



ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ СИСТЕМИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ

ГЕНЕРАЦІЯ ТА РОЗПІЗНАВАННЯ ФРАКТАЛЬНИХ КАМУФЛЯЖНИХ СТРУКТУР З ВИКОРИСТАННЯМ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ

О. Юнак [ORCID: 0000-0003-1698-473X], М. Климаш [ORCID: 0000-0003-2867-1482], І. Демидов [ORCID: 0000-0002-1221-3885]

Національний університет “Львівська політехніка”, вул. С. Бандери, 12, Львів, 79013, Україна

Відповідальний за рукопис: Остап Юнак (e-mail: ostep.yunak@gmail.com).

(Подано 21 Червня 2024)

В роботі розглядається метод генерації фрактальних камуфляжних структур (сіток) за допомогою рандомізованої системи ітераційних функцій. В даний метод закладена можливість змінювати основу структури (вид сітки), це в свою чергу дасть можливість визначати параметри, за допомогою яких даний об'єкт можна буде ідентифікувати, як фрактальну камуфляжну сітку. В математичному описі удосконаленої РСІФ введено параметри діапазон кольорів (набір кольорів), який дозволить підлаштовувати фрактальну структуру до кольорів ландшафту, де буде застосовуватися камуфляжна сітка. Вибір кольорів для генератора фрактальних камуфляжних сіток є критичним аспектом, який впливає на ефективність маскування. Використання декількох відтінків, які відповідають природним кольорам оточення, дозволяє створювати камуфляжні структури, що майже неможливо відрізнити від реальних об'єктів на місцевості. Такий підхід забезпечує високу ступінь приховання та зменшує ймовірність виявлення замаскованих об'єктів навіть за допомогою сучасних сенсорних систем. Запропонована генерація на базі даного методу дозволить сформувати масив інформації для навчання нейронної мережі. Навчина нейронна мережа зможе визначити геометричні параметри камуфляжної структури. Ці параметри можна буде використати для ідентифікації об'єкта, який прихований під фрактальною камуфляжною структурою. Розглянутий метод генерації дозволяє автоматизувати процес навчання нейронної мережі, що значно прискорює процес навчання, та зменшує пошук навчальних даних. Запропонований підхід дозволяє значно знизити ризик людських помилок та підвищує оперативність і ефективність військових операцій. Висока точність і адаптивність фрактального камуфляжу, згенерованого за допомогою удосконаленої РСІФ та нейронних мереж, робить цей метод перспективним для широкого впровадження у військових технологіях.

Ключові слова: *фрактал, фрактальний камуфляж, нейронна мережа, розпізнавання фрактальних камуфляжних структур, рандомізована система ітераційних функцій (РСІФ).*

1. Вступ

Тактична розвідка з використанням малих безпілотних літальних апаратів стала звичайним військовим сценарієм. Однак, оскільки їхні сенсорні системи зазвичай обмежуються елементарним

візуальним або тепловізійним спостереженням, виявлення замаскованих об'єктів може бути особливо складним завданням [1-3].

Фрактальний камуфляж - це метод приховування об'єктів, в якому зовнішній вигляд об'єкта підлаштовується до природного оточення за допомогою геометричних патернів, що нагадують фрактали (наприклад, гірські вершини, ліс, хмари тощо). Це може ускладнити процес виявлення об'єктів навіть для сучасних сенсорних систем.

Виклики і обмеження:

Підвищена складність розпізнавання: Процес розпізнавання власних об'єктів може бути складним і вимагати спеціальних знань та інструментів [4-5].

Ризик помилок: Якщо ідентифікаційні засоби пошкоджені або втрачені, це може призвести до неправильного розпізнавання[6-7].

Необхідність підтримки інфраструктури: Збереження та підтримка інфраструктури для замаскування та розпізнавання може вимагати додаткових ресурсів [8].

Усупереч викликам, замаскування та розпізнавання на власних засадах залишаються важливими елементами тактичної розвідки та військових операцій для забезпечення безпеки та стратегічної переваги.

Розробка методу генерування та розпізнавання фрактальних камуфляжних об'єктів за допомогою нейронних мереж та його інтеграція в інформаційну систему спеціального призначення (ІССП) може мати значний вплив на цю систему, особливо в контексті тактичної розвідки.

