



[DOI 10.28925/2663-4023.2026.32.1154](https://doi.org/10.28925/2663-4023.2026.32.1154)

УДК 004.93

Смірнов Олексій Анатолійович

д.т.н., професор, завідувач кафедри кібербезпеки та програмного забезпечення
Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, Україна
ORCID: 0000-0001-9543-874X
dr.smirnova@gmail.com

Заріцький Віктор Анатолійович

студент групи КБ-24 кафедри кібербезпеки та програмного забезпечення
Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, Україна
ORCID: 0009-0008-3004-1563
viktorzarickiy@gmail.com

Буравченко Костянтин Олегович

к.т.н., доцент, доцент кафедри кібербезпеки та програмного забезпечення
Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, Україна
ORCID: 0000-0001-6195-7533
buravchenkok@gmail.com

Коноплицька-Слободенюк Оксана Костянтинівна

викладач кафедри кібербезпеки та програмного забезпечення
Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, Україна
ORCID: 0000-0001-9981-5194
ksuha80@gmail.com

Константинова Лілія Володимирівна

викладач кафедри кібербезпеки та програмного забезпечення
Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, Україна
ORCID: 0000-0002-3305-2427
liliyashel1976@gmail.com

Якименко Наталія Миколаївна

кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри кібербезпеки та програмного забезпечення
Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, Україна
ORCID: 0000-0002-4498-0093
yakimenko_n_m@ukr.net

Смірнов Сергій Анатолійович

кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри кібербезпеки та програмного забезпечення
Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, Україна
ORCID: 0000-0002-7649-7442
smirnov.ser.81@gmail.com

ОПТИМІЗАЦІЯ РОЗПІЗНАВАННЯ ОБЛИЧ ЗА ДОПОМОГОЮ CUDA – ПРИСКОРЕНОЇ БІБЛІОТЕКИ DLIB

Анотація. У даній роботі проведено комплексне дослідження ефективності методів комп'ютерного зору для задачі детекції облич на зображеннях та у відеопотоці. Основну увагу приділено порівняльному аналізу двох алгоритмів бібліотеки dlib: класичного методу на основі гістограм орієнтованих градієнтів (HOG) та сучасного методу на основі згорткових нейронних мереж (CNN). Розглянуто проблему високої обчислювальної складності нейромережових методів та запропоновано шлях її вирішення через використання технології паралельних обчислень NVIDIA CUDA. Розроблено програмний алгоритм для бенчмаркінгу, який дозволяє в автоматичному режимі оцінювати швидкість обробки кадрів (FPS), час інференсу та стабільність детекції на різному апаратному забезпеченні. В ході експерименту доведено, що використання графічного процесора (GPU) дозволяє досягти кратного прискорення (speedup) обробки зображень при використанні CNN, забезпечуючи можливість роботи в режимі реального часу з високою точністю.



Результати дослідження дозволяють визначити оптимальні конфігурації обладнання та програмного забезпечення для побудови систем відеоспостереження, контролю доступу та біометричної ідентифікації. Отримані висновки можуть бути використані при проектуванні високонавантажених систем відеоаналітики.

Ключові слова: кібербезпека, комплексні системи безпеки, розпізнавання облич, dlib, CUDA, GPU прискорення, комп'ютерний зір, відеоспостереження, біометрична ідентифікація, CNN, HOG, Python, машинне навчання, оптимізація обчислень, бенчмаркінг.

ВСТУП

Постановка завдання дослідження. Задачі розпізнавання образів на даний час дуже актуальні. Поштовхом для бурхливого розвитку теорії розпізнавання образів послужило як розширення області застосування, так й поява нових технологій розпізнавання, у тому числі з широким використанням штучного інтелекту. Якщо розглянути область застосування то це й використання у військовій справі (наприклад у дронах, що отримало активний розвиток під час російсько-української війни), й використання на виробництві (системи комп'ютерного зору для виявлення дефектів), й використання у торгівлі (розпізнавання штрих та QR-кодів, розпізнавання речей й т.п.), й використання у медицині (медична діагностика), й використання у різноманітних комплексних системах безпеки (інтелектуальні системи відеоспостереження, розпізнавання осіб, розпізнавання номерів авто й т.п.), а також велика кількість інших задач. Дана робота присвячена використанню теорії розпізнавання образів у комплексних системах безпеки.

