

УДК 004.9: 004.032.26

М. А. Солоний, А. А. Яровий, Я. В. Іванчук, В. С. Озеранский

ПЕРСПЕКТИВИ НЕЙРОМЕРЕЖЕВОГО ПІДХОДУ ДЛЯ ЗАДАЧІ ВІДТВОРЕННЯ ПОШКОДЖЕНИХ ПАПЕРІВ

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

Анотація. У наш час, задача відтворення пошкоджених паперів є достатньо актуальною, експерти витрачають години, дні або навіть тижні, на те, щоб відтворити пошкоджені документи, рисунки або інші матеріали, які можуть відіграти роль ключового доказу в кримінальній справі. Автоматизація даного процесу значно підвищить швидкість та якість вирішення даної задачі, тим самим підвищить ефективність роботи експертів-криміналістів. Під час пошуку існуючих рішень, в ході дослідження прямих аналогів виявлено не було, проте знайдено декілька непрямих аналогів, які вирішують досить близькі задачі. Перший аналог – технологія, запропонована вченими Хайфського університету для відтворення пошкоджених археологічних знахідок. Дану технологію успішно випробувано на реальних артефактах Британського музею, що довело її ефективність при відтворенні пошкоджених фресок. Дані результати є перспективними для подальшої розробки інформаційної технології відтворення цілісності пошкодженого документа, зокрема, в контексті повного відтворення структури паперу на основі його мікрорельєфу. Другий аналог – технологія редагування зображень за допомогою карт Кохонена. Дана технологія ефективно виконує базові завдання ретушування зображень, зокрема, видалення об'єктів, відновлення цілісності після видалення. Оскільки дана технологія використовується для обробки зображень, її можна використати як основу для відтворення пошкодженого вмісту документа після його фізичної збірки. Адже під час відновлення структури паперу цілісність вмісту може бути частково втрачена. В даній статті детально проаналізовано кожну з наведених технологій, в тому числі й на рівні математичних моделей, виокремлено їх переваги та недоліки, наведено приклади їх реального застосування. На основі переваг кожної з проаналізованих технологій, запропоновано підхід до вирішення задачі відтворення пошкоджених паперів.

Ключові слова: нейронні мережі, відтворення пошкоджених паперів, криміналістика.

Abstract. Nowadays, the damaged papers restoration task is quite urgent, experts spend hours, days or even weeks to restore damaged documents, drawings or other materials that can play the key role evidence in a criminal case. Automation of this process will significantly increase the speed and quality of solving this problem, thereby increasing the efficiency of the work of forensic experts. During the search for existing solutions, no direct analogs were found, but several indirect analogs were found that solve quite similar problems. The first analog is a technology proposed by Haifa University scientists to restore damaged archaeological finds. This technology was successfully tested on real artifacts of the British Museum, which proved its effectiveness in restoring damaged frescoes. These results are promising for the further development of information technology for restoring the integrity of a damaged document, in particular, in the context of the complete restoration of the paper structure based on its microrelief. The second analog is image editing technology using Kohonen maps. This technology effectively performs the basic tasks of retouching images, in particular, removing objects, restoring integrity after removal. Since this technology is used for image processing, it can be used as a basis for restoration of the damaged content of a document after its physical assembly. After all, during the paper structure restoration, the integrity of the content may be partially lost. In this article, each of the above technologies is analyzed in detail, including at the level of mathematical models, their advantages and disadvantages are highlighted, and examples of their real application are given. Based on the advantages of each of the analyzed technologies, an approach to solving the problem of damaged papers restoration is proposed.

Keywords: neural networks, damaged papers restoration, criminalistics.

DOI: <https://doi.org/10.31649/1999-9941-2022-54-2-55-60>.

