

Жлалі Ж. Т., магістр, Джола Є. В., магістр, Манойленко О. П., доц.

Київський національний університет технологій та дизайну

МАШИННИЙ ЗІР: ЯК ФОРМУВАЛОСЯ КОМП'ЮТЕРНЕ «СПРИЙНЯТТЯ СВІТУ»

Анотація. У роботі розглянуто становлення й розвиток технологій машинного зору – напряму штучного інтелекту, що забезпечує комп'ютерам здатність до сприйняття та інтерпретації зображень та об'єктів навколишнього людського зору. Узагальнено історичні етапи розвитку – від класичних алгоритмів обробки контурів до глибоких нейронних мереж та трансформерних архітектур. Описано принципи функціонування систем машинного зору, проаналізовано основні напрями застосування у промисловості, медицині, безпеці, військовій сфері та сільському господарстві. Визначено сучасні виклики та недоліки – залежність від даних, енергоспоживання, етичні ризики. Особливу увагу приділено застосуванню машинного зору у військових технологіях і в контексті переходу до Індустрії 5.0. Машинний зір визначено як ключовий компонент цифрової трансформації та симбіозу людини й технологій.

Ключові слова: машинний зір, глибоке навчання, нейронні мережі, Vision Transformers, OpenCV, військові системи, Індустрія 5.0.

Zhlali Z. T., Master's Student, Dzhola Ye. V., Master's Student, Manoilenko O. P., Assoc.

Kyiv National University of Technologies and Design

MACHINE VISION: HOW COMPUTER "PERCEPTION OF THE WORLD" WAS FORMED

Abstract. The article examines the evolution of machine vision technologies as one of the leading areas of artificial intelligence. It describes historical stages of development – from edge detection algorithms to deep neural networks and transformer architectures. The principles of machine vision systems operation, neural network architecture, modern sensor technologies, and application areas are analyzed in detail. Special attention is paid to the use of machine vision in the military field and its role in the formation of Industry 5.0. Modern challenges and trends are presented – from energy efficiency to explainable models and multisensory systems. The conclusion highlights the strategic importance of machine vision for the future of integrated intelligent systems.

Keywords: machine vision, neural networks, Vision Transformers, OpenCV, sensors, military technologies, Industry 5.0, deep learning.

Вступ. Сучасна Індустрія 4.0 базується на інтеграції інтелектуальних технологій, де машинний зір посідає одне з провідних місць. Як зазначають Лі Чунн, Бенджіо та Хінтон [1], у своїй науковій роботі, машинний зір є центральним компонентом інтелектуальних систем, які наближають машинне сприйняття світу до людського. Сьогодні, технології машинного зору активно застосовуються в повсякденному житті: смартфони з розпізнаванням облич, автономні автомобілі, роботи для контролю якості продукції. На думку Крижевського та Хінтона [2], саме здатність комп'ютера самостійно аналізувати візуальні дані стала переломним моментом у розвитку штучного інтелекту. На сьогодні у світі, де автоматизація стає тенденцією розвитку, машинний зір стає однією з найбільш перспективних складових автономії роботизованого середовища.

Останні роки характеризуються стрімким розвитком систем машинного зору, що все активніше застосовуються у промисловості, медицині, транспорті, сільському господарстві та сфері безпеки. У сучасних розробників і науковців спостерігається загальна тенденція до інтеграції машинного зору з технологіями штучного інтелекту, зокрема глибокими нейронними мережами, у новітні розробки, від автомобілів, до розумних робототехнічних систем. Подібне дозволяє підвищити точність розпізнавання

об'єктів та швидкість обробки даних і подальше зменшує потребу втручання людини у примітивні робочі процеси. У США, Китаї, Японії подібні технології все більше стають нормою повсякденності; робот–касир, чи освіта за допомогою ШІ – все більш звичні, для найбільш технологічно розвинених країн світу, речі. Вітчизняні дослідження, у свою чергу, зосереджені переважно на розробці алгоритмів контролю якості продукції, автономній навігації мобільних роботів і створенні адаптивних систем технічного зору для промислового застосування.

Попри значні досягнення у галузі машинного зору, залишається низка не вирішених питань. Серед них – підвищення надійності розпізнавання об'єктів в умовах недостатнього освітлення, зашумлених або частково перекритих зображень, а також адаптація алгоритмів до змін навколишнього середовища в реальному часі.

