

УДК 004.93

DOI: <https://doi.org/10.53920/ITS-2022-1-3>

**Олександр Миколайович МАКОВЕЙЧУК,**

д.т.н., доцент, МНТУ

ORCID ID 0000-0003-4425-016X

**Роман Романович ЗАНФІРОВ,**

студент, МНТУ

ORCID ID 0000-0001-9802-0656

**Анатолій Валерійович НАУМЕНКО,**

студент, МНТУ

ORCID ID 0000-0003-3318-7118

**Олександр Олександрович ГАЙОВИЙ,**

студент, МНТУ

ORCID ID 0000-0002-3180-9692

**Володимир Андрійович ВИЯСНІВСЬКИЙ,**

студент, МНТУ

ORCID ID 0000-0001-8547-8764

## **ПРИКЛАД ВИКОРИСТАННЯ ЗГОРТКОВОЇ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ ДЛЯ РОЗПІЗНАВАННЯ НОМІНАЛУ БАНКНОТ**

*Розповсюдженням засобом вирішення задач класифікації, розпізнавання, сегментації зображень є використання згорткових нейронних мереж (Convolutional Neural Networks, CNN). В даній роботі проведено огляд популярних архітектур CNN, що використовуються для розпізнавання об'єктів, до яких належать: Region Based Convolutional Neural Networks (R-CNN), Fast R-CNN, Faster R-CNN, You Only Look Once (YOLO), Single Shot Detector (SSD), Feature Pyramid Networks (FPN) та RetinaNet. Показано, що оптимальною за швидкістю та точністю розпізнавання є згорткова нейронна мережа YOLO.*

*Ефективність використання згорткових нейронних мереж для розпізнавання об'єктів на зображеннях показано на прикладі розробки прототипу системи розпізнавання номіналів банкнот українських гривень та знаходження їх суми. Продемонстровано роботу розробленого прототипу такої системи, для чого було використано YOLOv5 Small архітектуру, яку було дотреновано на зображеннях українських гривень. Для підсумовування кількості грошей на фото була*

**створена окрема програма на python. Вказано характеристики програмних та апаратних засобів, що використовувались. Описано структуру датасетів, що використовувались для тренування та тестування мережі, наведено показники якості розробленого прототипу та проведено порівняння із існуючими системами розпізнавання банкнот.**

**Ключові слова:** обробка зображень, згорточні нейронні мережі, YOLOv5, класифікація банкнот, розпізнавання банкнот.

**Oleksandr MAKOVEICHUK,**  
Doctor of Technical Sciences

**Roman ZANFIROV,**  
student

**Anatoliy NAUMENKO,**  
student

**Oleksandr HAIIOVYI,**  
student

**Volodymyr VYIASNIVSKYI,**  
student

## **AN EXAMPLE OF A CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORK FOR RECOGNIZING THE DENOMINATION OF BANKNOTES**

***A common means of solving the problems of classification, recognition, segmentation of images is the use of Convolutional Neural Networks (CNN). In this paper, we reviewed the popular CNN architectures used for object recognition, including Region Based Convolutional Neural Networks (R-CNN), Fast R-CNN, Faster R-CNN, You Only Look Once (YOLO), Single Shot Detector (SSD), Feature Pyramid Networks (FPN) and RetinaNet. It is shown that the YOLO convolutional neural network is optimal in terms of speed and accuracy of recognition.***

***The effectiveness of convolutional neural networks for the recognition of objects in the images is shown on the example of the development of a prototype system for recognizing the denominations of Ukrainian hryvnia banknotes and finding their sum. The work of the developed prototype of such system is demonstrated for which YOLOv5 Small architecture was used and it was tested on images of Ukrainian hryvnias. For***

**summarizing the amount of money on the photo was created a separate program on python. The characteristics of the used software and hardware are specified. The structure of datasets that were used for training and testing the network is described, quality indicators of the developed prototype and comparison with existing banknote recognition systems are given.**

**The average recognition accuracy for this model is 0.985. To achieve more accurate and objective results, it was proposed to expand the dataset and re-train the network.**

**Keywords:** image processing, convolutional neural networks, YOLOv5, banknote classification, banknote recognition.

**Постановка проблеми.** Виявлення об'єктів – це тип категоризації зображень, при якому нейронна мережа передбачає елементи на зображенні та малює навколо них обмежувальні рамки. Виявлення та локалізація речей на зображенні, що відповідає заданому набору класів, називається виявленням об'єктів [1–3]. Виявлення об'єктів (також відоме як розпізнавання об'єктів) є важливою областю комп'ютерного зору, оскільки такі завдання, як виявлення, ідентифікація та локалізація, знаходять широке застосування в реальних контекстах [4, 5].

