


*О. В. Хлевной, Д. А. Райта, Н. Є. Бурак,
 Ю. О. Борзов*

Львівський державний університет безпеки життєдіяльності
 ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2846-3480> – О. В. Хлевной
<https://orcid.org/0000-0001-7002-7725> – Д. А. Райта
<https://orcid.org/0000-0002-3380-4077> – Н. Є. Бурак
<https://orcid.org/0000-0002-0604-0498> – Ю. О. Борзов
 olexandr.khlevnoy@gmail.com

ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ РУХУ ЕВАКУАЦІЙНИХ ПОТОКІВ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ШТУЧНИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ

Вступ. Незважаючи на наявність сучасних програмно-імітаційних комплексів, параметри руху учасників евакуації для цих комплексів визначаються шляхом встановлення залежностей між щільністю потоку та швидкістю руху учасників евакуації. Виявити ці залежності можна загалом за результатами польових спостережень та обробки відеозаписів цих спостережень, що займає багато часу та потребує великих зусиль і свідчить про необхідність автоматизації та оптимізації процесу обробки відео.

На особливу увагу заслуговують інструменти аналізу та класифікації зображень, а також виявлення та класифікації рухомих об'єктів у відеопотоці, які можуть бути успішно використані для вивчення проблем евакуації у разі пожежі.

Метою статті є розробка концептуальної моделі програмної системи із застосуванням штучних нейронних мереж для формування баз емпіричних даних параметрів руху евакуаційних потоків на основі аналізу даних відеопотоку.

Методи дослідження. Описано вирішення задачі класифікації учасників евакуації за групами мобільності із використанням методів машинного навчання, зокрема методу зворотнього поширення похибки, що базується на алгоритмі градієнтного спуску.

Основні результати дослідження. У роботі наведено концептуальну модель для визначення параметрів руху евакуаційних потоків за даними камер відеоспостереження із застосуванням штучної нейронної мережі та алгоритму SORT. Запропоновано архітектуру згорткової нейронної мережі для вирішення задачі класифікації учасників евакуації за групами мобільності, представлену двома згортковими шарами, двома шарами субдискретизації, двома прихованими повнозв'язними шарами та вихідним класифікаційним шаром нейронів. Наведено модель для визначення швидкості руху учасників евакуації на основі алгоритму SORT.

Висновок. Реалізація запропонованої концептуальної моделі дає можливість отримувати значення миттєвої швидкості руху учасників евакуації з їх зберіганням до окремого файлу, що суттєво пришвидшує процес формування баз емпіричних даних параметрів та має важливе практичне значення для подальших наукових досліджень процесів евакуації змішаних людських потоків під час пожежі.

Ключові слова: евакуація у разі пожежі, швидкість руху, група мобільності, машинне навчання, згорткові нейронні мережі.

O. Khlevnoy, D. Raita, N. Ye. Burak, Yu. Borzov
 Lviv State University of Life Safety, Lviv, Ukraine

MOVEMENT PARAMETERS DETERMINATION OF EVACUATION FLOWS USING ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS

Introduction. Despite the availability of modern software simulation complexes, the evacuation participant's movement parameters for these complexes are determined by establishing dependencies between the flow density and the movement velocity of the participants. These dependencies can be detected mainly by the results of field observations and video processing of these observations, which takes a lot of time, requires a lot of effort and indicates the need to automate and optimise the video processing process.

It is necessary to note that the tools for image analysis and classification, as well as the detection and classification of moving objects in the video stream, can be successfully used to study fire evacuation problems.

The purpose of the article is to develop a conceptual model of a software system using artificial neural networks for the formation of movement parameters empirical databases based on video flow analysis.

Methods. The solution to the problem of evacuation participant's classification by mobility groups using machine learning methods is described, in particular the method of backpropagation based on the gradient descent algorithm.