Актуальними залишаються завдання зменшення обчислювальної складності моделей, покращення узагальнюючої здатності нейромереж та створення універсальних систем машинного зору, що могли б ефективно працювати у різних галузях без необхідності тривалого перенавчання.

Ці аспекти визначають подальші напрями досліджень і формують основу для розвитку нових підходів у побудові інтелектуальних систем технічного бачення.

Постановка завдання. Метою роботи є дослідження принципів побудови систем машинного зору, аналіз історичного розвитку технології та оцінка сучасних напрямів застосування у промисловій, військовій та соціальній сферах. Для досягнення мети необхідно: узагальнити етапи еволюції комп'ютерного зору; розглянути архітектури глибоких нейронних мереж і трансформерів; визначити напрями практичного використання; окреслити проблеми, тенденції та перспективи розвитку галузі [3, 4].

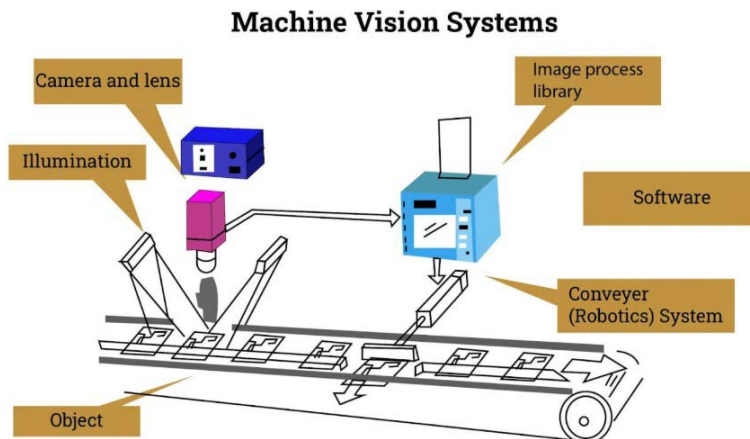
Результати досліджень. Машинний зір є однією з ключових технологій сучасної цифрової епохи, яка поєднує комп'ютерні науки, обробку сигналів, оптику, електроніку та штучний інтелект.

Він забезпечує здатність комп'ютерних систем отримувати, інтерпретувати та аналізувати візуальну інформацію з навколишнього світу. На відміну від звичайного відеоспостереження, системи машинного зору не просто фіксують події, а розпізнають об'єкти, оцінюють їх стан, виявляють відхилення та приймають рішення в автоматичному режимі.

Перші спроби реалізації машинного зору з'явилися у 1960-1970-х роках, коли дослідники використовували примітивні алгоритми Sobel, Canny, Harris corner detector та Hough transform для виявлення контурів і ліній [2]. За даними Лі Чуна та його співавторів в роботі [1], ці класичні алгоритми заклали основу для подальшого створення штучних нейронних мереж, здатних навчатися розпізнаванню образів. Подібні методики були простими, однак не дозволяли визначати зміст зображення, лише контури, та кути між ними. Поява згорткових нейронних мереж (Convolutional Neural Networks – CNN) та перемога моделі AlexNet у конкурсі ImageNet 2012 року [1] стала проривом у галузі. Крижевський, Сютскєвер і Хінтон [2] наголошують, як глибокі нейронні мережі можуть не лише обробляти зображення, але й самостійно формувати ознаки для класифікації, з чого стає зрозуміло технологічний стрибок, який пододала галузь за останню чверть століття.