Вступ та актуальність

Із розвитком інформаційних технологій активується розвиток різних професійних сфер, в тому числі й сфери криміналістики. Працюючи в цій сфері, фахівці стикаються з різними неординарними задачами, такими як балістичні дослідження, пошук відбитків пальців, відтворення розірваних та пошкоджених паперів. Однією з актуальних задач, що потребують активнішого застосування інтелектуальних інформаційних технологій та автоматизації, є задача відтворення пошкоджених паперів [1]. За результатами спілкування з експертами-криміналістами встановлено, що наразі проблема відтворення пошкоджених паперів вирішується переважно вручну, що займає надто багато часу. Експерти годинами співставляють елементи паперу, співставляючи текстуру, розмір, символи. Автоматизувавши даний процес, можна оптимізувати велику кількість часу та зусиль, збільшити точність відтворення, а також підвищити ефективність роботи експертів-криміналістів [2].

Мета

Метою статті є аналіз сучасних досліджень і підходів до вирішення задачі відтворення пошкоджених паперів та визначення перспектив застосування нейромережевого підходу.

Задачі

1. Проаналізувати існуючі моделі, методи та технології вирішення задачі відтворення пошкоджених об'єктів (паперів).
2. Запропонувати підхід до вирішення задачі відтворення пошкоджених паперів на основі поєднання ключових аспектів проаналізованих технологій.

Аналіз існуючих аналогів

В ході проведеного аналізу літературних та інформаційних джерел прямих аналогів чи досліджень щодо задачі відтворення пошкоджених паперів виявлено не було. Разом з тим, знайдено та проаналізова-

но подібні дослідження, що стосуються задачі відтворення в інших предметних областях (непрямі аналогії). Їх аналіз буде корисним з точки зору доцільності та перспектив застосування нейромережевого підходу у задачі відтворення об'єктів.

Зокрема, учені Хайфського університету, розробили алгоритм відтворення археологічних артефактів за допомогою нейронних мереж. Описаний ними алгоритм базується на чотирьох таких основних підходах [3].

По-перше, щоб вирішити проблему застарілих фрагментів археологічних артефактів, розробники пропонують екстраполювати кожен фрагмент перед повторною збіркою. Цей процес реалізується шляхом створення широкої смуги k -пікселів навколо фрагмента, який включає не лише область, що постраждала від ерозії, але й продовження до наступного фрагмента.

По-друге, пропонується метод вибірки набору реальних перетворень. Мета полягає в тому, щоб екстрапольовані фрагменти були близькі один до одного (щоб ймовірність суміжності була високою), але не перекривалися. Існування збігу (подібності) між двома фрагментами визначається в тому випадку, якщо пікселі вихідних фрагментів не перекриваються після їх накладання. Учені показують, що набір таких перетворень можна описати як простір конфігурації завдань, що, наприклад, часто використовується в робототехніці.

По-третє, – пошук збігів. Розробники намагаються обчислити параметр несхожості для даного перетворення між парою фрагментів. На першому етапі проблема безперервності простору при порівнянні була зведена до узгодження екстрапольованої області частини фрагменту на інший вихідний фрагмент у зоні перекриття. Головна особливість полягає в тому, що колір країв одного фрагмента має збігатися з кольором країв іншого.

По-четверте, – розміщення. Аналізуються проблеми, що стосуються безперервності простору трансформації та загальної форми фрагментів, які в подальшому ефективно усуваються. Крім того, щоб вирішити проблему неточності перетворення (за допомогою вибірки), вибране перетворення уточнюють на невеликій ділянці навколо нього.

Описаний алгоритм учених Хайфського університету було перевірено на реальних об'єктах із колекцій Британського музею та на фресках різних церков по всьому світу. На рис. 1 зображено поетапну візуалізацію роботи алгоритму [3].