Results. The work presents a conceptual model for determining the movement parameters of evacuation flows based on the data from video surveillance cameras using an artificial neural network and the SORT algorithm. A convolutional neural network architecture is proposed for solving the problem of evacuation participants' classification by mobility groups. It is represented by 2 convolutional layers, 2 Max Pooling layers, two hidden fully connected layers and an output classification layer. A model for determining the movement velocity of evacuation participants based on the SORT algorithm is given.

Conclusion. The implementation of the proposed conceptual model allows obtaining the values of the evacuation participant's instantaneous movement velocity with their storage in a separate file, which significantly speeds up the process of empirical movement parameter database forming. The model can be very useful for further scientific studies of evacuation processes with mixed human flows.

Keywords: fire evacuation, movement velocity, mobility group, machine learning, convolutional neural network

Постановка проблеми. Прогнозування тривалості евакуації людей із будівель і споруд є важливим завданням, яке дає змогу оцінити значення індивідуального пожежного ризику. Тривалість евакуації залежить від багатьох факторів, які можна розділити на 3 великі групи. Перша група містить інформацію про призначення будівлі, особливості об'ємно-планувальних рішень та відповідність евакуаційних шляхів і виходів вимогам чинних норм. Друга група характеризує параметри розвитку пожежі: місце її виникнення, швидкість розповсюдження небезпечних чинників (температура, задимлення, концентрація CO, CO₂, HCl тощо). Третя група – визначає кількість учасників евакуації, що перебувають у будівлі, їх мобільність, віковий склад. Щоб якомога точніше спрогнозувати тривалість евакуації потрібно максимально точно врахувати усі згадані фактори. При цьому найбільше проблем виникає саме із прогнозуванням поведінки учасників евакуації, оскільки для різних об'єктів склад та конфігурація евакуаційних потоків може суттєво відрізнятися, а ідентифікувати усі можливі варіанти – складне багатофакторне завдання. Визначальними параметрами для моделювання руху евакуаційних потоків є швидкість руху учасників, яка напряму залежить як від суб'єктивних (група мобільності, вік, антропометричні характеристики), так і об'єктивних (щільність потоку) показників. У нормативних документах [1], що регламентують розрахунок тривалості евакуації з будівель, використовуються залежності швидкості руху потоку від щільності для різних груп мобільності, представлені у вигляді графіків або таблиць. Саме ці дані беруться у якості вихідних для розрахунку тривалості евакуації. Очевидно, що ці дані не можуть забезпечити належної точності розрахунків для змішаних потоків. Для кожного складу потоку встановлення залежності швидкості руху від щільності потребує проведення натурних спостережень з подальшою

обробкою відеозаписів та формуванням масштабних баз емпіричних даних та є надзвичайно трудоемким процесом. Полегшити цей процес можливо, застосовуючи сучасні інформаційні технології, зокрема системи штучного інтелекту.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Велику кількість робіт вітчизняних та зарубіжних науковців присвячено дослідженням евакуації з будівель різного призначення: закладів охорони здоров'я та установ для людей похилого віку, закладів дошкільної освіти та середньої шкільної освіти [2]. Також значну увагу приділено евакуації осіб, що пересуваються на кріслах колісних [3, 4] та евакуації дітей з особливими потребами [5].

У цих та багатьох інших роботах параметри руху потоків визначалися на основі опрацювання записів відеокамер без застосування програмних засобів аналізу відеопотоку. В той же час на основі аналізу ряду досліджень [6-9] можна зробити висновок, що засоби аналізу та класифікації зображень, а також виявлення та класифікації рухомих об'єктів у відеопотоці дають змогу отримати якісні результати. Варто відзначити наявність у відкритому доступі великої кількості реалізацій нейромереж [10-15], що дозволяють здійснювати розпізнавання та аналіз рухомих об'єктів. Це відкриває непогані перспективи для отримання великих масивів даних про рух евакуаційних потоків та встановлення залежностей між швидкістю руху та щільністю людей у цих потоках.

Метою статті є розробка концептуальної моделі програмної системи із застосуванням штучних нейронних мереж для формування баз емпіричних даних параметрів руху евакуаційних потоків на основі аналізу даних відеопотоку.