Важливою практичною задачею розпізнавання зображень є задача знаходження та розпізнавання банкнот по фото чи відео [6–9]. У даній роботі запропоновано розробити прототип системи розпізнавання номіналів банкнот українських гривень за допомогою згорткових нейронних мереж, що дозволяє повною мірою продемонструвати особливості і переваги їх використання у реальних прикладних задачах обробки зображень.

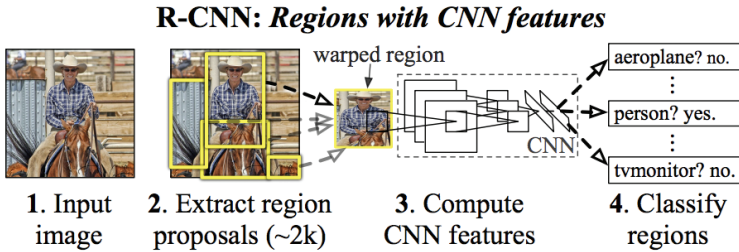
**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Ефективним засобом вирішення задач класифікації, розпізнавання, сегментації зображень є використання згорткових нейронних мереж (Convolutional Neural Networks, в подальшому CNN) [10].

До популярних архітектур CNN для розпізнавання об'єктів належать такі [11]:

- Region Based Convolutional Neural Networks (R-CNN) [12].

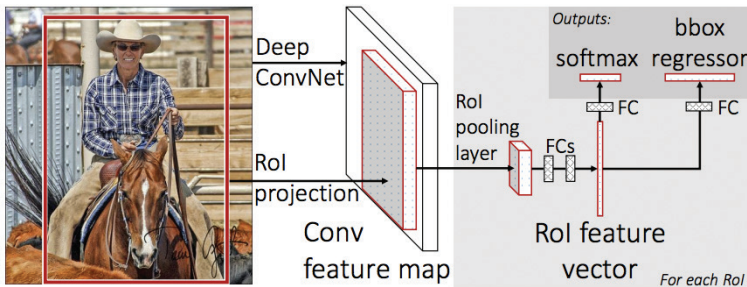
Дана модель запропонована одною з перших для вирішення задачі класифікації зображень. На вхід мережі подаються різні регіони зображення, що генеруються за допомогою алгоритму Selective Search [13], і для них робиться передбачення, до якого класу вони

належать (рис. 1). Дана архітектура є повільною, оскільки опрацьовує одне зображення десятки тисяч разів.



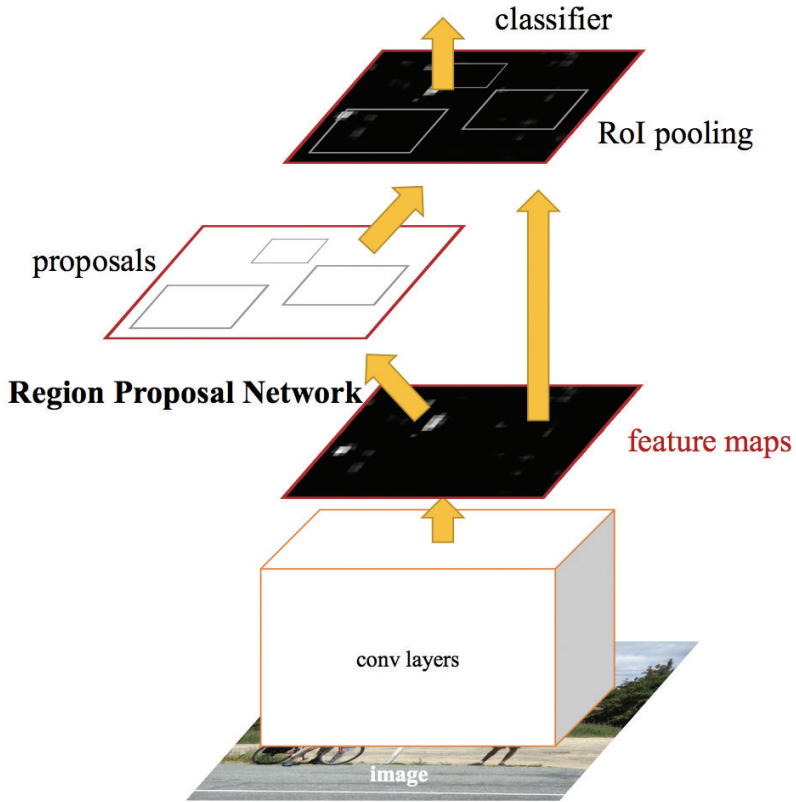
**Рис. 1. Схематичне зображення згорткової нейронної мережі R-CNN [11]**