2. Розпізнавання фрактальних камуфляжних структур

Для швидкої побудови фрактальної структури застосовуємо удосконалену систему РСІФ (1-2) з параметром кольору C_j з заданого діапазону кольорів [9]. Вибір даної системи побудови фрактальної структури зумовлений її ефективності що розглянуто в праці [10]:

$$\left[\begin{array}{l} \left\{ \begin{array}{l} x_n = \left(x_{a_1} - \frac{x_{a_1} - x_{n-1}}{k_{X_{a_1}}} - X_{a_1} \right) \cdot \cos(\varphi_1) - \left(y_{a_1} - \frac{y_{a_1} - y_{n-1}}{k_{Y_{a_1}}} - Y_{a_1} \right) \cdot \sin(\varphi_1) + X_{a_1} \\ y_n = \left(x_{a_1} - \frac{x_{a_1} - x_{n-1}}{k_{X_{a_1}}} - X_{a_1} \right) \cdot \sin(\varphi_1) + \left(y_{a_1} - \frac{y_{a_1} - y_{n-1}}{k_{Y_{a_1}}} - Y_{a_1} \right) \cdot \cos(\varphi_1) + Y_{a_1} \end{array} \right. \\ \dots \\ \left\{ \begin{array}{l} x_n = \left(x_{a_j} - \frac{x_{a_j} - x_{n-1}}{k_{X_{a_j}}} - X_{a_j} \right) \cdot \cos(\varphi_j) - \left(y_{a_j} - \frac{y_{a_j} - y_{n-1}}{k_{Y_{a_j}}} - Y_{a_j} \right) \cdot \sin(\varphi_j) + X_{a_j} \\ y_n = \left(x_{a_j} - \frac{x_{a_j} - x_{n-1}}{k_{X_{a_j}}} - X_{a_j} \right) \cdot \sin(\varphi_j) + \left(y_{a_j} - \frac{y_{a_j} - y_{n-1}}{k_{Y_{a_j}}} - Y_{a_j} \right) \cdot \cos(\varphi_j) + Y_{a_j} \end{array} \right. \end{array} \right. , C_j \quad (1)$$

$$x_{a_j} = \frac{k_{X_{a_j}} X_{a_j} - \frac{L_x}{2}}{k_{X_{a_j}} - 1}; \quad y_{a_j} = \frac{k_{Y_{a_j}} Y_{a_j} - \frac{L_y}{2}}{k_{Y_{a_j}} - 1} \quad (2)$$

де X_{a_j}, Y_{a_j} - координати центри фігур першої ітерації j фігури;

$\{(x_{a_1}, y_{a_1}) \dots (x_{a_j}, y_{a_j})\}, j \in N$ - координати чоток перші ітерації фрактала;

$\{k_{X_{a_1}}, k_{Y_{a_1}} \dots k_{X_{a_j}}, k_{Y_{a_j}}\}, j \in N$ - коефіцієнти пропорційності першої ітерації фрактала;

ϕ_j - кут повороту фігур першої ітерації фрактала;
 L_x, L_y - початкову довжина або ширина фрактального зображення;
 C_j – колір фігури ітерації фрактала.

Кількість фігур ітерацій фракталу j буде залежати від параметру довжина комірки маскувальних сітки l_j рис 1. (3):

$$j = \frac{L_x \cdot L_y}{l_j^2} \tag{3}$$

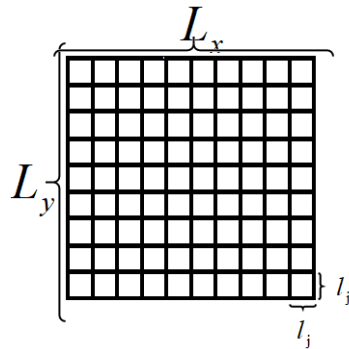


Рис. 1. Вигляд сітки для формування фрактальної камуфляжної структури.

Алгоритм роботи генератора фрактальних камуфляжних структур на базі удосконаленої РСІФ зображений на рис.2. В алгоритмі застосовується параметр довжини комірки l_j та параметр кольору C_j .