Методи дослідження. Описано вирішення задачі класифікації учасників евакуації за групами мобільності із використанням методів машинного навчання, зокрема методу

зворотнього поширення похибки, що базується на алгоритмі градієнтного спуску.

Виклад основного матеріалу. На об'єктах різного призначення структура людських потоків може суттєво відрізнятись. Наприклад, у закладах торгівлі відсоток відвідувачів без будь-яких обмежень за мобільністю буде значно вищим, ніж у закладах охорони здоров'я, а відтак характеристичні для потоку залежності швидкості руху від щільності будуть суттєво іншими. В кожному випадку визначення цих параметрів відбувається шляхом проведення експериментів або натурних спостережень, які фіксуються за допомогою відеокамер (або камер систем відспостереження).

При цьому, кадр із кожної камери переноситься у довільний графічний редактор, в якому на зображення наноситься сітка, яка розбиває всю площу спостереження на квадрати визначеного розміру (рисунок 1). Після цього сітка (без кадру) зберігається у форматі PNG і за допомогою довільного додатка для відеомонтажу накладається на відповідний відеозапис. За кадрами, взятими із певною періодичністю, можна визначити як шлях, що проходить учасник потоку за відповідний проміжок часу, а отже, швидкість руху, так і кількість людей на визначеній ділянці площі, тобто щільність потоку.



Рисунок 1 – Поділ евакуаційного шляху на фрагменти визначеної площі

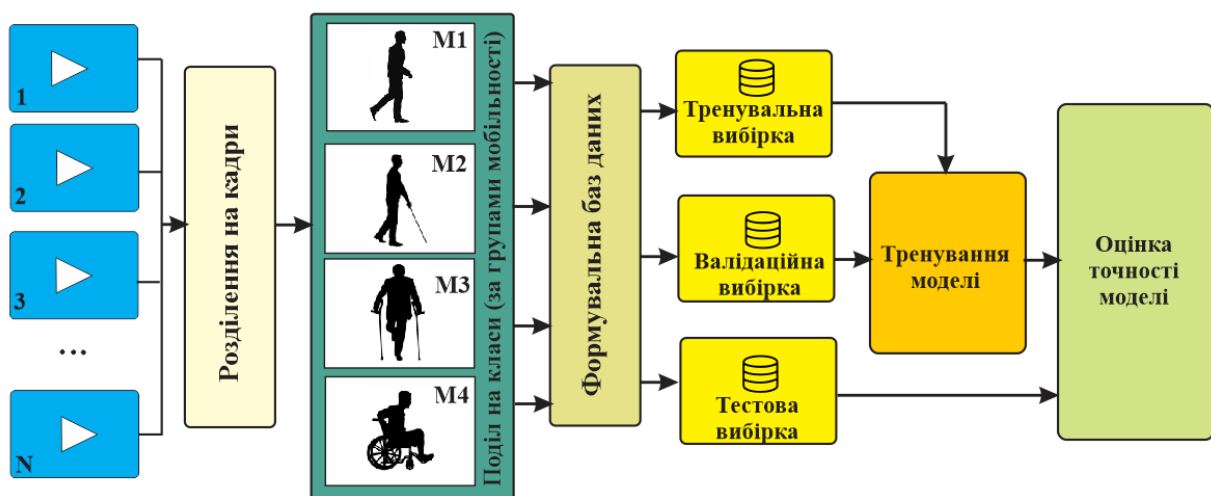
Отримані за результатами натурних спостережень значення швидкості групують за щільністю та зводять у варіаційні інтервальні ряди в порядку її зростання. За отриманими значеннями визначають регресійну залежність швидкості руху від щільності. Відтворюваність перевіряють на основі аналізу записів камер відспостереження на реальних об'єктах.