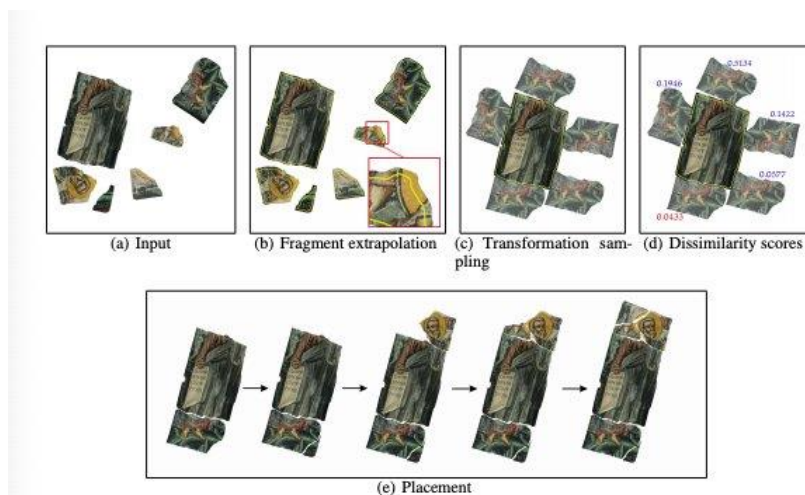


Рисунок 1 – Візуальний приклад роботи алгоритму відтворення археологічних артефактів [3]

Даний алгоритм досить ефективно вирішує задачу відтворення об'єктів, так як містить вирішення багатьох підзадач, включаючи нерівності країв, ерозію та інші можливі пошкодження елементів (в контексті ж задачі відтворення пошкоджених паперів, дуже важливо зберегти максимальну якість контенту, так як навіть деякі маленькі елементи паперів, можуть бути значним речовим доказом).

Інший приклад подібних досліджень є редагування та відтворення пошкоджених зображень. У даних дослідженнях було проаналізовано модель редагування та відновлення зображень за допомогою карти Кохонена [4].

Карта Кохонена є двовимірною мережею $N \times N$, що складається з нейронів. Кожен нейрон у мережі є квадратом $S \times S$ – вектор ваги, значення якого рівні коду кольору відповідного пікселя [4-7].

Для навчання в мережу подаються фрагменти зображення $S \times S$, після чого мережа шукає найбільш схожий на фрагмент нейрон, так званий ВМУ (best matching unit), і коригує його вагові коефіцієнти таким чином, щоб він ще більше був схожий на поданий фрагмент. А потім ще тренує сусідів, але вже із меншою інтенсивністю. Що далі знаходиться нейрон від ВМУ, то менший внесок у нього робить пода-

ний фрагмент. Таким чином мережа навчається доти, доки відхилення ВМУ кожного поданого фрагмента досягне встановленої мінімальної величини.

Алгоритм навчання здійснюється за ітераціями. Нехай t – номер ітерації. Припустимо, що ініціалізація має номер ітерації 0. Далі виконуються такі операції:

1. Обираємо випадковий вектор $x(t)$ із набору вхідних значень.

2. Знаходимо відстань до всіх векторів ваг усіх нейронів карти Кохонена. Для даної операції обирається відповідна міра, в загальному випадку – середньоквадратичне відхилення. Шукаємо нейрон, найбільш близький до вхідного значення [5]:

$$d(x(t), m_c(t)) \leq d(x(t), m_i(t)),$$

де $m_c(t)$ – вектор ваги нейрона “переможця” $M_c(t)$,

$m_i(t)$ – вектор ваги i -го вузла в карті,

$d(x(t), m_i(t))$ – міра відхилення.

В разі, якщо вищевказаному виразу задовольняє декілька нейронів, ВМУ обирається випадковим чином.

3. Визначення міри сусідства нейронів та зміна ваг нейронів у карті Кохонена.

3.1. Обираємо міру сусідства – функцію $h_{ci}(t)$. Дана функція визначає міру сусідства між нейронами M_i та M_c . Зазвичай, в якості функції $h_{ci}(t)$ використовується гаусова функція [5]:

$$h_{ci}(t) = a(t) * \exp\left(-\frac{\|r_c - r_i\|^2}{2\delta^2(t)}\right),$$

де $(0 < a(t) < 1)$ – навчальний співмножник, монотонно спадаючий з кожною наступною ітерацією (тобто, визначається наближення значення векторів ваг ВМУ та їх сусідів, що більше крок, то менше уточнення);

r_i, r_c – координати вузлів $M_i(t)$ та $M_c(t)$ на карті Кохонена;

$\delta(t)$ – множник, що поступово зменшує кількість сусідів з ітераціями (монотонно зменшується).