Зважаючи на те, що технології комп'ютерного зору сьогодні є невід'ємною частиною систем безпеки та ідентифікації, методи автоматичного розпізнавання облич набувають критичного значення. Інтелектуальні системи відеонагляду впроваджуються у смарт-містах, банківському секторі, на транспорті та в мобільних пристроях. Ключовою вимогою до таких систем є здатність обробляти відеопотік у режимі реального часу (real-time) з мінімальними затримками. В умовах зростання вимог до точності розпізнавання, розробники все частіше відмовляються від класичних алгоритмів на користь глибокого навчання (Deep Learning). Сучасні нейронні мережі здатні розпізнавати обличчя в складних умовах освітлення, при частковому перекритті або повороті голови, що було недосяжно для алгоритмів попереднього покоління. Проте, ефективність процесів детекції значною мірою залежить від апаратного забезпечення. Виконання складних математичних операцій згортки на центральному процесорі (CPU) часто призводить до "пляшкового горлечка" в продуктивності системи. Застосування графічних прискорювачів (GPU) та технології CUDA відкриває широкі можливості для розпаралелювання обчислень. Це дозволяє використовувати найсучасніші архітектури нейронних мереж без втрати швидкодії, забезпечуючи баланс між точністю та швидкістю реакції системи.

Постановка проблеми. При впровадженні нейромережових методів (CNN) у прикладні задачі виникає проблема значного зростання обчислювального навантаження. Класичні CPU не здатні забезпечити прийнятний FPS (кількість кадрів на секунду) при роботі з CNN-детекторами високої точності. Це створює бар'єр для використання передових алгоритмів у системах реального часу. Особливу роль у вирішенні цієї проблеми відіграють програмні бібліотеки, такі як dlib, які підтримують гібридні режими роботи. Необхідно дослідити, наскільки ефективним є перенесення обчислень на GPU за допомогою CUDA для конкретної реалізації детектора MMOD CNN у бібліотеці dlib. Таким чином постає завдання експериментальної перевірки та



кількісної оцінки виграшу в продуктивності при переході від CPU-обчислень (метод HOG) до GPU-обчислень (метод CNN), а також розробка методики тестування цих показників.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У роботах [1, 2] розглядаються фундаментальні принципи побудови систем розпізнавання образів, зокрема метод HOG. Автори вказують на високу швидкість методу, але обмежену точність у складних сценах. У роботах [3-8] наведені результати досліджень щодо розпізнавання образів з використанням технологій штучного інтелекту. Роботи [10-18] призначені питанням застосування розпізнавання образів та використання відповідних інструментів штучного інтелекту у різних сферах. У роботах [19-20] автори приділяють увагу згортковим нейронним мережам та їх застосуванню для детекції об'єктів. Зокрема, розглядається архітектура Max-Margin Object Detection (MMOD), реалізована в dlib. Дослідження вказують, що інтеграція CUDA дозволяє значно прискорити навчання та інференс таких мереж, проте конкретні порівняльні характеристики для різних сценаріїв використання потребують детальнішого вивчення. Питання підходів щодо практичної реалізації глибокого навчання для комп'ютерного зору з Python розглянуто у [21].

Метою статті є проведення порівняльного аналізу ефективності алгоритмів детекції облич (HOG vs CNN) та оцінка оптимізації процесу розпізнавання за допомогою технології CUDA.

Об'єктом дослідження є процес автоматичного виявлення облич на цифрових зображеннях та відео. Предметом дослідження є методи оптимізації швидкодії алгоритмів бібліотеки dlib з використанням графічних процесорів.

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Алгоритми інтелектуального аналізу даних та їх інтеграція з ШІ. Бібліотека dlib пропонує два фундаментально різних підходи до вирішення задачі розпізнавання об'єктів. Перший – це метод HOG (Histogram of Oriented Gradients), який базується на виділенні ознак форми та контурів об'єкта через аналіз градієнтів яскравості. Цей метод є обчислювально легким і традиційно виконується на CPU. Він ефективний для фронтальних облич, але чутливий до поворотів. Другий підхід – це CNN (Convolutional Neural Network), зокрема модель MMOD. Це глибока нейронна мережа, яка навчається виділяти складні ієрархічні ознаки. Вона забезпечує високу надійність детекції (robustness), але вимагає виконання мільйонів операцій множення матриць для одного кадру, що є ідеальним сценарієм для застосування GPU.