Досвід використання цього методу показує, що час, який необхідно затратити для отримання необхідної кількості замірів, іноді може

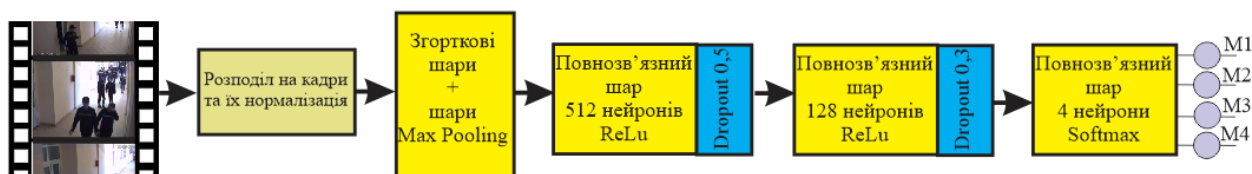
становити кілька місяців. При цьому похибки вимірювань швидкості на ділянках, розташованих далеко від камер, іноді можуть бути значними через явище перспективного спотворення.

Підвищити швидкість та точність процесу отримання емпіричних даних можливо, застосувавши неймережевий аналіз евакуаційних потоків.

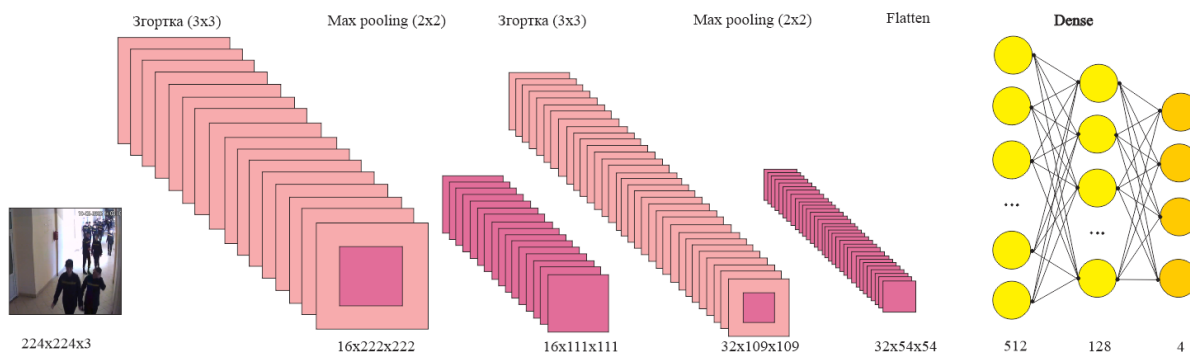
На першому етапі відбувається розподіл учасників евакуації за групами мобільності (M1, M2, M3, M4). Для цього необхідно вирішити задачу класифікації (рисунок 2).



а)



б)



в)

Рисунок 2 – Концептуальна модель розпізнавання учасників евакуації та класифікації їх за групами мобільності:
а) принципова схема навчання нейромережі; б) загальна архітектура мережі;
в) структура шарів нейронної мережі.

В якості вхідних даних використовують кадри, отримані за допомогою камери відеоспостереження. Попередня обробка кадрів передбачає приведення їх до розширення

(в даному випадку 224x224 пікселі). Для ділянок кадрів, на яких не відбувається виявлення учасників евакуації, необхідно використати процедуру маскування (рисунок 3).

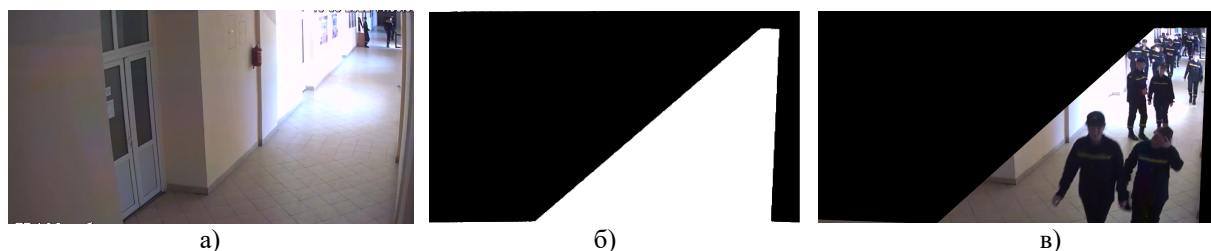


Рисунок 3 – Маскування зображення:
а) кадр камери відеоспостереження; б) маска; в) накладання маски на кадр