• Fast R-CNN [14]. Покращена і швидша версія R-CNN, працює за схожим принципом, але замість зображення кожного регіону в CNN передаються області згорткового шару, після чого за допомогою повнозв'язного шару (fully connected layer) та за допомогою нормованої експоненційної функції (softmax) визначається до якого класу належить регіон та уточнюється його розташування (рис. 2). Ця архітектура все ще досить повільна для задач реального часу.



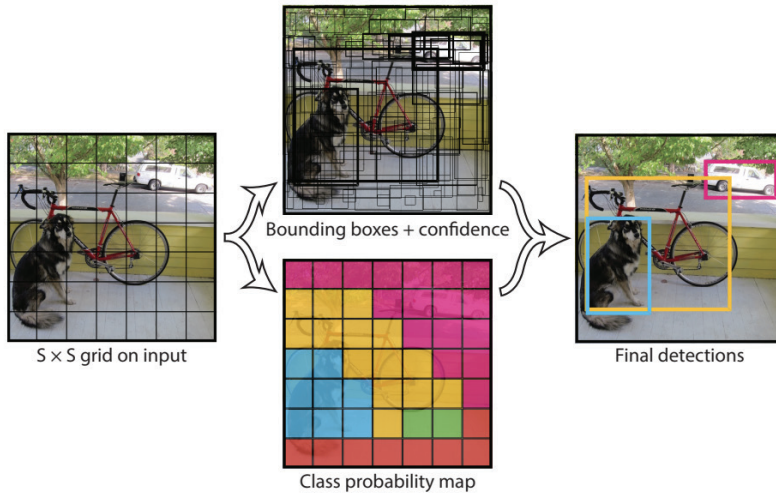
**Рис. 2. Схематичне зображення згорткової нейронної мережі Fast R-CNN [11]**

• Faster R-CNN [15]. Головна відмінність від попередніх у тому, що замість алгоритму Selective Search для вибору регіонів використовує нейронну мережу для їх навчання (рис. 3).



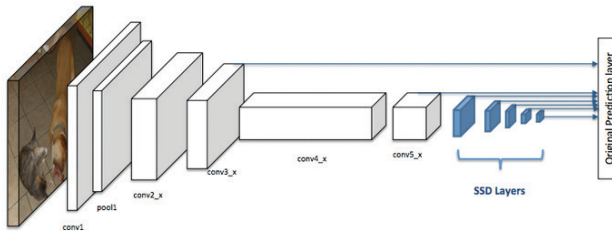
**Рис. 3. Схематичне зображення згорткової нейронної мережі Faster R-CNN [11]**

• You Only Look Once (YOLO) [16]. Зовсім інший принцип роботи порівняно з попередніми, не використовує регіони взагалі – у YOLO єдина згорточна мережа передбачає обмежувальні рамки та ймовірності класу для цих рамок (рис. 4). Дана архітектура є найшвидшою у порівнянні з попередніми (~40-200 fps [11]).



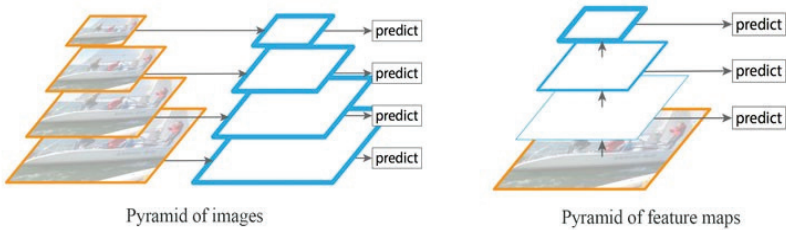
**Рис. 4. Схематичне зображення принципу роботи згорткової нейронної мережі YOLO [11]**

• Single Shot Detector (SSD) [17]. За принципом схожа на YOLO, але для отримання ознак використовує мережу VGG16 [18] (рис. 5). Ця архітектура достатньо швидка для використання у реальному часі.