Технологія CUDA для прискорення обчислень. Технологія NVIDIA CUDA Architecture) дозволяє використовувати графічний процесор як пристрій масових паралельних обчислень. На відміну від CPU, який має кілька потужних ядер, GPU має тисячі менших ядер, здатних одночасно обробляти різні пікселі зображення або нейрони мережі. Інтеграція dlib з CUDA дозволяє перекласти найбільш ресурсоємні операції (tensor operations) на відеокарту. Це звільняє центральний процесор для інших задач та дозволяє досягти режиму реального часу навіть для "важких" моделей глибокого навчання.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

З метою всебічного аналізу було розроблено спеціалізоване програмне забезпечення мовою Python, яке реалізує бенчмаркінг двох методів детекції на одному і тому ж наборі даних. Експеримент проводився з використанням бібліотек dlib, numpy та



tlib для візуалізації.

Методика експерименту та програмна реалізація. Для забезпечення об'єктивності результатів було створено клас FaceDetectionBenchmark. Алгоритм передбачає попереднє завантаження кадрів у пам'ять, "прогрів" GPU (для виключення затримок ініціалізації CUDA контексту) та заміри часу виконання детекції для кожного кадру окремо. Основний фрагмент розробленого коду наведено у Лістингу 1:

Лістинг 1 – Фрагмент коду класу FaceDetectionBenchmark

```
"""Тестування HOG детектора (CPU)"""
print("Тестування HOG детектора (CPU)...")

print(f"      Оброблено {i + 1}/{len(frames)} кадрів

print(f"HOG      -      Середній      час:

"""Тестування CNN детектора (GPU/CUDA)"""
print("CNN детектор недоступний\n")

print("Тестування CNN детектора (GPU/CUDA)...")
```

```
print(f"      Оброблено {i + 1}/{len(frames)} кадрів
```

```
print(f"CNN          -          Середній          час:
```

Важливим аспектом реалізації є використання таймерів високої точності та розрахунок стандартного відхилення часу обробки, що дозволяє оцінити стабільність потоку даних (jitter).

Результати роботи методу HOG (CPU). Тестування класичного детектора показало стабільні результати на центральному процесорі. Середній час обробки кадру склав близько 25-30 мс (залежно від роздільної здатності), що відповідає приблизно 30-40 FPS. Перевагою цього методу є відсутність потреби у дорогавартісному обладнанні. Однак, аналіз кількості виявлених облич показав, що HOG часто пропускає обличчя, які знаходяться під кутом або мають нестандартне освітлення.

Результати роботи методу CNN (GPU/CUDA). При використанні CNN детектора без CUDA (на CPU) час обробки одного кадру складав понад 800 мс (~1.2 FPS), що є неприйнятним для відеопотоку. Після активації CUDA-прискорення ситуація кардинально змінилася. Час обробки скоротився до 15-20 мс, що дозволило отримати понад 50 FPS. При цьому точність детекції (recall) зросла: детектор успішно знаходив обличчя, які були пропущені методом HOG. На рис. 1 наведено графік порівняння часу детекції для кожного кадру тестової послідовності.

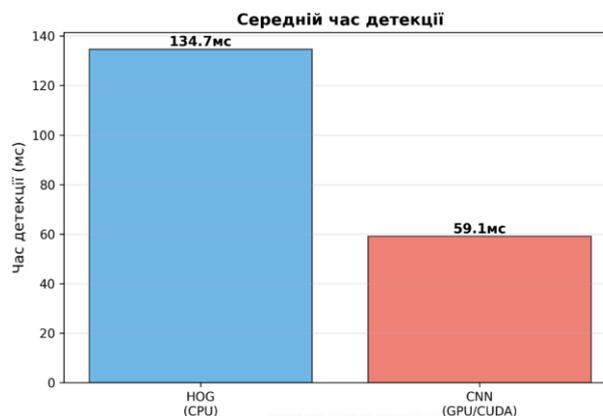


Рис. 1. Порівняння часу детекції HOG (CPU) та CNN (GPU)

Порівняльна характеристика та візуалізація. Отримані дані дозволяють побудувати чітку картину переваг використання апаратного прискорення. На рис. 2 зображено підсумковий графік FPS, коефіцієнт прискорення становить, коефіцієнт прискорення становить 2.28.