Для розпізнавання на кадрах учасників евакуації найбільш доцільно використати згорткову нейромережу, оскільки такі нейронні мережі показали відмінні результати для розпізнавання об'єктів і широко використовуються у системах комп'ютерного зору. Застосування операції згортки дає можливість зменшити кількість інформації, яка зберігається в пам'яті, і завдяки цьому дає змогу отримати хороші результати при роботі із повноколірними кадрами високої роздільної здатності. В процесі роботи, за допомогою згортки виділяють опорні ознаки зображення, такі як ребра, контури або грані. На наступному рівні обробки з цих ребер і граней формуються повторювані фрагменти текстур, які далі можуть скластися в фрагменти зображення. Для розпізнавання об'єктів достатньо використати чергування двох згорткових шарів та двох шарів субдискретизації.

Після завершення навчання для забезпечення класифікації учасників евакуації вихідні дані, отримані згортковими та субдискретизаційними шарами, слід подати на кілька шарів повнозв'язних нейронів. Ми пропонуємо використати 2 приховані шари із функцією активації ReLu (512 і 128 нейронів відповідно), а також вихідний класифікаційний повнозв'язний шар із 4 нейронів з функцією активації Softmax. Також у якості основних параметрів моделі в процесі навчання пропонуємо застосувати градієнтну нормалізацію на кожному шарі, алгоритм оптимізації – метод стохастичного градієнта та функцію втрат Negative Log Likelihood.

Окрім класифікації учасників евакуаційних потоків ще одним важливим завданням є визначення миттєвої швидкості руху. Позначення виявлених учасників доцільно виконувати за допомогою рамки із такими характеристиками:

співвідношення між висотою і шириною рамки r , площа рамки a та координати геометричного центра X_c та Y_c . Для кожного кадру ці характеристики рамок порівнюються із відповідними у попередньому кадрі. Застосування алгоритму SORT (Simple Online and Real-time Tracking) [16] дає змогу виявляти рамки, які існували в попередніх кадрах та визначати їх переміщення, а також виявляти учасників евакуації, що з'явилися у кадрі вперше. Переміщення рамки у проміжку між двома сусідніми кадрами, визначене за допомогою алгоритму SORT, забезпечує можливість

обчислення швидкості руху учасників (у пікселях за одиницю часу).

Після цього необхідно перетворити отримані значення у метри за секунду. При цьому слід врахувати, що у більш віддаленій від камери ділянці евакуаційного шляху відстань, пройдена у пікселях, при перерахунку у метри, буде значно більшою, ніж аналогічна відстань у пікселях на ділянці шляху поблизу камери відеоспостереження. Щоб уникнути похибок під час конвертації евакуаційну ділянку у кадрі поділяють на однакові частини (рисунок 4).

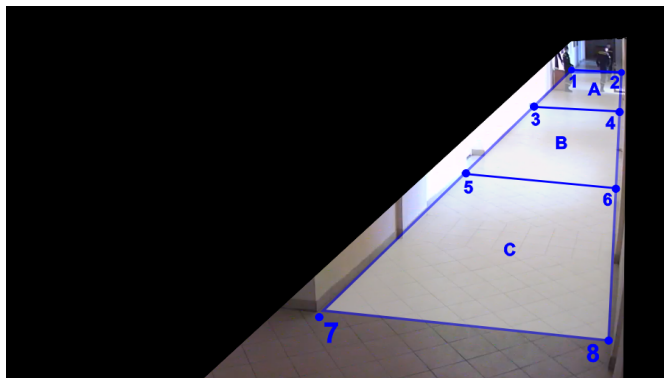


Рисунок 4 – Приклад фрагментації ділянки евакуаційного шляху

На кожному із фрагментів шляху позицію кожного учасника евакуації у реальних координатах можна визначити:

$$X_c = \frac{K_1x + K_2y + K_3}{K_7x + K_8y + 1}, \quad (1)$$

$$Y_c = \frac{K_4x + K_5y + K_6}{K_7x + K_8y + 1}, \quad (2)$$

де: (x, y) – реальні координати учасника евакуації; (X_c, Y_c) – координати центра рамки на кадрі, – коефіцієнти перетворення.