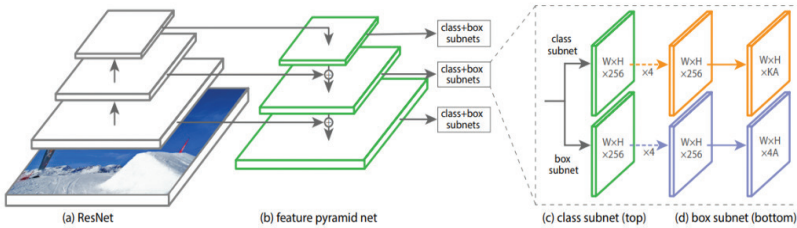
**Рис. 5. Схематичне зображення архітектури згорткової нейронної мережі SSD [17]**

• Feature Pyramid Networks (FPN) [19]. Різновид мережі типу Single Shot Detector, через особливості визначення ознак краще ніж SSD розпізнає дрібні об'єкти (рис. 6).



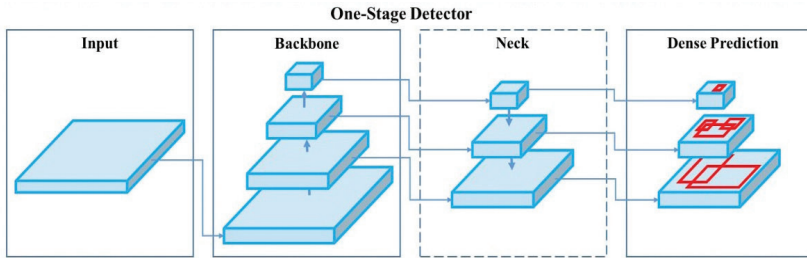
**Рис. 6. Схематичне зображення згорткової нейронної мережі Feature Pyramid Networks [19]**

• RetinaNet [20]. Використовує комбінацію FPN + ResNet [21] і завдяки спеціальній функції помилки (focal loss) дає вищу точність (рис. 7).



**Рис. 7. Схематичне зображення згорткової нейронної мережі RetinaNet [20]**

В даній роботі використовувалась архітектура YOLO, а саме її остання модифікація YOLOv5. YOLOv5 відноситься до архітектури One-Stage detector (рис. 8) – підхід, який передбачає координати певної кількості регіонів з результатами класифікації та ймовірності знаходження об'єкта, і надалі коригуючи їх місцезнаходження. Переваги даного підходу полягає в тому, що мережа аналізує все зображення відразу і враховує контекст при детектуванні і розпізнаванні об'єкта. Тому алгоритми сімейства YOLO на 3 порядки швидше, ніж R-CNN і на 2 порядки швидше ніж Fast R-CNN [11].



**Рис. 8. Схематичне зображення архітектури One-Stage detector**

**Мета статті** – продемонструвати роботу прототипу системи розпізнавання номіналу банкнот українських гривень та знаходження їх суми за допомогою згорточної нейронної мережі YOLOv5.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Для розробки прототипу було використано YOLOv5 Small архітектуру, яку було дотреновано на зображеннях українських гривень. Для підсумовування кількості грошей на фото була створена програма на python.

**Опис датасетів.** Для навчання мережі та подальших експериментів використовувався датасет, що складався з фотографій з різних ракурсів, зроблених за допомогою мобільних телефонів (див. Таблицю 1): Xiaomi Redmi 5 Plus (12 MP камера), Huawei Y7 TRT-LX1 (12 MP камера), Huawei Y6 (12 MP камера), Redmi note 9.

**Таблиця 1. Опис датасету**

Модель смартфона	Роздільна здатність камери	Training set	Validation set	Testing set	Загальна кількість фотографій
Xiaomi Redmi 5 Plus	12MP, 4000×3000	175	65	12	252
Huawei Y7 TRT-LX1	12MP, 3000×4000	175	65	12	252
Huawei Y6	13MP, 3000×4000	175	65	12	252
Redmi note 9	48MP, 8000×6000	175	65	12	252
Всього:		700	260	48	1008



Загальна кількість фотографій 1008, з них 700 використовувались для тренування (training set), 260 для валідації (validation set) і 48 для тесту (testing set). Кількість зображень було збільшено у 3 рази за допомогою процедури аугментації (augmentation), яка здійснювалась з використанням таких фільтрів: Flip Horizontal, Flip Vertical, Gaussian Blur 1.25px. Всі зображення приведено до розміру 640×480 пікселів.

Датасет не включає банкноти номіналом 1 грн, 2 грн, 5 грн, 10 грн, тому в процесі тренування вони участі не брали. Додатково датасет включав декілька зображень, на яких не було жодної банкноти (т. зв., 0-гіпотеза). Це збільшило точність розпізнавання та зменшило похибку при визначенні класу (який в даному випадку відповідає номіналу банкноти).