Параметри a, δ та їх характер зменшення задаються аналітиком.

Більш простий спосіб задання функції сусідства [4-7]:

$$h_{ci}(t) = a(t),$$

якщо $M_i(t)$ знаходиться в околі $M_c(t)$ заздалегідь заданого аналітиком радіусу (в іншому разі – рівна 0).

Функція $h(t)$ дорівнює $a(t)$ для ВМУ та зменшується з віддаленням від ВМУ.

3.2. Обчислення помилки карти

Змінюємо вектор ваг за виразом [4-7]:

$$m_i(t) = m_i(t-1) + h_{ci}(t)(x(t) - m_i(t-1)),$$

Таким чином, усі вузли, що є сусідами ВМУ, наближаються до розгляду.

4. Вибір зупинки.

Для визначення критерію зупинки в більшості випадків використовується помилка карти, наприклад, як середня арифметична відстань між спостереженнями та векторами ваги відповідних їм ВМУ [6]:

$$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \|x_i - m_c\|,$$

де N – кількість елементів набору вхідних даних.

Виходячи з описаного вище, можна виділити такі елементи для моделювання системи відновлення мультимедійних даних:

1) X – вектор спостережуваних даних. У відновленні мультимедійної інформації це може бути певний набір пікселів (семплів, набір блоків стиснення зображень), згрупованих за певним правилом.

2) m – вектор ваги нейрона. За визначенням, має бути однієї розмірності c^x .

3) $h_{ci}(t)$ – міра сусідства нейронів. Деяка функція, що повертає відстань між нейронами і залежить від номера ітерації t . За певних умов може визначати і топологію поверхні.

4) $d(x(t), m_c(t))$ – міра відхилення, що вказує наскільки вектор $x(t)$ "не схожий" на вектор $m_i(t)$.

Таким чином, якщо в моделі визначені вищезазначені елементи, то в цій моделі можна використовувати карти Кохонена, що самоорганізуються, для відновлення пошкоджених ділянок даних. Для підвищення якості редагування зображень, також учені пропонують використовувати попередню сегментацію. Сегментація кольорового зображення організована як кластеризація за допомогою самоорганізованих карт, функцій з нечіткими мірами або за допомогою самоорганізованих карт R-дерева. Зображення як набір пікселів або інші структурні елементи зазвичай не можуть бути представлені як вхідний вектор у саморганізованих картах. Геометричні варіації, такі як переходи, обертання, масштабування за різних умов освітлення, є надзвичайно широкими та різноманітними. На рис. 2 зображено приклад роботи даної технології [7].