Із рівнянь (1) та (2) для кожної із точок, через які проходять відрізки фрагментації кадру (на рисунку 4 – це точки 1 – 8), можна записати систему із двох рівнянь.

$$K_1x + K_2y + K_3 - K_7xX_c - K_8yY_c - X_c = 0, \quad (3)$$

$$K_4x + K_5y + K_6 - K_7xY_c - K_8yX_c - Y_c = 0, \quad (4)$$

Підставивши відомі нам значення X_c, Y_c та x, y для кожної з точок, можна розв'язати системи рівнянь та знайти значення коефіцієнтів перетворень.

Отримані коефіцієнти дадуть змогу обчислити переміщення у метрах учасника евакуації між двома сусідніми кадрами відеопотоку.

Кожен учасник евакуації, потрапивши в кадр, ідентифікується за певним номером і проводить на евакуаційній ділянці (в зоні видимості камери) певну кількість часу, переміщуючись кадрами від початкового до кінцевого. Позначимо загальну

кількість змінених кадрів параметром N . Одразу після ідентифікації об'єкта відстань його переміщення між двома сусідніми кадрами d можна обчислити:

$$d_{N+1} = \sqrt{(X_{c_{N+1}} - X_{c_N})^2 + (Y_{c_{N+1}} - Y_{c_N})^2} \quad (5)$$

У випадку, коли учасника евакуації виявлено вперше, його початкове переміщення приймається $d_1 = 0$.

Миттєва швидкість учасника евакуації визначається:

$$v_{N+1} = D_{N+1} \vartheta, \quad (6)$$

де: ϑ – частота камери (кадрів за секунду).

Це значення не є зручним для використання, оскільки під час ходьби швидкість руху людини змінюється стрибкоподібно і відрізняється у кожному кадрі. Щоб отримати згладжене значення швидкості, доцільно скористатися фільтром Калмана [17]:

$$V_{N+1} = K \cdot v_{N+1} + (1 - K) \cdot v_N, \quad (7)$$

де: K – передавальний коефіцієнт Калмана.

Для навчання нейромережі найбільш доцільно застосовувати тензорні процесори на хмарній платформі для машинного навчання Google Colaboratory [18]. В якості тренувальної та тестової вибірок для навчання необхідно використати результати замірів, отримані в процесі попередніх досліджень [5], під час

яких бази емпіричних даних формувалися шляхом опрацювання відеозаписів авторами із використанням методів, описаних на початку статті.

Висновок

У статті запропоновано концептуальну модель визначення параметрів руху евакуаційних потоків із застосуванням згорткової нейронної мережі. Запропоновано архітектуру нейромережі, яка включає 2 згорткові шари, 2 шари Max Pooling, 2 приховані повнозв'язні шари з функцією активації ReLU та 1 вихідний шар із 4 нейронів з функцією активації Softmax. Використання в якості тренувальної та тестової вибірок даних, отриманих в процесі виконання попередніх досліджень, дасть можливість створити програмну систему для класифікації учасників евакуації за групами мобільності. Застосування алгоритму SORT у поєднанні із запропонованою моделлю для конверсії швидкості дає змогу отримувати значення миттєвої швидкості руху учасників евакуації, що дозволить суттєво пришвидшити процес формування баз емпіричних даних параметрів евакуації для змішаних потоків та матиме важливе практичне значення для подальших наукових досліджень.