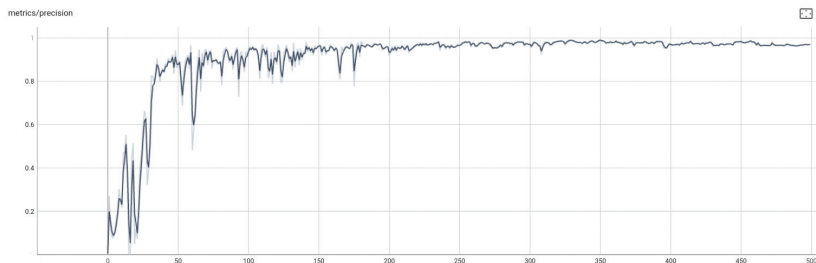
**Процес тренування.** Для тренування були використана натренована модель YOLOv5 Small, яку було дотреновано на описаному датасеті. Для тренування нейронної мережі було використано наступні апаратні засоби: процесор Xeон® E5-2683 v3, 128 ГБ оперативної пам'яті, з використанням графічного процесора RTX 3090 (44 TFLOPS). Для програмування використовувалась високорівнева мова програмування – Python 3.10.5 [22] з використанням фреймворків PyTorch 1.12 [23], OpenCV 4.5.5 [24]. Час тренування: близько 35 хв.

**Отримані результати.** Точність розпізнавання для кожного із класів наведено у Таблиці 2.

**Таблиця 2. Точність розпізнавання для кожного із класів**

Клас (номінал банкноти)	Кількість зображень	Середня точність
«20 грн»	130	0.981
«50 грн»	130	0.966
«100 грн»	130	0.937
«200 грн»	130	1
«500 грн»	130	0.975
«1000 грн»	130	0.938
Всі класи	780	0.985

Найкращою по середній точності розпізнавання стала 500 епоха (див. рис.9), її було обрано для тестування та візуалізації результатів. Середня точність моделі виходить 0.985.



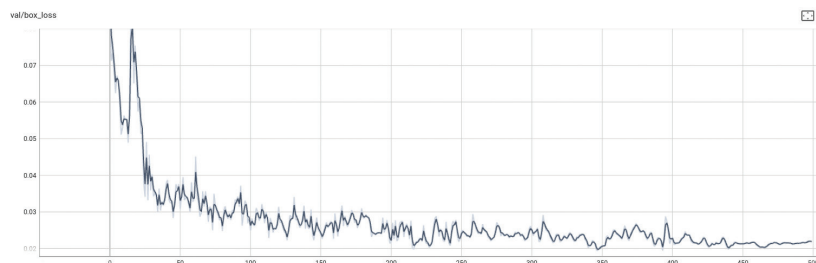
**Рис. 9. Середня точність розпізнавання моделі в залежності від номера епохи**

На рис. 10 зображено графіки середньої похибки тренування для training set і для validation set.

а)

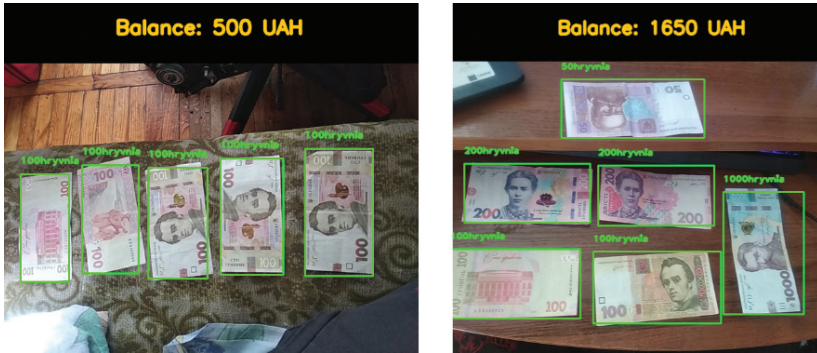


б)



**Рис. 10. Середні похибки тренування в залежності від номера епохи: а) training set; б) validation set**

На рис. 11 зображено приклад роботи розробленої програми.



**Рис. 11. Приклади роботи програми: зображено області детектованих банкнот, їх номінали та загальна сума**

**Порівняння з існуючими системами.** В літературі описано декілька рішень на основі сімейства алгоритмів YOLO [9], але розпізнавання саме українських банкнот автори не зустрічали. Близькими альтернативами, які мають схожу тематику, є такі ресурси:

- класифікація банкнот, код викладений на платформі kaggle.com [25];
- перевірка банкноти на підробку [26];
- комерційне рішення перевірки банкнот [27].