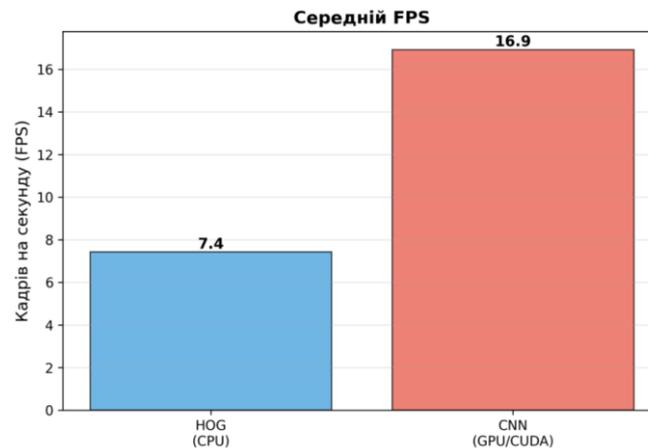


Рис. 2. Порівняння середнього FPS між HOG (CPU) та CNN (GPU)

Таблиця 1

Порівняльна характеристика ефективності методів детекції

Критерій			
Архітектура	SVM + Градієнти		
Швидкість (FPS)	Середня (~35)	Дуже низька (~1)	Висока (~55)
Точність	Базова	Висока	Висока
Навантаження на CPU	Високе (100%)	Високе (100%)	Низьке (~10-15%)
Вимоги до пам'яті	RAM (низькі)	RAM (високі)	VRAM (високі)

ВИСНОВКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

В роботі було досліджено засоби бібліотеки `dlib` для розпізнавання облич та проведено практичний експеримент з оптимізації цього процесу. Було визначено, що стандартні методи CPU-обчислень є недостатніми для роботи із сучасними згортковими нейронними мережами у відеопотоці. Розроблений програмний модуль довів, що використання технології CUDA забезпечує прискорення процесу детекції у десятки разів порівняно з виконанням тієї ж моделі на CPU, та перевершує за швидкістю навіть простіші алгоритми (HOG), забезпечуючи при цьому значно вищу якість розпізнавання. Перспективи подальших досліджень полягають у тестуванні оптимізації `batch-processing` (пакетної обробки кадрів), що може ще більше підвищити пропускну здатність системи, а також у дослідженні використання тензорних ядер (Tensor Cores) новітніх відеокарт.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- King, D. E. (2015). Max-margin object detection. *Journal of Machine Learning Research*, 16, 1113–1120. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1502.00046>
- Dalal, N., & Triggs, B. (2005). Histograms of oriented gradients for human detection. In *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2005.177>
- Shanahan, J. G. (2020). Introduction to computer vision and real-time deep learning-based object detection. In *Proceedings of the 29th ACM International Conference on Information & Knowledge Management (CIKM 2020)* (pp. 3515–3516). <https://doi.org/10.1145/3340531.3412177>
- Mozaffari, M. H. (2025). Deep learning for computer vision applications. *Electronics*, 14, 2874. <https://doi.org/10.3390/electronics14142874>