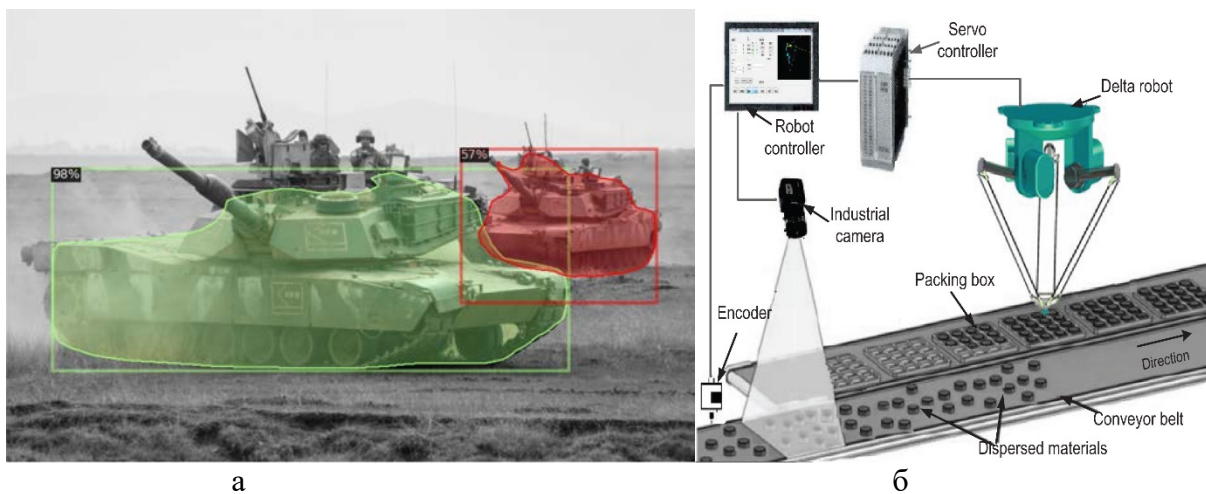
Щорічно, технологія розвивалася і різниця між тим, що було, і що у нас наявне зараз – колосальна. Сучасні системи базуються на глибоких архітектурах і трансформерах (Vision Transformers, ViT), що дає змогу досягати високої точності навіть у складних візуальних середовищах. Типова система машинного зору (рис. 1) [5] складається з кількох основних компонентів: оптичного модуля (камери або сенсора), освітлювальної системи, пристрою оцифрування сигналу, програмного забезпечення для обробки зображень і системи прийняття рішень.

Камера захоплює візуальні дані, після чого алгоритми аналізу зображень, наприклад, фільтри Гауса, Собеля, або сучасні згорткові мережі – CNN виконують сегментацію, класифікацію та оцінку параметрів об'єктів (рис. 2) [6, 7]. NVIDIA [8] зазначає, що апаратне прискорення процесів обробки відео за допомогою GPU значно зменшує затримку систем машинного зору в реальному часі, що робить швидкість машинного аналізу візуальної інформації миттєвим.



Джерело: зображення використано з джерела [5].

Рис. 1. Типова система машинного зору



Джерело: зображення залучено з джерела [6, 7].

Рис. 2. Приклади застосування комп'ютерного зору: а – сегментація та виявлення декількох об'єктів на одному зображенні; б – структурна схема сортувальної системи на базі Delta-робота з інтегрованою підсистемою машинного зору

Системи машинного зору активно впроваджуються у сферу безпеки, біометрії, медицини, агротехнологій, виробництві і навіть космічних досліджень. Згідно з аналітичним звітом Grand View Research [8], використання машинного зору у виробництві зростає щорічно на понад 7%, особливо у сфері контролю якості. І, від галузі до галузі, знаходять все більше можливостей для застосування машинного зору з метою полегшення роботи та збільшення її точності. Наприклад, у медицині вони допомагають виявляти пухлини на ранніх стадіях, аналізуючи МРТ і КТ-знімки, а в аграрній сфері – визначають ступінь зрілості плодів і діагностують хвороби рослин. Як зазначається у звіті Barnes Reports [10], медична діагностика є одним із найдинамічніших напрямів розвитку технологій машинного зору. Машинний зір також лежить в основі автономних

транспортних систем, роботів–маніпуляторів, логістичних дронів та систем моніторингу навколишнього середовища.

Машинний зір виконує різноманітні завдання: ідентифікацію, вимірювання розмірів, виявлення дефектів, відстеження руху, контроль якості, розпізнавання облич і навіть аналіз поведінки. Область застосувань подібної технології обмежується лише уявою інтегруючого її у процеси галузі. У промислових процесах машинний зір дає змогу повністю автоматизувати контроль якості продукції, замінивши людину, з її людським фактором, на високоточну систему. У транспорті машинний зір використовується в системах допомоги водію (ADAS), розпізнаванні дорожніх знаків, контролі смуги руху та автоматичному гальмуванні. Подібних прикладів надзвичайно багато, і, з часом, їх тільки більше. У таблиці 1 нижче наведено узагальнюючу інформацію щодо модулів машинного зору.