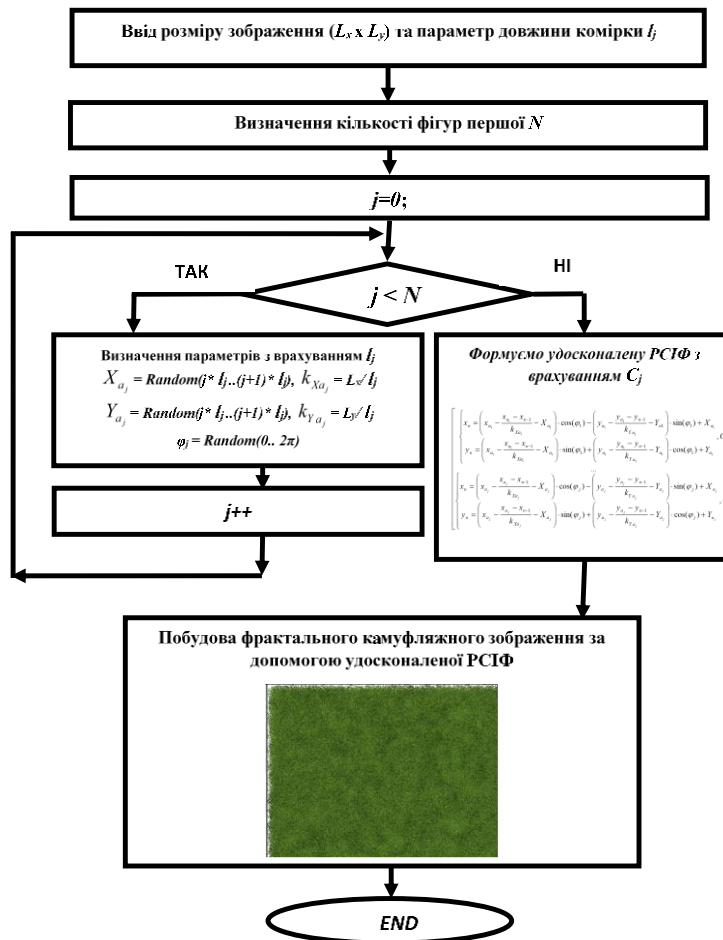


Рис. 2. Алгоритм роботи генератора фрактальних камуфляжів на базі удосконаленої РСІФ.

Для побудови генератора фрактальних камуфляжних сіток з використанням удосконаленої системи ітераційних функцій використані структури зображено на рис. 3.

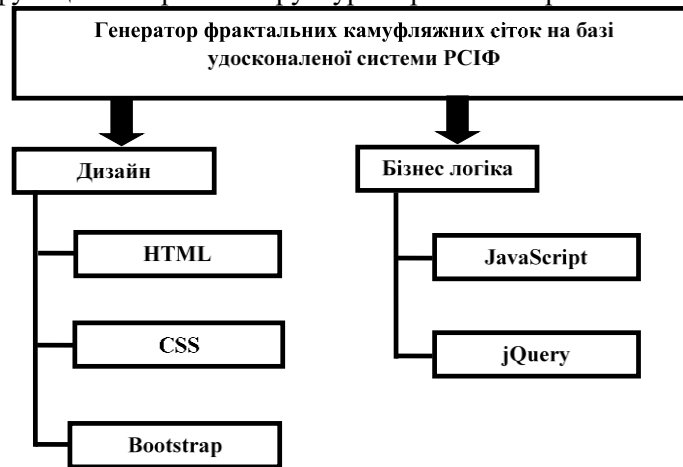


Рис. 3. Структура генератора фрактальних камуфляжних сіток.

На рис. 4. наведено програмну реалізацію генератора фрактальних камуфляжних сіток та результат його роботи:

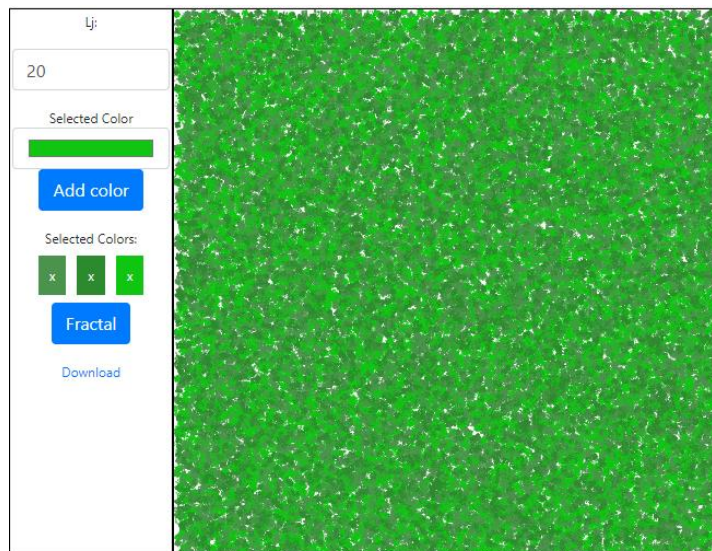


Рис. 4. Структура генератора фрактальних камуфляжних сіток.

Для того щоб не було просвічування зображення рис. 4, потрібно змінити структуру сітки створивши накладання комірки на комірку (рис. 5), ввести додатковий параметр l_b .

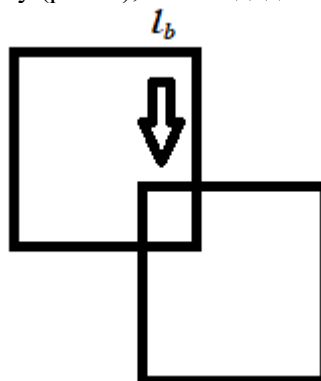


Рис. 5. Структура сітки з параметром l_b .