Список літератури:

1. ДСТУ 8828:2019. Пожежна безпека. Загальні положення. [Чинний від 2020-01-01]. Вид. офіц. Київ, 2018. 163 с.
2. Ніжник В., Тесленко О., Цимбалістий С., Кравченко Н. Щодо розрахунку часу евакуації дітей з шкільних і дошкільних закладів у разі пожежі. Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека. Київ, 2016. № 1 (1). С. 81-87.
3. Miyazaka K., Matsukura H., Katuhara M. Behaviour of pedestrian group overtaking wheelchair user. Pedestrian and evacuation dynamics: Proceedings of the 2nd International conference. Greenwich, UK, 20–22 August 2003. P. 267–278.
4. Rubadiri L. Evacuation Modeling of Mixed-Ability Populations in Fire Emergencies: Doctoral Thesis, University of Central Lancashire, Preston, 1994. 205 p.
5. Хлевной О.В. Нормування вимог пожежної безпеки до евакуаційних шляхів і виходів у закладах середньої освіти з інклюзивним навчанням: дис. ... канд. техн. наук: 21.06.02. Львів, 2021. 188 с.
6. Y. Cai, L. Dai, H. Wang et al., “Pedestrian motion trajectory prediction in intelligent driving from far shot first-person perspective video,” IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, pp. 1–16, 2021.
7. Y.-Q. Huang, J.-C. Zheng, S.-D. Sun, C.-F. Yang, and J. Liu, “Optimized YOLOv3 algorithm and

its application in traffic flow detections,” Applied Sciences, vol. 10, Article ID 3079, 2020.

8. Lin, Cheng-Jian & Shiou-Yun, Jeng & Lioa, Hong-Wei. (2021). A Real-Time Vehicle Counting, Speed Estimation, and Classification System Based on Virtual Detection Zone and YOLO. Mathematical Problems in Engineering. 2021. 1-10. 10.1155/2021/1577614.

9. H. Joo et al., Panoptic Studio: A Massively Multiview System for Social Interaction Capture / IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 41, no. 1, pp. 190-204, 1 Jan. 2019, doi: 10.1109/TPAMI.2017.2782743.

10. YoloV5 Wheelchair detector URL: <https://newjerseystyle.github.io/en/2021/YoloV5-Wheelchair-detector/> (дата звернення 10.09.2022).

11. Improved 2D Human Pose Tracking Using Optical Flow Analysis / A. Khelvas, K. Arai, S. Kapoor, R. Bhatia. Cham : Springer International Publishing, 2021. P. 10—22. ISBN 978-3-030-55187-2. DOI: 10.1007/978-3-030-55187-2_2.

12. Використання нейронних мереж при обґрунтуванні регіональних портфелів проектів удосконалення безпеки життєдіяльності / Р.Б. Дунець, Ю.П. Рак, О.Б. Зачко, Т.С. Рак. Сучасні комп'ютерні системи та мережі: розробка та використання: матеріали 4-ої Міжнародної науково-технічної конференції ACSN-2009. Львів: НВФ "Українські технології", 2009. С. 278-280.

13. Open Source Computer Vision Library. URL: <https://github.com/opencv/opencv> (дата звернення 17.09.2022).

14. Abdulla, W., 2020. Mask R-CNN for object detection and instance segmentation on Keras and TensorFlow. URL: https://github.com/matterport/Mask_RCNN (дата звернення 30.09.2022).

15. Khademi, Gholamreza & Simon, Dan. (2019). Convolutional Neural Network for Environmentally Aware Locomotion Mode Recognition of Lower-Limb Amputees.

16. Bewley, A., 2020. Simple online and realtime tracking. URL: <https://github.com/abewley/sort> (дата звернення 10.10.2022)

17. Kalman R. E. A new approach to linear filtering and prediction problems // Journal of basic Engineering. 1960. Vol. 82, № 1. P. 35—45

18. Google Colaboratory. URL: <https://colab.research.google.com/> (дата звернення 10.08.2022)

References:

1. DSTU 8828: 2019. Fire safety. Terms. [Valid from 2020-01-01]. Kind. ofits. Kyiv, 2018. 163 p. (in Ukr.).
2. Nizhnyk V., Teslenko O., Tsymbalisty S., Kravchenko N. Regarding the calculation of the time of evacuation of children from schools and preschools

in case of fire. *Scientific Bulletin: Civil Protection and Fire Safety*. Kyiv, 2016. № 1 (1). Pp. 81-87.

