняно з класичними методами інтерполяції. Розроблене рішення зменшує залежність від ручного масштабування й ретуші та створює передумови для більш повної автоматизації тракту «цифровий макет – друкарський шар».

A neural network-based algorithm for scaling textile print images is proposed, tailored to the industrial screen-printing requirements for spatial resolution and contour sharpness. The algorithm is integrated into the prepress pipeline between print segmentation and colour separation, combining image normalization, extraction of the “clean” print area, super-resolution via a lightweight ESPCN CNN, and contour-oriented post-processing. Experiments on a corporate print dataset demonstrate a substantial improvement in fine-detail clarity, contour stability, and compatibility with downstream colour separation compared to classical interpolation-based scaling. The proposed solution reduces reliance on manual resizing and retouching and paves the way toward more complete automation of the “digital artwork–printing layer” workflow.

Сучасна текстильна індустрія дедалі активніше переходить до цифровізованих виробничих циклів, у яких ключові етапи препресу мають бути максимально автоматизованими, відтворюваними та незалежними від суб'єктивних рішень оператора [1]. Однією з критичних задач у цьому контексті є масштабування зображень принтів для трафаретного друку [2], оскільки вимоги до роздільної здатності, чіткості контурів та коректності дрібних елементів безпосередньо впливають на якість друкарського шару та стабільність процесу кольороподілу [3]. Традиційні методи масштабування на основі інтерполяції часто не здатні забезпечити достатній рівень деталізації, що ускладнює подальшу підготовку друкарських форм, спричиняє появу артефактів на межах кольорів та потребує значного обсягу ручної ретуші [4].

У цих умовах методи комп'ютерного зору [5], а особливо нейронні мережі для суперрезолюції зображень [6, 7], відкривають можливості якісно нового рівня обробки дизайнерських принтів. Архітектури типу CNN [8] здатні не лише підвищувати номінальну роздільну здатність зображення [9], а й відновлювати структурні особливості текстильних папернів, що є принциповим для технологічної точності трафаретного друку. Глибокі моделі демонструють здатність адаптуватися до різних стилів принтів, зберігати локальні контурні характеристики та мінімізувати спотворення [10], які критичні для подальших етапів кольороподілу.

Перспективи використання нейромережевих підходів у даному напрямку пов'язані з їхньою здатністю формувати стійкі та стандартизовані робочі процеси [11, 12], інтегровані у виробничий конвеєр [13]. Поєднання сегментації принтів, нормалізації, суперрезолюції та контурно-орієнтованої корекції створює основу для комплексної автоматизації препресу, зменшення ризиків браку й оптимізації витрат часу на підготовку друкарських форм [14]. Використання CNN-моделей також відкриває шлях до створення адаптивних систем препресу, що можуть враховувати тип матеріалу, очікувані характеристики друку та специфіку дизайну, забезпечуючи стабільну якість друку незалежно від складності вхідного зображення.

Важливим є і те, що сучасні глибокі моделі [15, 16] здатні враховувати статистичні властивості реальних корпоративних наборів принтів, адаптуючись до стилістичних особливостей конкретного виробництва. Це відкриває можливість створення кастомізованих моделей суперрезолюції [17], які оптимізуються не лише на абстрактні метрики якості, а й на критерії технологічної сумісності зі специфічними процесами кольороподілу та виготовлення трафаретних форм. Відмова від універсальних інтерполяційних методів [18] на користь спеціалізованих нейромережевих рішень [19, 20] дає змогу значно скоротити потребу в ручному коригуванні, зменшити кількість помилок на препрес-етапі та забезпечити прогнозованість результатів друку.

Цифрова підготовка макетів до трафаретного друку висуває жорсткі вимоги до роздільної здатності й чіткості контурів принта: растрові зображення, отримані зі стандартних дизайнів або веб-ресурсів, часто мають недостатню якість для прямого перенесення на друкарські шари. Традиційні методи масштабування (bilinear, bicubic) згладжують дрібні деталі, «розмивають» краї елементів і призводять до втрати дрібного штриха, що безпосередньо позначається на якості трафаретів і збільшує частку ручної дорисовки. Це зумовлює потребу у спеціалізованому алгоритмі масштабування зображень принтів, орієнтованому саме на задачі промислового трафаретного друку та інтегрованому в загальний нейромережевий конвеєр препресу.

Метою роботи є розроблення нейромережевого алгоритму масштабування зображень принтів, який забезпечує збільшення роздільної здатності збереженням різкості контурів і текстурних елементів, узгоджене з технологічними параметрами трафаретного друку (розмір сітки, мінімальна товщина лінії, допуски суміщення).

Алгоритм розглядається як окремий модуль у складі системи автоматизованої підготовки друкарських шарів, що працює після сегментації принта та до етапів кольороподілу й формування трафаретів.