Взявши всього три кольори #5d8929, #496b22, #293c13, сітку зображення 500x500, параметр довжини комірки $l_j = 5$, отримуємо фрактальну камуфляжну сітку, яку неможливо відрізнити від природного об'єкту рис. 6:

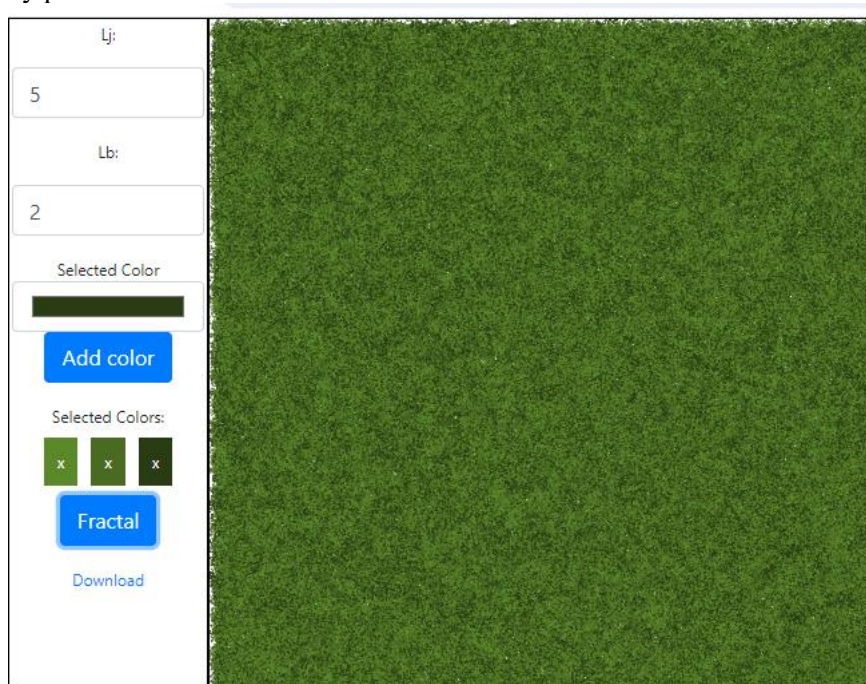


Рис. 6. Вигляд фрактальної камуфляжної сітки створеної за допомогою удосконаленої РСІФ та трьох кольорів #5d8929, #496b22, #293c13.

На рис.7 зображено алгоритм роботи генератора фрактальної камуфляжної сітки (сформованої за допомогою удосконаленої РСІФ) з використанням зображень місцевості, він включає в себе завантаження місцевості, вибір кольорів та розташування згенерованого об'єкту. Даний алгоритм дозволяє сформувати нам Dataset для навчання нейронної мережі, в якості Input Data виступає генероване зображення, Output Data координати верхнього та нижнього кутів вибраної площі (території). На рис.8 зображено програмну реалізацію алгоритму.

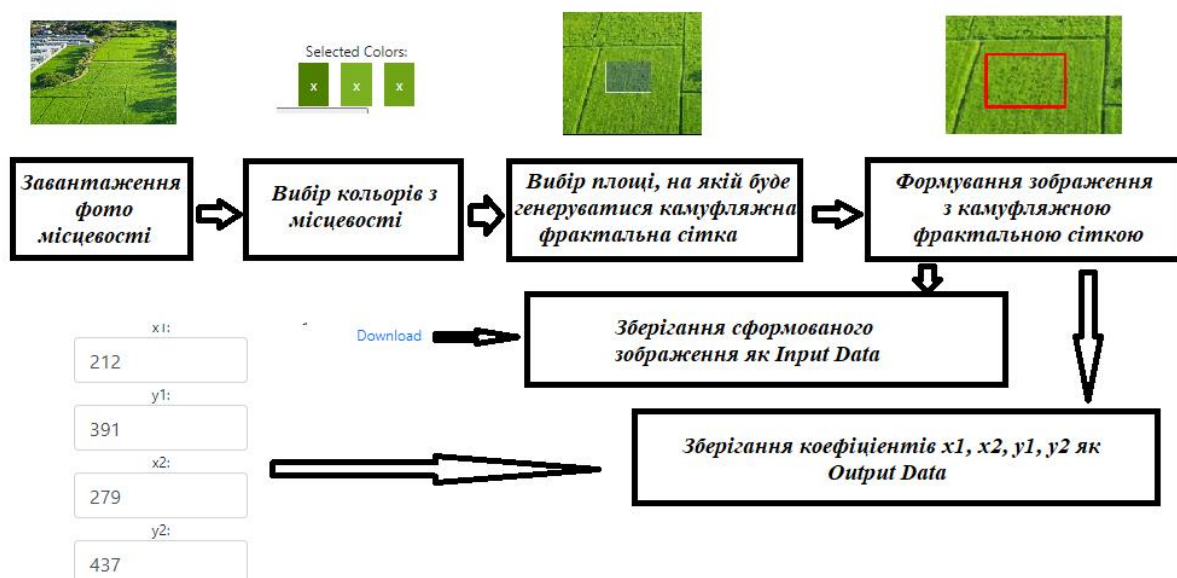


Рис. 7. Алгоритм роботи генератора фрактальної камуфляжної сітки (сформованої за допомогою удосконаленої РСІФ) з використанням зображень місцевості.