Таблиця 1

Класифікація модулів машинного зору за типом і призначенням

Категорія	Тип модуля	Опис / Призначення	Приклади
Апаратні модулі	Камери	Сенсори, що отримують зображення об'єкта у видимому або невидимому спектрі.	CMOS, CCD, 3D ToF, стереокамери
	Об'єктиви	Формують зображення на сенсорі, визначають кут огляду та фокусну відстань.	Телецентричні, зміннофокусні, ширококутні
	Освітлення	Забезпечує рівномірне та стабільне освітлення для зйомки об'єктів.	Кільцеві, лінійні, купольні LED–світильники
	Контролери та інтерфейси	Передають дані між камерою, комп'ютером і системою управління.	GigE, USB 3.0, Camera Link, CoaXPress
Програмні модулі	Захоплення та попередня обробка зображення	Перетворення, фільтрація шумів, вирівнювання яскравості, покращення контрасту.	OpenCV, Halcon, NI Vision
	Сегментація зображення	Виділення об'єктів або областей інтересу для подальшого аналізу.	Методи порогового поділу, Canny, Watershed
	Розпізнавання та класифікація	Визначення типу об'єкта, дефектів або текстур за допомогою алгоритмів машинного навчання.	TensorFlow, PyTorch, YOLO, SVM
	Вимірювання та аналіз геометрії	Обчислення розмірів, площі, кута нахилу чи форми об'єктів.	Metrology SDK, VisionPro Measurement Tools
	Системи прийняття рішень	Інтерпретація результатів аналізу та взаємодія з керуючими системами.	SCADA, PLC інтеграція, Python–скрипти
Інтеграційні модулі	Інтерфейси та комунікація	Забезпечують обмін даними між системою машинного зору та іншими пристроями виробництва.	Ethernet/IP, Modbus, OPC UA
	Людино-машинний інтерфейс (HMI)	Візуалізація даних, результатів обробки та стану системи для оператора.	LabVIEW, Qt, Web–додатки

Джерело: розроблено авторами на основі [1–12].

У сучасному світі, розвиток машинного зору тісно пов'язаний із хмарними обчисленнями, 5G-комунікаціями та інтернетом речей (IoT), що дозволяє передавати і обробляти великі обсяги візуальних даних у реальному часі. Це відкриває можливості для створення масштабних систем аналітики, інтелектуальних міст (Smart City) і цифрового виробництва нового покоління. До того, системи під керівництвом машинного зору, діють змогу людині триматися поодаль від небезпеки і виконувати покладені задачі, навіть з більшою ефективністю, і на безпечній відстані. Вже, під подібні можливості, оптимізувати процеси дослідницькі, виробничі, і, зокрема, методи ведення війни.

У військових технологіях машинний зір виконує ключову роль у забезпеченні ситуаційної обізнаності, моніторингу територій та автономному керуванні технікою (рис. 2). Системи на базі нейронних мереж використовуються для автоматичного виявлення об'єктів, ідентифікації цілей, аналізу місцевості та підтримки рішень операторів.

Згідно з даними Defense Innovation Unit Міністерства оборони США [11], системи комп'ютерного зору є базовим компонентом автономних платформ спостереження та аналізу місцевості. Безпілотні літальні апарати застосовують машинний зір для навігації, оцінки рельєфу, уникнення перешкод і зйомки у складних умовах освітлення.

У поєднанні з тепловізійними сенсорами та інфрачервоними камерами такі системи здатні ефективно працювати уночі або за несприятливої погоди. Як відзначають аналітики DIU [11], поєднання інфрачервоного, теплового та оптичного бачення забезпечує втричі вищу точність виявлення об'єктів у складних умовах. Основною метою їх використання є підвищення точності спостереження, мінімізація ризику для персоналу та оперативна обробка даних у реальному часі.

Концепція Індустрії 5.0 передбачає новий етап розвитку виробництва, де людина і машина діють як партнери, а не як взаємозамінні елементи. Європейська комісія [12] у своїй доповіді наголошує, що Індустрія 5.0 має бути орієнтована на людину, а не лише на технології. Машинний зір стає основним засобом взаємодії колаборативних роботів (*cobots*) з оператором [13]. Завдяки цьому можливе створення інтелектуальних виробничих систем, які розпізнають дії людини, передбачають її наміри та адаптують свою роботу до конкретного середовища. Візуальні сенсорні системи нового покоління дозволяють не лише виявляти дефекти продукції, а й оптимізувати виробничі процеси через аналіз даних у реальному часі. У межах індустрії 5.0 машинний зір виступає засобом досягнення ергономічності, безпеки та гнучкої персоналізації виробництва.