Порівняльні характеристики наведено у Таблиці 2.

**Таблиця 2. Порівняння ефективності запропонованого рішення**

Параметр	Класифікація банкнот [25]	Перевірка банкноти на підробку [26]	Комерційне рішення перевірки банкнот [27]	Запропоноване рішення
Точність	1.0	0.65	0.95	0.98
Валюта	USD	USD	ETB	UAH
Ціна	free	free	non-free	free
Кількість класів	2	2	24	6

**Висновки та пропозиції.** Таким чином, на простій модельній задачі було показано особливості розробки прототипу системи розпізнавання зображень за допомогою згорткових нейронних мереж. Натренована модель дає можливість точного розпізнавання номіналів банкнот та знаходження їх суми. При використанні архітектури YOLOv5 Small є можливість запуску моделі на мобільних телефонах.

Середня точність розпізнавання для даної моделі виходить 0.985. Для досягнення більш точних та об'єктивних результатів необхідно розширити датасет та дотренувати мережу.

© **Маковейчук О.М., Занфіров Р.Р., Науменко А. В., Гайовий О.О.,  
Вияснівський В. А., 2022**

## ЛІТЕРАТУРА

1. Gonzalez, R. C. and Woods, R. C. Digital image processing. New York, NY: Pearson, 2018.
2. Guan, L.; He, Y.; Kung, S.-Y. Multimedia Image and Video Processing. CRC Press. pp. 331. ISBN 978-1-4398-3087-1.
3. Roth, Peter M. & Winter, Martin. SURVEY OF APPEARANCE-BASED METHODS FOR OBJECT RECOGNITION (PDF). Technical Report. ICG-TR-01/08.
4. Alsanabani, Ala; Ahmed, Mohammed; AL Smadi, Ahmad. Vehicle Counting Using Detecting-Tracking Combinations: A Comparative Analysis. 2020 the 4th International Conference on Video and Image Processing. pp. 48–54. doi:10.1145/3447450.3447458. ISBN 9781450389075. S2CID 233194604.
5. Wu, Jianxin, et al. A scalable approach to activity recognition based on object use. 2007 IEEE 11th international conference on computer vision. IEEE, 2007.
6. Kwon, S, Pham, T., Park, K., Jeong, D., and Yoon, S. Recognition of Banknote Fitness Based on a Fuzzy System Using Visible Light Reflection and Near-infrared Light Transmission Images, Sensors, vol. 16, no. 6, p. 863, Jun. 2016, doi: 10.3390/s16060863.
7. Sarfraz, M. "An Intelligent Paper Currency Recognition System," Procedia Computer Science, vol. 65, pp. 538–545, 2015, doi: 10.1016/j.procs.2015.09.128.

8. Currency Recognition Using OpenCV Python. URL: <https://phdservices.org/currency-recognition-using-opencv-python/> (дата звернення: 06.07.2022).

9. Joshi, R., Yadav, S., Dutta, M. YOLO-v3 Based Currency Detection and Recognition System for Visually Impaired Persons, 2020, pp. 280-285. doi: 10.1109/IC3A48958.2020.233314.

10. Yamashita, R., Nishio, M., Do, R.K.G. et al. Convolutional neural networks: an overview and application in radiology. *Insights Imaging* 9, 611–629 (2018). DOI: 10.1007/s13244-018-0639-9

11. Gandhi, Rohith. R-CNN, Fast R-CNN, Faster R-CNN, YOLO – Object Detection Algorithms. 2018. URL: <https://towardsdatascience.com/r-cnn-fast-r-cnn-faster-r-cnn-yolo-object-detection-algorithms-36d53571365e> (дата звернення: 30.06.2022).

12. Girshick, R., Donahue, J., Darrell T., and Malik, J. Rich Feature Hierarchies for Accurate Object Detection and Semantic Segmentation, 2014 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2014, pp. 580-587, doi: 10.1109/CVPR.2014.81.

13. Uijlings, J., Sande, K. van de, Gevers, T., and Smeulders, A. Selective search for object recognition. *IJCV*, 2013.

14. Girshick, R., Fast R-CNN, 2015 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV), 2015, pp. 1440-1448, doi: 10.1109/ICCV.2015.169.

15. Ren, S., He, K., Girshick, R. B., Sun, J. Faster R-CNN: Towards Real-Time Object Detection with Region Proposal Networks. Paper presented at the meeting of the NIPS, 2015.