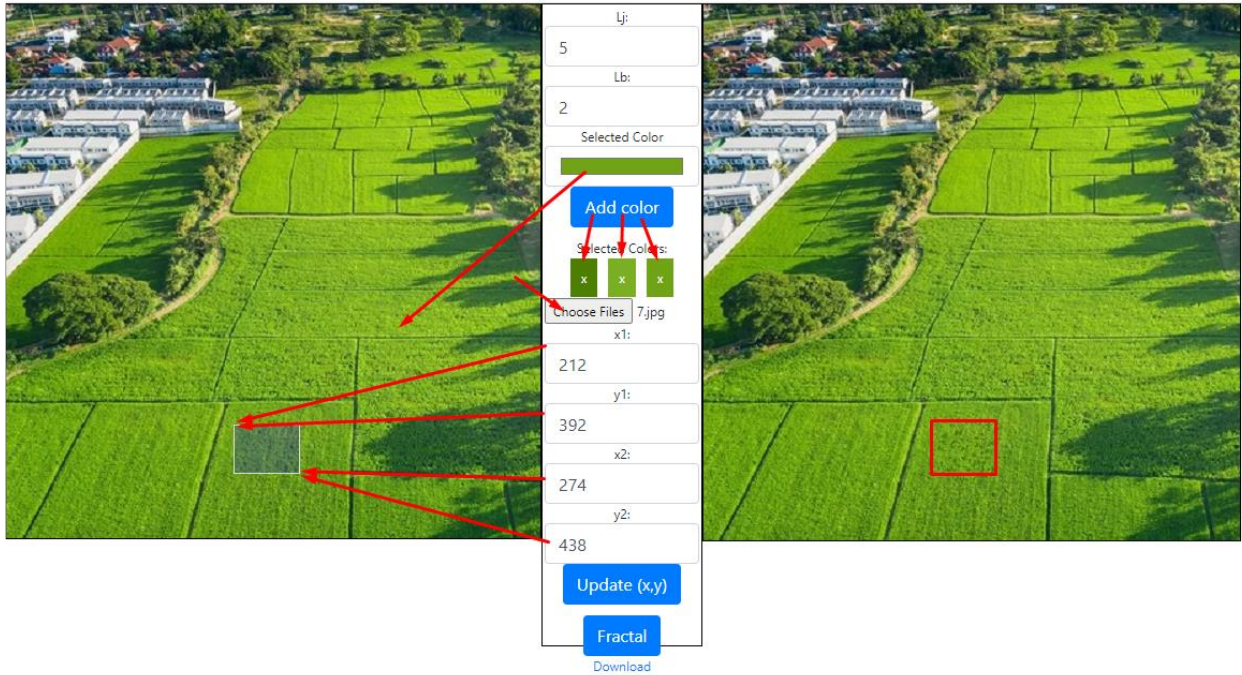


Рис. 8. Програмна реалізація генератора фрактальної камуфляжної сітки (сформованої за допомогою удосконаленої РСІФ) з використанням зображень місцевості.

Схема розпізнавання та знаходження фрактальної камуфляжної сітки за допомогою нейронної мережі tensorflow.js зображена на рис.9. Суть схеми полягає в додаванні функціоналу навчання мережі до генератора (рис. 10), а саме навчання нейронної мережі та створення моделі, яка автоматично буде зберігатися і інтегруватися програмну реалізацію розпізнавання фрактальної камуфляжної структури.

