

УДК 378.09:[004.93'1:681.772.7](477)(045)
DOI <https://doi.org/10.24919/2308-4863/69-2-33>

Олександр ДЕРЕВЯНЧУК,
orcid.org/0000-0002-3749-9998
кандидат фізико-математичних наук,
доцент кафедри професійної та технологічної освіти і загальної фізики
Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича
(Чернівці, Україна) o.v.derevyanchuk@chnu.edu.ua

ПОБУДОВА ПРОТОТИПУ СИСТЕМИ РОЗПІЗНАВАННЯ ЗОБРАЖЕНЬ МАСКИ НА ОБЛИЧЧІ ЛЮДИНИ ДЛЯ ЗАСТОСУВАННЯ У МАЙБУТНІЙ ПРОФЕСІЙНІЙ ДІЯЛЬНОСТІ СТУДЕНТІВ ІНЖЕНЕРНО-ПЕДАГОГІЧНИХ СПЕЦІАЛЬНОСТЕЙ

Завдання розпізнавання зображень маски на обличчі людини є актуальним, оскільки це дозволяє виявляти присутність людей без масок в освітніх закладах, транспортних засобах, торгових центрах та в інших приміщеннях. Проте, існуючі методи розпізнавання зображень маски з використанням штучних нейронних мереж потребують складної і тривалої процедури навчання. Застосування методу Віоли-Джонса дозволяє з високою швидкістю детектувати об'єкти на зображеннях, але з відносно низькою точністю. Завдяки використанню нечіткої логіки можливо підвищити точність системи розпізнавання, але це потребує визначення впливу основних внутрішніх і зовнішніх факторів на функціонування такої системи.

Розроблено концептуальну та логічну моделі прототипу комп'ютерної системи розпізнавання зображень маски, в якій детектування положення облич та їх елементів на зображеннях виконується методом Віоли-Джонса за допомогою каскадів Хаара. Розпізнавання маски на обличчі виконується засобами нечіткої логіки з використанням бази знань Мамдані. За допомогою логічної моделі засобами пакету Mental Modeler досліджено вплив параметрів системи на точність розпізнавання маски.

На основі аналізу логічної моделі системи встановлено, що для забезпечення високої точності розпізнавання обличчя та маски потрібно встановити високі значення роздільної здатності відеокамери, рівня освітлення, кількості каскадів Хаара та кількості значень їх параметрів. З цією ж метою потрібно встановити низькі значення відстані об'єкту до відеокамери та орієнтацію облич в анфас відносно відеокамери.

У роботі сформовано концептуальну та логічну моделі системи розпізнавання зображень маски на обличчі методом Віоли-Джонса з використанням нечіткого логічного виведення. Розроблено нечіткі когнітивні карти, які використано для обґрунтування структури системи розпізнавання зображень маски. Описана у роботі послідовність побудови прототипу системи розпізнавання зображень маски та аналізу параметрів такої системи може бути застосована студентами інженерно-педагогічних спеціальностей для побудови різноманітних комп'ютерних систем обробки зображень та з навчальною метою.

Ключові слова: цифровізація освіти, STEM-освіта, моделювання системи розпізнавання зображень, метод Віоли-Джонса, каскади Хаара, нечітка логіка, нечіткі когнітивні карти, інженерно-педагогічні спеціальності.

Oleksandr DEREVYANCHUK,
orcid.org/0000-0002-3749-9998
Candidate of Physical and Mathematical Sciences,
Associate Professor at the Department Professional
and Technological Education and General Physics
Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University
(Chernivtsi, Ukraine) o.v.derevyanchuk@chnu.edu.ua

BUILDING A PROTOTYPE OF THE MASK IMAGE RECOGNITION SYSTEM ON THE HUMAN FACE FOR USE IN FUTURE PROFESSIONAL ACTIVITIES STUDENTS OF ENGINEERING AND PEDAGOGICAL SPECIALTIES

The task of recognizing images of a mask on a person's face is relevant, since it allows you to detect the presence of people without masks in educational institutions, vehicles, shopping centers and other premises. However, existing methods for recognizing mask images using artificial neural networks require a complex and lengthy training procedure. The use of the Viola-Jones method makes it possible to detect objects in images with high speed, but with relatively low accuracy. Using fuzzy logic, it is possible to improve the accuracy of the recognition system, but this requires determining the influence of the main internal and external factors on the functioning of such a system.

A conceptual and logical model of the prototype of a computer image recognition system has been developed, in which the position of faces and their elements in images is detected by the Viola-Jones method using Haar cascades.

Face mask recognition is performed using fuzzy logic using the Mamdani knowledge base. Using a logical model, the influence of system parameters on the accuracy of mask recognition was investigated using the Mental Modeler package.

Based on the analysis of the logical model of the system, it was found that to ensure high accuracy of face and mask recognition, it is necessary to set high values of the video camera resolution, lighting level, the number of Haar cascades and the number of values of their parameters. For the same purpose, you need to set low values for the distance of the object to the video camera and the orientation of faces in full face relative to the video camera.