Запропонований алгоритм включає кілька послідовних кроків. На етапі попередньої обробки виконується нормалізація яскравості й кольору, пригнічення шумів та приведення вхідного зображення до уніфікованого робочого формату. Для відокремлення принта від фону тканини використовуються результати попередньої сегментації (нейромережеві моделі класу SAM або аналогічні), що дозволяє працювати з «чистою» областю принта без складок, тіней і сторонніх об'єктів. На цій масці формується набір фрагментів-тайлів із фіксованим розміром, які далі подаються на вхід моделі суперрезолюції.

Ядром алгоритму є легковагова CNN-архітектура типу ESPCN, адаптована до домену текстильних принтів [21]. Мережа навчається відновлювати високороздільні фрагменти принта за їх даунсемпльованими версіями з урахуванням характерних властивостей трафаретної графіки: різких переходів між заливками, наявності дрібного растрового «зерна» та тонких ліній. Для цього формуються навчальні пари «HR–LR» з високоякісних зображень принтів, отриманих у максимально можливій роздільності, після чого до них застосовується контрольоване пониження роздільної здатності з моделюванням типових артефактів (розмиття, JPEG-компресія). Навчання спрямоване на мінімізацію комбінованої функції втрат, що поєднує піксельні метрики (MSE) з структурними показниками подібності, орієнтованими на збереження контуру.

На етапі інференсу зображення принта розбивається на перекривні тайли, кожен з яких проходить через нейромережевий блок суперрезолюції з заданим коефіцієнтом масштабування. Після цього результати збираються в єдине зображення з використанням згладжування в зонах перекриття для уникнення швів. Додатково застосовується контурно-орієнтована постобробка, яка коригує поодинокі спотворення на краях заливок та шрифтових елементів, забезпечуючи технологічно коректні границі для подальшого формування трафаретних масок.

Експериментальна перевірка алгоритму на корпоративному наборі принтів показала, що нейромережева суперрезолюція дозволяє суттєво підвищити візуальну чіткість дрібних деталей і стабільність контурів порівняно з класичними інтерполяційними методами. Масштабовані зображення демонструють кращу сумісність із подальшим кольороподілом і кластеризацією, зменшується потреба у ручній ретуші дрібних дефектів, а відтворюваність дрібного штриха на готових трафаретах підвищується. Інтеграція алгоритму в уже наявний конвеєр препроцесингу, сегментації, кластеризації кольорів та генерації друкарських шарів підтвердила його придатність для роботи в умовах реального виробництва.

Таким чином, розроблений алгоритм масштабування зображень принтів нейромережевими засобами формує спеціалізований інструмент для трафаретного друку, який поєднує доменно адаптовану суперрезолюцію, сегментаційну підтримку та контурно-орієнтовану постобробку. Він зменшує залежність від

ручного масштабування й ретуші, підвищує точність і відтворюваність препрес-процесів, створює передумови для подальшої повної автоматизації тракту «цифровий макет – друкарський шар» у текстильній промисловості. Подальший розвиток пов'язується з розширенням навчального корпусу за рахунок реальних виробничих сцен, впровадженням метризованих критеріїв оцінки якості саме з позицій трафаретного друку та інтеграцією алгоритму з модулями інтелектуального кольороподілу.

Перелік посилань

1. Guidelines for using print production standards. Committee. URL: <https://committee.iso.org/files/live/sites/tc130/files/Resources/Guidelines%20for%20using%20print%20production%20standards%20v2%20Jan%202024.pdf>
2. A Fabric Defect Segmentation Model Based on Improved Swin-UNet with Gabor Filter / H. Xu et al. Applied Sciences. 2023. Vol. 13, no. 20. P. 11386. URL: <https://doi.org/10.3390/app132011386>
3. Adaloglou N., Michels F., Kalisch H., Kollmann M. Exploring the limits of deep image clustering using pretrained models // arXiv preprint arXiv:2303.17896. – 2023. – URL: <https://papers.bmvc2023.org/0297.pdf>
4. Nay D. J. B. Single Image Super Resolution using ESPCN – With SSIM Loss. SSRN Electronic Journal. 2021. URL: <https://doi.org/10.2139/ssrn.3898913>
5. Мазурець О.В., Жарновський О.В., Гладун О.В., Собко О.В. Нейромережеве виявлення фейкових зображень людей. Науковий журнал «Вісник Хмельницького національного університету» серія: Технічні науки. Хмельницький, 2025. №5. Т.1. С. 416-422.
6. Молчанова М.О., Мазурець О.В., Шурипа М.О. Об'єктно-орієнтований підхід до нейромережевого виявлення та відстеження БПЛА з використанням хмарних технологій. Науковий журнал «Наука і техніка сьогодні». Київ, 2025. №9 (50). С. 1346-1360.
7. Мазур С.В., Мазурець О.В., Кліменко В.І., Собко О.В., Залуцька О.О. Алгоритми та програмна архітектура інформаційної системи нейромережевого аналізу постави людини. Науковий журнал «Вісник Хмельницького національного університету» серія: Технічні науки. Хмельницький, 2025. №3. Т.1. С. 275-284.
8. Kok I.A., Kadynska V.D., Zalutska O.O., Mazurets O.V. Object-Oriented Intelligent System for Automated Control of Smoking by Video Data. Current scientific goals, approaches and challenges. Proceedings of IV International Scientific and Theoretical Conference. June 13, 2025. Dresden, Federal Republic of Germany. Pp. 156-164.
9. Bas I.S., Kadynska V.D., Klimenko V.I., Mazurets O.V. Convolutional Neural Network Transfer Learning Method for Aircraft Image Classification. Scientific method: reality and future trends of researching. Proceedings of VI International Scientific and Theoretical Conference. June 6, 2025. Montreal, Canada. Pp. 147-155.
10. Mushtyn O., Sobko O., Molchanova M., Mazurets O. Convolutional Neural Network Architecture for Image-Based Architectural Style Recognition. Evolving Science: Theories, Discoveries and Practical Outcomes. Proceedings of 4th International Scientific and Practical Conference. June 9-11, 2025. Zurich, Switzerland. Pp. 130-143.
11. Malaydakh V., Molchanova M., Shevchuk P., Mazurets O. Deep learning neural network architecture for determining sunflower growth stage from visual data. Modern Scientific Research: Theoretical and Practical Aspects. Proceedings II International Scientific and Practical Conference. May 26-28, 2025. Riga, Latvia. Pp. 143-148.