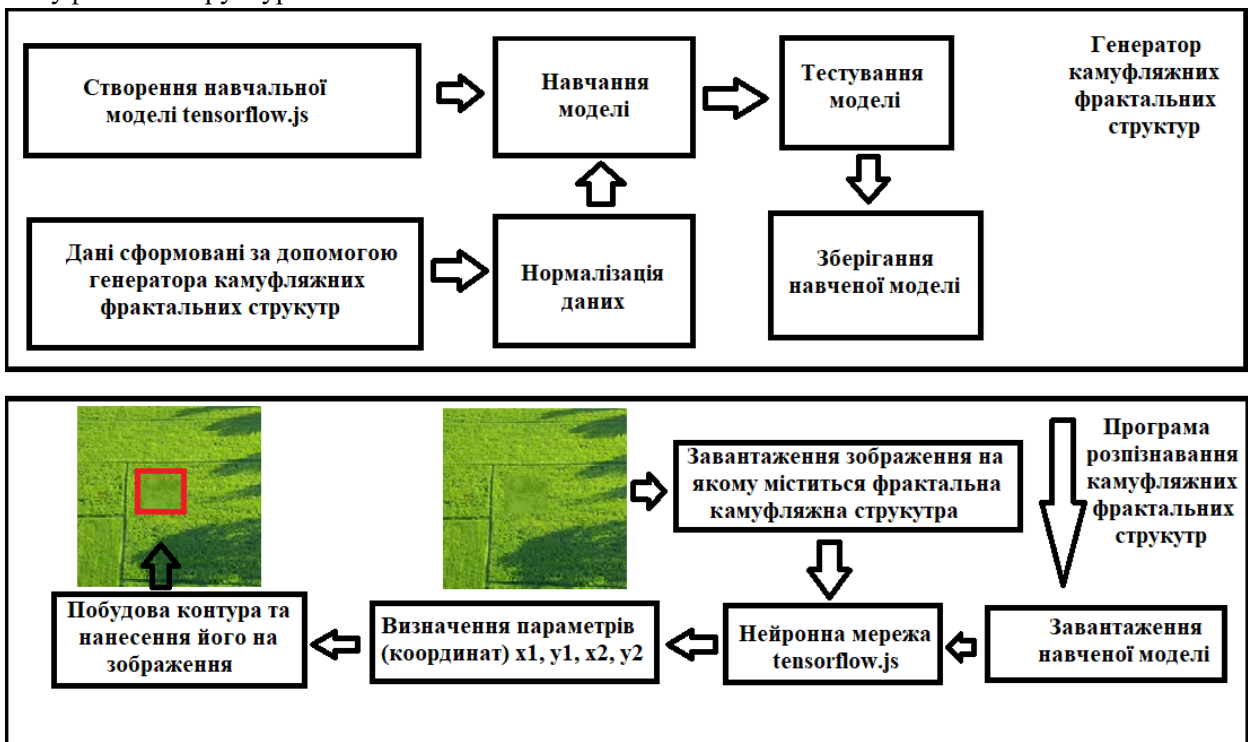


Рис. 9. Схема розпізнавання та знаходження фрактальної камуфляжної сітки за допомогою нейронної мережі tensorflow.js.

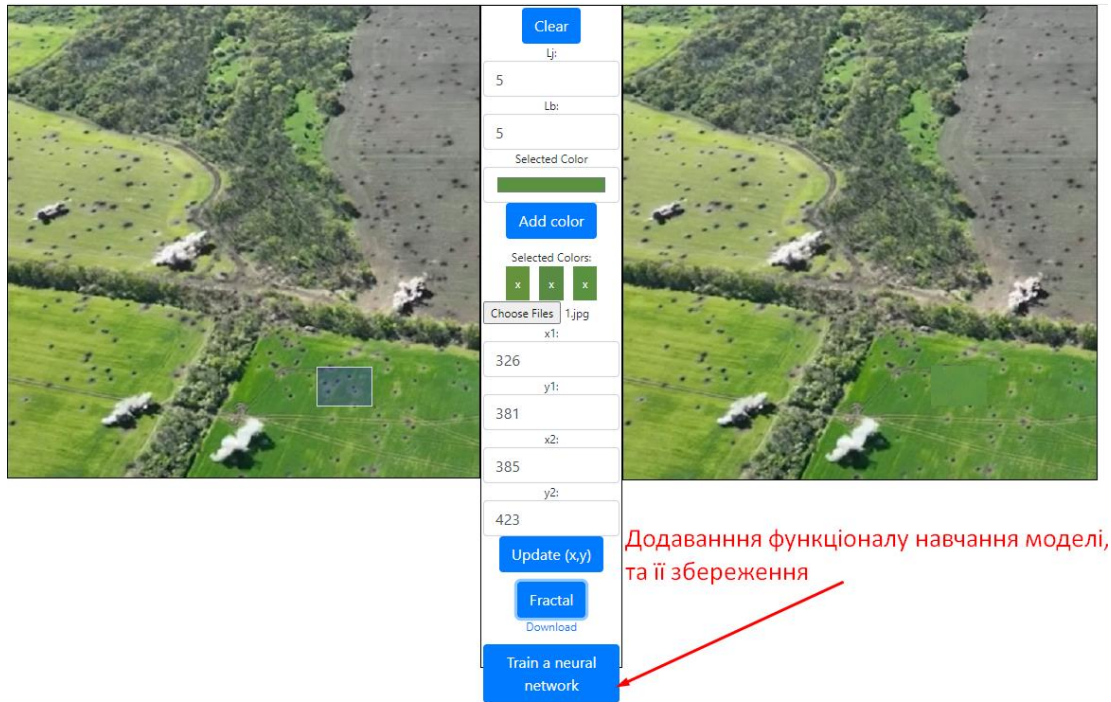


Рис. 10. Програмна реалізація генератора фрактальної камуфляжної з функціоналом навчання нейронної мережі.