5. Chen, Y., Wang, S., Lin, L., Cui, Z., & Zong, Y. (2024). Computer vision and deep learning transforming image recognition and beyond. *International Journal of Computer Science and Information Technology*, 2(1), 45–51. <https://doi.org/10.62051/ijcsit.v2n1.06>
6. International Journal of Computer Science and Information Technology. (2023). Based on intelligent advertising recommendation and abnormal advertising monitoring system in the field of machine learning. *International Journal of Computer Science and Information Technology*, 1(1), 17–23. <https://doi.org/10.62051/ijcsit.v1n1.03>
7. Tan, K., et al. (2024). Integrating advanced computer vision and AI algorithms for autonomous driving systems. *Journal of Theory and Practice of Engineering Science*, 4(1), 41–48. [https://doi.org/10.53469/jtpes.2024.04\(01\).06](https://doi.org/10.53469/jtpes.2024.04(01).06)
8. International Journal of Computer Science and Information Technology. (2023). A deep learning-based algorithm for crop disease identification positioning using computer vision. *International Journal of Computer Science and Information Technology*, 1(1), 85–92. <https://doi.org/10.62051/ijcsit.v1n1.12>
9. Kuznetsov, O., Smirnov, O., Kuznetsova, T., Shaikhanova, A., & Svatowsky, I. (2025). Privacy-utility trade-offs in IoT networks: A comparative analysis of differential privacy mechanisms for sensor data aggregation. In *Security and privacy of cyber-physical systems: Emerging trends, technologies and applications* (pp. 589–622).
10. Kuznetsov, O., Smirnov, O., Akhmetov, B., Alimseitova, Z., & Imoize, A. L. (2025). Deep learning frontiers in copy-move forgery detection: Advances, challenges, and future directions. In *Advancements in cybersecurity: Next-generation systems and applications* (pp. 202–229). <https://doi.org/10.1201/9781003546153>
11. Al-Azzeh, J., Ayyoub, B., Mesleh, A., Smirnova, T., Gnatyuk, S., Drieiev, O., Smirnov, O., & Dorenskyi, O. (2025). Cloud-based information system for evaluating caverns in the process of blasting metal surfaces of details. *International Review on Modelling and Simulations*, 18(1), 32–42. <https://doi.org/10.15866/iremos.v18i1.25596>
12. Smirnov, O., Fedorov, E., Neskorođieva, A., & Neskorođieva, T. (2024). Intellectual classification method of gymnastic elements based on combinations of descriptive and generative approaches. *CEUR Workshop Proceedings*, 3664, 11–23.
13. Kuznetsov, O., Frontoni, E., Kuznetsova, Y., Smirnov, O., & Chevardin, V. (2023). Achieving enhanced security in biometric authentication: A rigorous analysis of code-based fuzzy extractor. *CEUR Workshop Proceedings*, 3624, 330–339.
14. Smirnov, O., Karapetyan, A., & Fedorov, E. (2022). Creating neural network and human-based metaheuristic methods for solving the traveling salesman problem. *CEUR Workshop Proceedings*, 3312, 47–58.
15. Smirnov, O., Neskorođieva, T., Fedorov, E., Rudakov, K., & Neskorođieva, A. (2022). Method for detecting audit data anomalies based on restricted Cauchy machine. *CEUR Workshop Proceedings*, 3187, 1–12.
16. Smirnov, O., Smirnova, T., Al-Oraiqat, A. M., Drieiev, O., Polishchuk, L., Khan, S., Hasan, M. Y., Amro, A. M., & AlRawashdeh, H. S. (2022). Method for determining treated metal surface quality using computer vision technology. *Sensors*, 22(16), 6223. <https://doi.org/10.3390/s22166223>
17. Lysenko, I., Minailenko, R., Smirnov, S., Buravchenko, K., Yakymenko, N., & Smirnov, O. (2025). Study of artificial intelligence tools for intelligent data analysis. *Cybersecurity: Education, Science, Technique*, 3(31), 227–241. <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2025.31.1022>
18. Smirnov, O. A., Konstantynova, L. V., Konopliiska-Slobodeniuk, O. K., Kozirova, N. V., Yakymenko, N. M., Dorenskyi, O. P., & Buravchenko, K. O. (2025). Study of artificial intelligence tools for database management and data analysis. *Cybersecurity: Education, Science, Technique*, 3(27), 429–448. <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2025.27.763>
19. King, D. E. (n.d.). *Dlib C++ library documentation*. <http://dlib.net>
20. NVIDIA. (n.d.). *CUDA programming guide*. <https://docs.nvidia.com/cuda/>
21. Rosebrock, A. (2017). *Deep learning for computer vision with Python*. PyImageSearch. <https://dokumen.pub/deep-learning-for-computer-vision-with-python-starter-bundle.html>