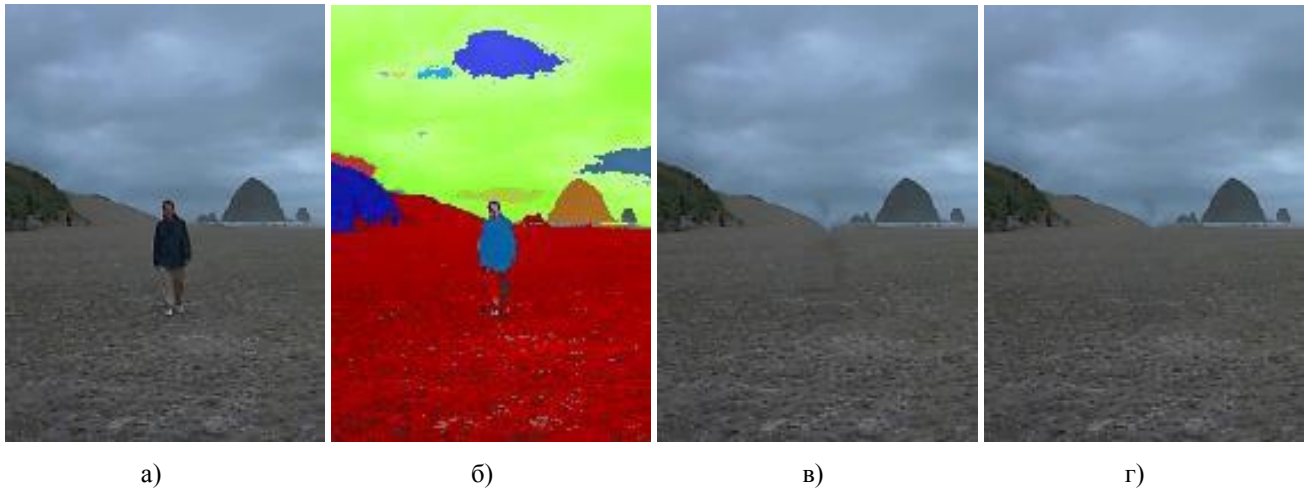


Рисунок 2 – (а) початкове зображення; (б) сегментоване зображення; (в) відредатоване зображення за допомогою карт Кохонена; (г) відредатоване зображення за допомогою карт Кохонена з попередньою сегментацією [7]

Висновок

На основі аналізу результатів досліджень задачі відтворення в інших предметних областях виділено декілька важливих аспектів, які певною мірою є актуальними при вирішенні задачі відтворення пошкоджених паперів.

По перше, стосовно технології відтворення пошкоджених археологічних знахідок. Застосовані тут рішення вирішують задачу знаходження співпадінь частин об'єктів навіть при умові, що фрагменти об'єкта так чи інакше пошкоджені ерозією, вицвітанням та іншими природними факторами. Використання області k -пікселів з подальшим екстраполюванням та пошуком співпадінь на основі кольору та неперервності країв є перспективним при вирішенні задачі відтворення цілісності форми паперу. Проте, залишається проблема втрати цілісності вмісту, що відображений на папері, а також проблема затертості, пошкодження мікрорель'єфу поверхні паперу, що може зробити текст нечитабельним.

По друге, для вирішення задачі втрати цілісності та якості вмісту паперу, є перспективним використання карт Кохонена, що розглядається на прикладі задачі відтворення та редагування зображень. Так як нейромережа на основі карт Кохонена шукає нейрони, які найбільше схожі до шуканого фрагмента, – це дозволяє максимально точно відтворити контент, що постраждав внаслідок пошкодження паперу. Використання карт Кохонена є перспективним для відтворення пошкодженого контенту документа після його збірки, що може забезпечити експертам краще опрацювати отриманий матеріал в подальшому.

Таким чином, об'єднавши ключові аспекти проаналізованих досліджень задачі відтворення в інших предметних областях, зроблено висновки щодо подальших досліджень в контексті розробки інформаційної технології задачі відтворення пошкоджених паперів. Перспективою застосування такого інтегрованого підходу є важливі переваги, а саме – не тільки відтворення пошкодженої структури паперу, але й збереження контенту, що може бути спотворений в результаті порушення цілісності текстури матеріалу паперу.