Зовнішній вигляд програмної реалізації розпізнавання знаходження фрактальної камуфляжної сітки за допомогою нейронної мережі tensorflow.js зображено на Рис. 11. Як видно з Рис. 10 та Рис. 11 навчена нейронна модель досить точно змогла знайти по зображенню координати розташування фрактальної структури.

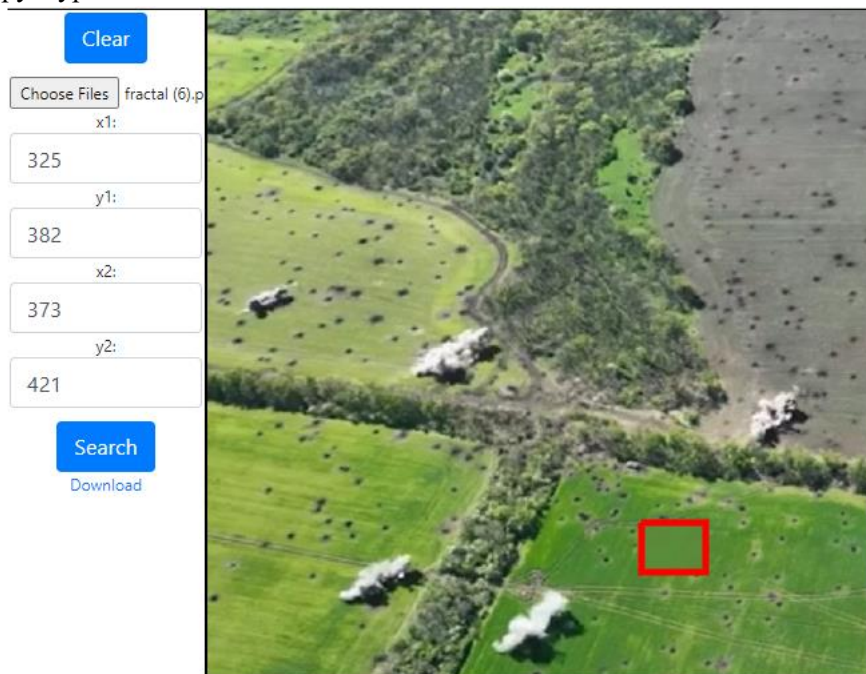


Рис. 11. Програмна реалізація розпізнавання знаходження фрактальної камуфляжної сітки за допомогою нейронної мережі tensorflow.js.

Вхідні дані при роботі з генератор фрактальних сіток та результати тестування роботи моделі подано у таблиці 1.

Таблиця 1.

Вхідні дані при роботі з генератор фрактальних сіток та результати роботи навченої нейронної мережі.

№	Вхідні дані при роботі з генератором				Результати тестування роботи моделі				Відсоток перетину площ об'єктів, %
	x1	y1	x2	y2	x1	y1	x2	y2	
1	326	381	385	423	325	384	382	421	85,11
2	225	177	376	227	215	181	374	222	86,34
3	411	323	472	383	404	315	460	372	87,21

Отримані значення засвідчують 100% точність знаходження об'єкта та високу точність площ об'єктів (не менше 85% відсотків), для даної задачі є досить високими показниками.

Висновки

Розвідка з використанням малих безпілотних літальних апаратів (БПЛА) стикається з викликами у виявленні замаскованих об'єктів через обмеження сенсорних систем. Фрактальний камуфляж, який використовує геометричні патерни, що нагадують природні структури, пропонує ефективне рішення для ускладнення виявлення таких об'єктів. Однак, застосування цього методу вимагає спеціальних знань та інструментів, що може призвести до помилок у розпізнаванні і додаткових витрат на підтримку інфраструктури.

Розробка генератора фрактальних камуфляжних сіток на основі удосконаленої системи ітераційних функцій (РСІФ) з використанням нейронних мереж для автоматизації розпізнавання об'єктів може значно покращити ефективність тактичної розвідки. Генератор забезпечує створення високоточних камуфляжних структур, які важко відрізнити від природного оточення, що підтверджується високими показниками точності моделі, з відсотком перетину площ об'єктів не менше 85%.

Таким чином, інтеграція генератора фрактальних камуфляжних сіток у систему спеціального призначення (ІССП) з функціоналом нейронних мереж може значно підвищити стратегічну перевагу та безпеку військових операцій.