**Oleksii Smirnov**

Doctor of Technical Sciences, Professor,
Head of Cybersecurity & Software Academic Department
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine
ORCID: 0000-0001-9543-874X
dr.smirnova@gmail.com

Viktor Zaritskyi

student of group CS-24 of the Department of Cybersecurity and Software
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine
ORCID: 0009-0008-3004-1563
viktorzarickiy@gmail.com

Kostiantyn Buravchenko

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor of Cybersecurity & Software Academic Department
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine
ORCID: 0000-0001-6195-7533
buravchenkok@gmail.com

Oksana Konoplitska-Slobodeniuk

Lecturer
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine
ORCID: 0000-0001-9981-5194
ksuha80@gmail.com

Liliia Konstantynova

Lecturer of Cybersecurity & Software Academic Department
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine
ORCID: 0000-0002-3305-2427
lilyashel1976@gmail.com

Nataliia Yakymenko

candidate of Physical and Mathematical Sciences, associate professor, associate professor of Cybersecurity & Software Academic Department
Central Ukrainian National Technical University, Kropivnitskiy, Ukraine
ORCID: 0000-0002-4498-0093
yakimenko_n_m@ukr.net

Serhii Smirnov

Candidate of Science (Engineering), associate professor, associate professor of Cybersecurity & Software Academic Department
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine
ORCID: 0000-0002-7649-7442
smirnov.ser.81@gmail.com

OPTIMIZING FACIAL RECOGNITION WITH THE CUDA ACCELERATED DLIB LIBRARY

Abstract. This work presents a comprehensive study of the effectiveness of computer vision methods for the task of detecting faces in images and in video streams. The main attention is paid to the comparative analysis of two algorithms of the dlib library: the classical method based on histograms of oriented gradients (HOG) and the modern method based on convolutional neural networks (CNN). The problem of high computational complexity of neural network methods is considered and a solution is proposed through the use of NVIDIA CUDA parallel computing technology. A software algorithm for benchmarking is developed, which allows for automatic evaluation of frame processing speed (FPS), inference time and detection stability on different hardware. The experiment proved that the use of a graphics processor (GPU) allows achieving multiple acceleration (speedup) of image processing when using CNN, providing the ability to work in real time with high accuracy. The results of the study allow us to determine the optimal hardware



and software configurations for building video surveillance, access control, and biometric identification systems. The conclusions obtained can be used in the design of high-load video analytics systems.

Keywords: cybersecurity, comprehensive security systems, facial recognition, dlib, CUDA, GPU acceleration, computer vision, video surveillance, biometric identification, CNN, HOG, Python, machine learning, computational optimization, benchmarking.

REFERENCES (TRANSLATED AND TRANSLITERATED)