Список літератури

- [1] М. А. Солоний, А. А. Яровий, "Перспективи застосування технологій нейронних мереж для задачі відтворення пошкоджених паперів," у *Збірник матеріалів Всеукраїнської науково-практичної конференції "Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи (МН-2021)"*, (Вінниця, 01–14 травня 2021 р.). Вінниця, Україна: ВНТУ, 2021, с. 1-2. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/mn/mn2021/paper/viewFile/13252/11113>. Дата звернення: Травень 10, 2022.
- [2] М. А. Солоний, А. А. Яровий, "Аналіз інтелектуальних технологій в контексті задачі відтворення пошкоджених паперів," у *Збірник матеріалів Всеукраїнської науково-практичної конференції "Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи (МН-2022)"*. Вінниця, Україна: ВНТУ, 2022, с. 1-3. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/mn/mn2022/paper/viewFile/16337/13751>. Дата звернення: Травень 10, 2022.
- [3] SOLVING ARCHAEOLOGICAL PUZZLES. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://arxiv.org/pdf/1812.10553.pdf>. Дата звернення: Травень 10, 2022.
- [4] KOHONEN SELF-ORGANIZING MAPS. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://towardsdatascience.com/kohonen-self-organizing-maps-a29040d688da>. Дата звернення: Травень 10, 2022.
- [5] Self Organizing Maps – Kohonen Maps. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.geeksforgeeks.org/self-organising-maps-kohonen-maps/>. Дата звернення: Травень 10, 2022.
- [6] A multiscale neural network method for image restoration. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://tema.sbmacc.org.br/tema/article/download/179/118>. Дата звернення: Травень 10, 2022.
- [7] Image inpainting based on self-organizing maps by using multi-agent implementation. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050914012186>. Дата звернення: Травень 10, 2022.

Стаття надійшла: 18.05.2022.

References

- [1] M. A. Soloniy, A. A. Yarovi, "Perspektyvy zastosuvannya tekhnolohii neironnykh merezh dlia zadachi vidtvorennia poshkodzhennykh paperiv," u *Zbirnyk materialiv Vseukrainskoi naukovo-praktychnoi konferentsii "Molod v nauksi: doslidzhennia, problemy, perspektyvy (MN-2021)"*, (Vinnytsia, 01–14 travnia 2021 r.). Vinnytsia, Ukraina: VNTU, 2021, s. 1-2. [Online]. Available: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/mn/mn2021/paper/viewFile/13252/11113>. Accessed on: May 10, 2022 [in Ukrainian].
- [2] M. A. Soloniy, A. A. Yarovi, "Analiz intelektualnykh tekhnolohii v konteksti zadachi vidtvorennia poshkodzhennykh paperiv," u *Zbirnyk materialiv Vseukrainskoi naukovo-praktychnoi konferentsii "Molod v nauksi: doslidzhennia, problemy, perspektyvy (MN-2022)"*. Vinnytsia, Ukraina: VNTU, 2022, s. 1-3. [Online]. Available: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/mn/mn2022/paper/viewFile/16337/13751>. Accessed on: May 10, 2022 [in Ukrainian].
- [3] SOLVING ARCHAEOLOGICAL PUZZLES. [Online]. Available: <https://arxiv.org/pdf/1812.10553.pdf>. Accessed on: May 10, 2022.
- [4] KOHONEN SELF-ORGANIZING MAPS. [Online]. Available: <https://towardsdatascience.com/kohonen-self-organizing-maps-a29040d688da>. Accessed on: May 10, 2022.
- [5] Self Organizing Maps – Kohonen Maps. [Online]. Available: <https://www.geeksforgeeks.org/self-organising-maps-kohonen-maps/>. Accessed on: May 10, 2022.

- [6] A multiscale neural network method for image restoration. [Online]. Available: <https://tema.sbmac.org.br/tema/article/download/179/118>. Accessed on: May 10, 2022.
- [7] Image inpainting based on self-organizing maps by using multi-agent implementation. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050914012186>. Accessed on: May 10, 2022.

Відомості про авторів

Солоний Максим Андрійович – аспірант кафедри комп'ютерних наук.

Яровий Андрій Анатолійович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри комп'ютерних наук.

Іванчук Ярослав Володимирович – доктор технічних наук, доцент, професор кафедри комп'ютерних наук.

Озеранський Володимир Сергійович – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри комп'ютерних наук.

M. A. Solonyi, A. A. Yarovy, Y. V. Ivanchuk, V. S. Ozeranskyi

PROSPECTS OF NEURAL NETWORK APPROACH TO THE PROBLEM OF DAMAGED PAPERS RESTORATION

Vinnitsia National Technical University, Vinnitsia