Список використаних літературних джерел

- [1] X. Liang, J. Zhang, L. Zhuo, Y. Li, and Q. Tian, "Small object detection in unmanned aerial vehicle images using feature fusion and scaling-based single shot detector with spatial context analysis," *IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol.*, vol. 30, no. 6, pp. 1758–1770, 2020. <https://doi.org/10.1109/TCSVT.2019.2905881>
- [2] Y. Liu, C.-Q. Wang, and Y.-J. Zhou, "Camouflaged people detection based on a semi-supervised search identification network," *Def. Technol.*, vol. 21, pp. 176–183, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.dt.2021.09.004>
- [3] S. Wang, D. Zeng, Y. Xu, G. Yang, F. Huang, and L. Chen, "Towards complex scenes: A deep learning-based camouflaged people detection method for snapshot multispectral images," *Def. Technol.*, vol. 34, pp. 269–281, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.dt.2023.12.011>
- [4] Y. Wen, W. Ke, and H. Sheng, "Camouflaged object detection based on deep learning with attention-guided edge detection and multi-scale context fusion," *Appl. Sci. (Basel)*, vol. 14, no. 6, p. 2494, 2024. <https://doi.org/10.3390/app14062494>
- [5] X. Yang, W.-D. Xu, Q. Jia, and L. Li, "Research on digital camouflage pattern generation algorithm based on adversarial autoencoder network," *Intern. J. Pattern Recognit. Artif. Intell.*, vol. 34, no. 06, p. 2050017, 2020. <https://doi.org/10.1142/S0218001420500172>
- [6] E. Van der Burg, M. A. Hogervorst, and A. Toet, "Measuring the dynamics of camouflage in natural scenes using convolutional neural networks," in *Target and Background Signatures VIII*, 2022. <https://doi.org/10.1117/12.2636107>

- [7] A. Lachkar, T. Gadi, R. Benslimane, L. D’Orazio, and E. Martuscelli, “Textile woven-fabric recognition by using Fourier image-analysis techniques: Part I: A fully automatic approach for crossed-points detection,” *J. Text. Inst.*, vol. 94, no. 3–4, pp. 194–201, 2003. <https://doi.org/10.1080/00405000308630608>
- [8] Van der Burg, E.; Toet, A.; Perone, P.; Hogervorst, M. A. A Convolutional Neural Network as a Potential Tool for Camouflage Assessment. *Preprints 2024*, 2024012072. <https://doi.org/10.20944/preprints202401.2072.v2>
- [9] Юнак О. М., Климаш М. М., Шпур О. М., Мрак В. Б. Математична модель розпізнавання фрактальних структур з використанням технології нейронних мереж // *Infocommunication Technologies and Electronic Engineering = Інфокомунікаційні технології та електронна інженерія*. – 2023. – Vol. 3, № 1. – P. 1–9. <https://doi.org/10.23939/ictee2023.01.001>
- [10] Юнак О., Стрихалюк Б., Климаш М. (2023). Ефективність рандомізованою системою ітераційних функцій над детермінованою системою ітераційних функцій при побудові фрактальних зображень з обмеженою роздільною здатністю. *Measuring and computing devices in technological processes*, (1), 5–12. <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2023-73-1-1>

GENERATION AND RECOGNITION OF FRACTAL CAMOUFLAGE STRUCTURES USING NEURAL NETWORKS

Ostap Yunak, Mykhailo Klymash, Ivan Demydov

Lviv Polytechnic National University, S. Bandery Str., 12, 79013, Lviv, Ukraine

The paper considers a method of generating fractal camouflage structures (grids) using a randomized system of iterative functions. This method allows for changing the base structure (type of mesh), which in turn makes it possible to determine the parameters by which the object can be identified as a fractal camouflage mesh. In the mathematical description of the improved RSIF, the color range parameters (set of colors) are introduced, allowing the fractal structure to be adjusted to the colors of the landscape where the camouflage net will be applied. The choice of colors for the fractal camouflage mesh generator is a critical aspect that affects camouflage effectiveness. Using several shades that correspond to the natural colors of the environment allows for the creation of camouflage structures that are almost impossible to distinguish from real objects on the ground. This approach provides a high degree of concealment and reduces the probability of detecting camouflaged objects even with modern sensor systems. The proposed generation method will enable the formation of an array of information for neural network training. A trained neural network will be able to determine the geometric parameters of the camouflage structure. These parameters can then be used to identify an object hidden under a fractal camouflage structure. The considered generation method allows for the automation of the neural network training process, significantly speeding up the learning process and reducing the need for training data. The proposed approach significantly reduces the risk of human errors and increases the efficiency and effectiveness of military operations. The high accuracy and adaptability of fractal camouflage generated with the help of advanced RSIF and neural networks make this method promising for wide implementation in military technologies.

Keywords: *fractal, fractal camouflage, neural network, recognition of fractal camouflage structures, randomized system of iterative functions (RSIF).*