1. King, D. E. (2015). Max-margin object detection. *Journal of Machine Learning Research*, 16, 1113–1120. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1502.00046>
2. Dalal, N., & Triggs, B. (2005). Histograms of oriented gradients for human detection. In *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2005.177>
3. Shanahan, J. G. (2020). Introduction to computer vision and real-time deep learning-based object detection. In *Proceedings of the 29th ACM International Conference on Information & Knowledge Management (CIKM 2020)* (pp. 3515–3516). <https://doi.org/10.1145/3340531.3412177>
4. Mozaffari, M. H. (2025). Deep learning for computer vision applications. *Electronics*, 14, 2874. <https://doi.org/10.3390/electronics14142874>
5. Chen, Y., Wang, S., Lin, L., Cui, Z., & Zong, Y. (2024). Computer vision and deep learning transforming image recognition and beyond. *International Journal of Computer Science and Information Technology*, 2(1), 45–51. <https://doi.org/10.62051/ijcsit.v2n1.06>
6. International Journal of Computer Science and Information Technology. (2023). Based on intelligent advertising recommendation and abnormal advertising monitoring system in the field of machine learning. *International Journal of Computer Science and Information Technology*, 1(1), 17–23. <https://doi.org/10.62051/ijcsit.v1n1.03>
7. Tan, K., et al. (2024). Integrating advanced computer vision and AI algorithms for autonomous driving systems. *Journal of Theory and Practice of Engineering Science*, 4(1), 41–48. [https://doi.org/10.53469/jtpes.2024.04\(01\).06](https://doi.org/10.53469/jtpes.2024.04(01).06)
8. International Journal of Computer Science and Information Technology. (2023). A deep learning-based algorithm for crop disease identification positioning using computer vision. *International Journal of Computer Science and Information Technology*, 1(1), 85–92. <https://doi.org/10.62051/ijcsit.v1n1.12>
9. Kuznetsov, O., Smirnov, O., Kuznetsova, T., Shaikhanova, A., & Svatowsky, I. (2025). Privacy-utility trade-offs in IoT networks: A comparative analysis of differential privacy mechanisms for sensor data aggregation. In *Security and privacy of cyber-physical systems: Emerging trends, technologies and applications* (pp. 589–622).
10. Kuznetsov, O., Smirnov, O., Akhmetov, B., Alimseitova, Z., & Imoize, A. L. (2025). Deep learning frontiers in copy-move forgery detection: Advances, challenges, and future directions. In *Advancements in cybersecurity: Next-generation systems and applications* (pp. 202–229). <https://doi.org/10.1201/9781003546153>
11. Al-Azzeh, J., Ayyoub, B., Mesleh, A., Smirnova, T., Gnatyuk, S., Drieiev, O., Smirnov, O., & Dorenskyi, O. (2025). Cloud-based information system for evaluating caverns in the process of blasting metal surfaces of details. *International Review on Modelling and Simulations*, 18(1), 32–42. <https://doi.org/10.15866/iremos.v18i1.25596>
12. Smirnov, O., Fedorov, E., Neskorođieva, A., & Neskorođieva, T. (2024). Intellectual classification method of gymnastic elements based on combinations of descriptive and generative approaches. *CEUR Workshop Proceedings*, 3664, 11–23.
13. Kuznetsov, O., Frontoni, E., Kuznetsova, Y., Smirnov, O., & Chevardin, V. (2023). Achieving enhanced security in biometric authentication: A rigorous analysis of code-based fuzzy extractor. *CEUR Workshop Proceedings*, 3624, 330–339.
14. Smirnov, O., Karapetyan, A., & Fedorov, E. (2022). Creating neural network and human-based metaheuristic methods for solving the traveling salesman problem. *CEUR Workshop Proceedings*, 3312, 47–58.
15. Smirnov, O., Neskorođieva, T., Fedorov, E., Rudakov, K., & Neskorođieva, A. (2022). Method for detecting audit data anomalies based on restricted Cauchy machine. *CEUR Workshop Proceedings*, 3187, 1–12.



16. Smirnov, O., Smirnova, T., Al-Oraiqat, A. M., Drieiev, O., Polishchuk, L., Khan, S., Hasan, M. Y., Amro, A. M., & AlRawashdeh, H. S. (2022). Method for determining treated metal surface quality using computer vision technology. *Sensors*, 22(16), 6223. <https://doi.org/10.3390/s22166223>
17. Lysenko, I., Minailenko, R., Smirnov, S., Buravchenko, K., Yakymenko, N., & Smirnov, O. (2025). Study of artificial intelligence tools for intelligent data analysis. *Cybersecurity: Education, Science, Technique*, 3(31), 227–241. <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2025.31.1022>
18. Smirnov, O. A., Konstantynova, L. V., Konoplitska-Slobodeniuk, O. K., Kozirova, N. V., Yakymenko, N. M., Dorenskyi, O. P., & Buravchenko, K. O. (2025). Study of artificial intelligence tools for database management and data analysis. *Cybersecurity: Education, Science, Technique*, 3(27), 429–448. <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2025.27.763>
19. King, D. E. (n.d.). *Dlib C++ library documentation*. <http://dlib.net>
20. NVIDIA. (n.d.). *CUDA programming guide*. <https://docs.nvidia.com/cuda/>
21. Rosebrock, A. (2017). *Deep learning for computer vision with Python*. PyImageSearch. <https://dokumen.pub/deep-learning-for-computer-vision-with-python-starter-bundle.html>

Отримано редакцією журналу / Received: 18.01.26

Прорецензовано / Revised: 04.02.26

Схвалено до друку / Accepted: 26.03.26



This work is licensed under Creative Commons Attribution-noncommercial-sharealike 4.0 International License.