12. Ostapchenko N., Tyschenko O., Denysenko B., Mazurets O. Semantic search of relevant images using vector databases. Modern Scientific Research: Theoretical and Practical Aspects. Proceedings II International Scientific and Practical Conference. May 26-28, 2025. Riga, Latvia. Pp. 161-165.
13. Dydo R., Sobko O., Klimenko V., Mazurets O. Datalogic structure for intelligent system for areas localization in photos with the remains of buildings using neural network. Modern Scientific Research: Theoretical and Practical Aspects. Proceedings II International Scientific and Practical Conference. May 26-28, 2025. Riga, Latvia. Pp. 123-127.
14. Didur V., Molchanova M., Mazurets O. Research on the effectiveness of neural network detection of plots with the destroyed buildings remains. Modern technologies and science: problems, new and relevant developments. Proceedings XXI International Scientific and Practical Conference. May 26, 2025. Zaragoza, Spain. Pp. 245-251.
15. Hladun O.V., Molchanova M.O., Zalutska O.O., Mazurets O.V. Effectiveness research of using ViT neural network architecture for classifying the destroyed buildings remains. Achievements of Science and Applied Research. Proceedings of 2nd International Scientific and Theoretical Conference. May 19-21, 2025. Dublin, Ireland. Pp. 96-100.
16. Hladun O., Zalutska O., Klimenko V., Mazurets O. Research on the effectiveness of classifying the remains of destroyed buildings using MobileNetV3 neural network architecture. Innovations in Science: From Theoretical Foundations to Practical Impact. Proceedings 1st International Scientific and Practical Conference. May 12-14, 2025. Antwerp, Belgium. Pp. 158-162.
17. Мазурець О.В., Собко О.В., Дидо Р.А., Молчанова М.О., Тищенко О.О. Проєктування структури бази даних для інтелектуальної системи нейромережевого виявлення та локалізації на фотозображеннях ділянок із залишками зруйнованих будівель. Науковий журнал «Наука і техніка сьогодні». Київ, 2025. №4 (45). С. 1242-1258.
18. Молчанова М.О., Дідур В.О., Мазурець О.В., Тищенко О.О., Залуцька О.О. Інформаційна технологія використання хмарних обчислень для класифікації залишків зруйнованих будівель засобами нейронних мереж за візуальними даними з безпілотних літальних апаратів. Науковий журнал «Наука і техніка сьогодні». Київ, 2025. №4 (45). С. 1259-1272.
19. Собко О.В., Кліменко В.І., Мазурець О.В., Залуцька О.О., Гладун О.В. Особливості програмної інженерії та тестування програмного забезпечення для нейромережевого аналізу фотоданих залишків зруйнованих будівель із роботизованої техніки. Науковий журнал «Наука і техніка сьогодні». Київ, 2025. №4 (45). С. 1566-1581.
20. Дідур В.О., Молчанова М.О., Мазурець О.В. Спосіб виявлення та класифікації залишків зруйнованих будівель та будівельного сміття за фотографіями з використанням моделей CNN. Науковий журнал «Наука і техніка сьогодні». Київ, 2025. №1 (42). С. 1162-1175.
21. Дидо Р.А., Мазурець О.В. Метод ідентифікації особистості на основі розпізнавання обличчя в реальному часі для систем кібербезпеки. Інформаційна, функційна і кібербезпека СКІФіК2024. Матеріали IV Всеукраїнської науково-технічної конференції. 29-30 листопада 2024. Харків. 2024. с. 36-37.