16. Redmon, J., Divvala, S., Girshick, R., Farhadi, A. You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection. 2016, pp. 779-788. doi: 10.1109/CVPR.2016.91.

17. Liu, W., Anguelov, D., Erhan, D., Szegedy, C., Reed, S., Fu, C. SSD: Single Shot MultiBox Detector, 2016. arXiv:1512.02325.

18. Simonyan, K., Zisserman, A. Very Deep Convolutional Networks for Large-Scale Image Recognition, 2014. arXiv: 1409.1556.

19. Lin, T., Dollár, P., Girshick, R., He, K., Hariharan, B., Belongie, S. Feature Pyramid Networks for Object Detection, 2016. arXiv:1612.03144.

20. Lin, T., Goyal, P., Girshick, R., He, K. Focal Loss for Dense Object Detection, 2017. arXiv:1708.02002.

21. He, K., Xiangyu, Z, Shaoqing, R, Jian, S. Deep Residual Learning for Image Recognition, 2016 IEEE Conference on Computer Vision and

Pattern Recognition (CVPR). Las Vegas, NV, USA: IEEE. pp. 770–778. arXiv:1512.03385. doi:10.1109/CVPR.2016.90. ISBN 978-1-4673-8851-1.

22. Python. Дата оновлення: 06.06.2022. Python 3.10.5 URL: <https://www.python.org/downloads/release/python-3105/> (дата звернення: 06.07.2022).

23. PyTorch Team. Дата оновлення: 28.06.2022. PyTorch 1.12: TorchArrow, Functional API for Modules and nvFuser, are now available, URL: <https://pytorch.org/blog/pytorch-1.12-released/> (дата звернення: 06.07.2022).

24. OpenCV Library Дата оновлення: 30.12.2021. OpenCV 4.5.5 Is Now Available! URL: <https://opencv.org/opencv-4-5-5/> (дата звернення: 06.07.2022).

25. Bank Note Authentication - Classification, URL: <https://www.kaggle.com/code/balams/bank-note-authentication-classification/notebook> (дата звернення: 06.07.2022).

26. Chen, John. Дата оновлення: 01.06.2021. K-Means Clustering Project: Banknote Authentication, URL: <https://towardsdatascience.com/k-means-clustering-project-banknote-authentication-289cfe773873> (дата звернення: 06.07.2022).

27. Aseffa, D., Kalla, H., Mishra, S. Ethiopian Banknote Recognition Using Convolutional Neural Network and Its Prototype Development Using Embedded Platform, Journal of Sensors, vol. 2022, Article ID 4505089, 18 pages, 2022. doi: 10.1155/2022/4505089

28. Khudov, H., Khizhnyak, I. et al. The Optimization Technique for Joint Discrete Search and Detection of Observation Objects, International Journal of Emerging Trends in Engineering Research, № 8(2), 2020, pp. 533–538. doi: 10.30534/ijeter/2020/42822020.

## REFERENCES

1. Gonzalez, R. C. and Woods, R. C. "Digital image processing". New York, NY: Pearson, 2018.

2. Guan, L.; He, Y.; Kung, S.-Y. (March 1, 2012). "Multimedia Image and Video Processing." CRC Press. pp. 331–. ISBN 978-1-4398-3087-1.

3. Roth, Peter M. & Winter, Martin (2008). "SURVEY OF APPEARANCE-BASED METHODS FOR OBJECT RECOGNITION" (PDF). Technical Report. ICG-TR-01/08.

4. Alsanabani, Ala; Ahmed, Mohammed; AL Smadi, Ahmad (2020). «Vehicle Counting Using Detecting-Tracking Combinations: A Comparative Analysis». 2020 the 4th International Conference on

Video and Image Processing. pp. 48–54. doi:10.1145/3447450.3447458. ISBN 9781450389075. S2CID 233194604.

5. Wu, Jianxin, et al. «A scalable approach to activity recognition based on object use.» 2007 IEEE 11th international conference on computer vision. IEEE, 2007.

6. S. Kwon, T. Pham, K. Park, D. Jeong, and S. Yoon, "Recognition of Banknote Fitness Based on a Fuzzy System Using Visible Light Reflection and Near-infrared Light Transmission Images," *Sensors*, vol. 16, no. 6, p. 863, Jun. 2016, doi: 10.3390/s16060863.

7. Sarfraz, M. "An Intelligent Paper Currency Recognition System," *Procedia Computer Science*, vol. 65, pp. 538–545, 2015, doi: 10.1016/j.procs.2015.09.128.