3. Miyazaka K., Matsukura H., Katuhara M. Behaviour of pedestrian group overtaking wheelchair user. *Pedestrian and evacuation dynamics: Proceedings of the 2nd International conference*. Greenwich, UK, 20–22 August 2003. P. 267–278.

4. Rubadiri L. *Evacuation Modeling of Mixed-Ability Populations in Fire Emergencies: Doctoral Thesis*, University of Central Lancashire, Preston, 1994. 205 p.

5. Khlevnoi O. Standardization of fire safety requirements for evacuation routes and exits in secondary education institutions with inclusive education: dis. ... cand. tech. Sciences: 21.06.02 / Lviv, 2021. 188 p.

6. Y. Cai, L. Dai, H. Wang et al., "Pedestrian motion trajectory prediction in intelligent driving from far shot first-person perspective video," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, pp. 1–16, 2021.

7. Y.-Q. Huang, J.-C. Zheng, S.-D. Sun, C.-F. Yang, and J. Liu, "Optimized YOLOv3 algorithm and its application in traffic flow detections," *Applied Sciences*, vol. 10, Article ID 3079, 2020.

8. Lin, Cheng-Jian & Shiou-Yun, Jeng & Lioa, Hong-Wei. (2021). A Real-Time Vehicle Counting, Speed Estimation, and Classification System Based on Virtual Detection Zone and YOLO. *Mathematical Problems in Engineering*. 2021. 1-10. 10.1155/2021/1577614.

9. H. Joo et al., "Panoptic Studio: A Massively Multiview System for Social Interaction Capture," in *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 41, no. 1, pp. 190-204, 1 Jan. 2019, doi: 10.1109/TPAMI.2017.2782743.

10. YoloV5 Wheelchair detector URL: <https://newjerseystyle.github.io/en/2021/YoloV5-Wheelchair-detector/>

11. Improved 2D Human Pose Tracking Using Optical Flow Analysis / A. Khelvas // *Intelligent Systems and Applications / K. Arai, S. Kapoor, R. Bhatia*. Cham : Springer International Publishing, 2021. P. 10—22. —ISBN 978-3-030-55187-2. DOI: 10.1007/978-3-030-55187-2_2.

12. Neural networks in the justification of regional portfolios of life safety improvement projects R.B. Dunets, Yu.P. Rak, O.B. Zachko, T.E. Rak // *Modern computer systems and networks: development and use: materials of the 4th International Scientific and Technical Conference ACSN-2009*. – Lviv: Ukrainian Technologies Fund, 2009. P. 278-280.

13. Open Source Computer Vision Library. Available at: <https://github.com/opencv/opencv>

14. Abdulla, W., 2020. Mask R-CNN for object detection and instance segmentation on Keras and TensorFlow. Available at: https://github.com/matterport/Mask_RCNN.

15. Khademi, Gholamreza & Simon, Dan. (2019). Convolutional Neural Network for Environmentally Aware Locomotion Mode Recognition of Lower-Limb Amputees.

16. Bewley, A., 2020. Simple online and realtime tracking. Available at: <https://github.com/abewley/sort>

17. Kalman R. E. A new approach to linear filtering and prediction problems // *Journal of basic Engineering*. — 1960. — Vol. 82, № 1. — P. 35—45

18. Google Colaboratory. Available at: <https://colab.research.google.com/>

© О. В. Хлевной, Д. А. Райта, Н. Є. Бурак, Ю. О. Борзов, 2022.

Науково-методична стаття.

Надійшла до редакції 16.11.2022.

Прийнято до публікації 12.12.2022.