Подальший розвиток машинного зору пов'язаний із поєднанням глибоких нейронних мереж, самоконтрольованого навчання (self-supervised learning) та енергоефективних алгоритмів. За прогнозами Лі Чуна і колег [1], подальше вдосконалення моделей машинного зору буде пов'язане із переходом до самонавчальних систем. Важливим напрямом є створення пояснюваних моделей (*explainable AI*), які дозволять зрозуміти логіку прийняття рішень системою. У перспективі машинний зір стане невід'ємною частиною автономних роботів, транспортних систем, медичних діагностичних платформ та безпекових комплексів. У межах індустрії 5.0 ця технологія сприятиме формуванню антропоцентричних рішень, де штучний інтелект працює не замість людини, а поруч із нею.

Висновки. Машинний зір є базовою технологією штучного інтелекту, яка поєднує аналітичні алгоритми, візуальні сенсори та обчислювальні ресурси. Його розвиток – від класичних алгоритмів до глибоких нейронних мереж і трансформерів – суттєво підвищив точність і швидкість обробки зображень. Сучасні рішення відкривають широкі можливості у військовій сфері, промисловості та медицині. Інтеграція

машинного зору в екосистемі індустрії 5.0 робить цю технологію основою для створення гнучких, безпечних і людиноцентричних виробничих систем.

Список використаної літератури

1. LeCun, Y., Bengio, Y., & Hinton, G. (2015). Deep Learning. *Nature*, 521(7553), 436–444. URL: https://www.researchgate.net/publication/277411157_Deep_Learning.
2. Krizhevsky, A., Sutskever, I., & Hinton, G. (2012). ImageNet Classification with Deep Convolutional Neural Networks. URL: <https://share.google/at7vUNd3eim2auXct>.
3. Deng, J. et al. (2009). ImageNet: A Large-Scale Hierarchical Image Database. URL: <https://share.google/g18z7y82ANtbkXUAN>.
4. Lin, T.-Y. et al. (2014). Microsoft COCO: Common Objects in Context. URL: <https://arxiv.org/abs/1405.0312>.
5. Unbox Industry, "Machine Vision System". *UnboxIndustry.com*, 2023. URL: <https://www.unboxindustry.com/blog/13-machine-vision-system>.
6. Rissanen V., Toivonen E., Lagashkin R., Saastamoinen K., Rissanen A., Vankka J. Instance Segmentation and Classification of Armoured Fighting Vehicles. In: *2022 International Conference on Artificial Intelligence, Big Data, Computing and Data Communication Systems (icABCD)*. Johannesburg: IEEE, 2022. 12 p. URL: https://www.researchgate.net/publication/362867029_Instance_Segmentation_and_Classification_of_Armoured_Fighting_Vehicles.
7. Zhang H., Su T., Wu S., Zheng J., & Wang Y. Simultaneous path planning and trajectory optimization for high-speed sorting system. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2018, Vol. 15, No. 1, P. 1–13. DOI: 10.1177/1729881418797870. URL: <https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/1729881418797870>.
8. Richmond Alake (2022). NVIDIA AI & Vision Tech Blog. The future of computer vision. URL: <https://developer.nvidia.com/blog/the-future-of-computer-vision/>
9. EMIS (2021). Raport Machine Vision Market – Analysis and Forecasts 2021–2028. Grand View Research. URL: https://www.researchgate.net/publication/366895469_Vision_System_in_Product_Quality_Control_Systems.
10. EMIS (2021). Global Forecast for Machine Vision Market (2022–2027 Outlook). Barnes Reports. URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/13/2/751>.
11. Defense Innovation Unit (DIU) (2023). Artificial Intelligence Applications in Military Vision Systems. U.S. DoD Report. URL: <https://www.diu.mil/fy23>.
12. European Commission (2021). Industry 5.0: Towards a Sustainable, Human-Centric and Resilient European Industry. Brussels. URL: https://research-and-innovation.ec.europa.eu/knowledge-publications-tools-and-data/publications/all-publications/industry-50-towards-sustainable-human-centric-and-resilient-european-industry_en.
13. Manoilenko, O., Kalinina, K., Lebedenko, Y., & Didyk, M. (2023). Intelligent control systems of Cobot-type mechatronic systems using ML technologies. *Technologies and Engineering*, 24(6), 31–40. <https://doi.org/10.30857/2786-5371.2023.6.3>.