8. "Currency Recognition Using OpenCV Python", available at: <https://phdservices.org/currency-recognition-using-opencv-python/>. (Accessed 6 July 2022).

9. Joshi, R., Yadav, S., Dutta, M. "YOLO-v3 Based Currency Detection and Recognition System for Visually Impaired Persons", 2020, pp. 280-285. doi: 10.1109/IC3A48958.2020.233314.

10. Yamashita, R., Nishio, M., Do, R.K.G. et al. "Convolutional neural networks: an overview and application in radiology". *Insights Imaging* 9, 611–629 (2018). doi: 10.1007/s13244-018-0639-9

11. Gandhi, Rohith (July 9, 2018). "R-CNN, Fast R-CNN, Faster R-CNN, YOLO – Object Detection Algorithms", available at: <https://towardsdatascience.com/r-cnn-fast-r-cnn-faster-r-cnn-yolo-object-detection-algorithms-36d53571365e> (Accessed 30 June 2022).

12. Girshick, R., Donahue, J., Darrell T., and Malik, J. "Rich Feature Hierarchies for Accurate Object Detection and Semantic Segmentation," 2014 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2014, pp. 580–587, doi: 10.1109/CVPR.2014.81.

13. Uijlings, J., van de Sande, K., Gevers, T. and Smeulders. A. "Selective search for object recognition". *IJCV*, 2013.

14. Girshick, R.,»Fast R-CNN,» 2015 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV), 2015, pp. 1440-1448, doi: 10.1109/ICCV.2015.169.

15. Ren, S., He, K., Girshick, R. B., Sun, J. «Faster R-CNN: Towards Real-Time Object Detection with Region Proposal Networks». Paper presented at the meeting of the NIPS, 2015.

16. Redmon, J., Divvala, S., Girshick, R., Farhadi, A. "You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection". 2016, pp. 779-788. doi: 10.1109/CVPR.2016.91.

17. Liu, W., Anguelov, D., Erhan, D., Szegedy, C., Reed, S., Fu, C.: "SSD: Single Shot MultiBox Detector", 2016. arXiv:1512.02325.

18. Simonyan, K., Zisserman, A. "Very Deep Convolutional Networks for Large-Scale Image Recognition", 2014. arXiv: 1409.1556.

19. Lin, T., Dollár, P., Girshick, R., He, K., Hariharan, B., Belongie, S. "Feature Pyramid Networks for Object Detection", 2016. arXiv:1612.03144.

20. Lin, T., Goyal, P., Girshick, R., He, K. "Focal Loss for Dense Object Detection", 2017. arXiv:1708.02002.

21. He, K., Xiangyu, Z, Shaoqing, R, Jian, S. "Deep Residual Learning for Image Recognition", 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Las Vegas, NV, USA: IEEE. pp. 770–778. arXiv:1512.03385. doi:10.1109/CVPR.2016.90. ISBN 978-1-4673-8851-1.

22. Python (June 6, 2022). "Python 3.10.5", available at: <https://www.python.org/downloads/release/python-3105/> (Accessed 6 July 2022)

23. PyTorch Team (June 28, 2022). "PyTorch 1.12: TorchArrow, Functional API for Modules and nvFuser, are now available", available at: <https://pytorch.org/blog/pytorch-1.12-released/> (Accessed 6 July 2022)

24. OpenCV Library (December 30, 2021), "OpenCV 4.5.5 Is Now Available!", available at: <https://opencv.org/opencv-4-5-5/> (Accessed 6 July 2022)

25. "Bank Note Authentication - Classification", available at: <https://www.kaggle.com/code/balams/bank-note-authentication-classification/notebook> (Accessed 6 July 2022)

26. Chen, John (Jun 1, 2021), "K-Means Clustering Project: Banknote Authentication", available at: <https://towardsdatascience.com/k-means-clustering-project-banknote-authentication-289cfe773873> (Accessed 6 July 2022)

27. Aseffa, D., Kalla, H., Mishra, S. "Ethiopian Banknote Recognition Using Convolutional Neural Network and Its Prototype Development Using Embedded Platform", Journal of Sensors, vol. 2022, Article ID 4505089, 18 pages, 2022. doi: 10.1155/2022/4505089

28. Khudov, H., Khizhnyak, I. et al. "The Optimization Technique for Joint Discrete Search and Detection of Observation Objects", International Journal of Emerging Trends in Engineering Research, № 8(2), 2020, pp. 533–538. doi: 10.30534/ijeter/2020/42822020.

**СТАТТЯ НАДІЙШЛА ДО РЕДАКЦІЇ 12.04.2022**