The paper forms a conceptual and logical model of the face mask image recognition system using the Viola-Jones method using fuzzy logical inference. Fuzzy cognitive maps were developed, which were used to justify the structure of the mask image recognition system. The sequence of building a prototype of a mask image recognition system and analyzing the parameters of such a system described in the paper can be used by students of engineering and pedagogical specialties to build various computer image processing systems and for educational purposes.

Key words: digitalization of education, STEM education, modeling of the image recognition system, Viola-Jones method, Haar cascade, Fuzzy Logic, Fuzzy Cognitive Map, engineering and pedagogical specialties.

Постановка проблеми. На даний час існує потреба у розробці автоматичних засобів для розпізнавання облич. Вирішення такого завдання дозволить контролювати в умовах карантину присутність людей без масок в різних приміщеннях та у транспорті. Отримання зображень обличчя реалізується за допомогою цифрових відеокамер. Проте використання штучних нейронних мереж для розпізнавання зображень потребує складного і тривалого процесу навчання, а метод Віюлі-Джонса має високу швидкість, але не достатньо точний. Точність системи розпізнавання обличчя можна підвищити шляхом використання нечіткої логіки, але для цього треба провести моделювання впливу всіх основних факторів на роботу системи розпізнавання.

Розпізнавання зображень маски на обличчі людини передбачає виконання таких завдань:

1. Отримання зображення досліджуваного об'єкту (наприклад, обличчя) в потрібному ракурсі з відеокамери або з графічного файлу. У випадку рухомих платформ відеокамера рухається відносно об'єкта. У випадку нерухомих відеокамер можливо масштабувати отримані зображення, а також отримувати зображення одного об'єкта з різних відеокамер.

2. Виявлення (детектування) обличчя на зображенні методом Віюлі-Джонса, який базується на використанні каскадів (детекторів) Хаара.

3. Виявлення на отриманих ділянках обличчя областей, які відповідають очам та роту.

4. Розпізнавання обличчя на зображенні на основі виявлених ділянок обличчя та очей з використанням нечіткого логічного виведення.

5. Розпізнавання зображень маски на розпізнаних обличчях з урахуванням виявлених ділянок рота та з використанням нечіткого логічного виведення.

6. Отримання статистичних характеристик для досліджуваних об'єктів, наприклад, обчислення кількості людей в масках та без масок у певному приміщенні.

Аналіз досліджень. Питанням освіти і науки в Національній економічній стратегії відведено ключові, наскрізні позиції у кількох напрямках економічного розвитку, зокрема у напрямі 8 «Інформаційно-комунікаційні технології» в частині запровадження ІТ-освіти та STEM-освіти, напрямі 18 «Цифрова економіка» в частині запровадження комп'ютеризації об'єктів соціальної інфраструктури та розвитку цифрових навичок громадян, а також у напрямі 20 «Якість життя» в частині підвищення якості життя українців (<https://nes2030.org.ua/#rec246061582>). Використання цифрових технологій для трансформації процесів у системі освіти і науки з метою їх спрощення, автоматизації та зручності для користувачів актуалізовано в Концепції цифрової трансформації до 2030 року. Серед ключових напрямів обрано «Ефективне використання цифрових технологій в освітньому процесі» (<https://mon.gov.ua/ua/news/konceptsiya-cifrovoyi-transformaciyi-osviti-i-nauki-mon-zaproshuye-do-gromadskogo-obgovorennya>). Питання цифровізації професійної освіти та впровадження STEM-проектів розкриті у працях Ковальчука В.І., Сороки В.В., Войтовича І.С. та реалізовані у побудові прототипу системи розпізнавання.

Важливим напрямом цифровізації професійної освіти є проектування та застосування студентами комп'ютерних систем розпізнавання зображень. Для розпізнавання зображень застосовуються штучні нейронні мережі (ШНМ), які є математичною моделлю функціонування нейронних мереж живих організмів. Для розпізнавання зображень особливо ефективними є згорткові нейронні мережі (ЗНМ).

Згорткові ШНМ (convolutional neural network, CNN) призначені для розпізнавання зображення і належать до технологій глибокого навчання (deep learning), які використовують багатошарову обробку сигналів для великої кількості прикладів (Bovik, 2009). ЗНМ – спеціальна архітектура нейромереж, яка запропонована Я. Лекуном

у 1988 році та орієнтована на ефективне розпізнавання зображень. У ЗНМ використовуються деякі особливості зорової кори мозку людини, в якій були відкриті так звані прості клітини, що реагували на прямі лінії під різними кутами, і складні клітини, реакція яких пов'язана з активацією певної множини простих клітин. Назва ЗНМ зумовлена тим, що в них широко використовується операція згортки.

Проте використання нейронних мереж передбачає складну та тривалу процедуру їх навчання. Тому для розпізнавання облич та масок пропонується метод Віоли-Джонса, який застосовує навчені каскади Хаара. Для підвищення якості розпізнавання використовують методи попередньої обробки зображень, зокрема методи фільтрації (Balovsyak, Derevyanchuk, Fodchuk, Kroitor, Odaiska, Pshenychnyi, Kotyra, Abisheva, 2019; Balovsyak, Odaiska, 2018), підвищення контрасту (Balovsyak, Derevyanchuk, Fodchuk, 2019; Balovsyak, Derevyanchuk, Kravchenko, Kroitor, Tomash, 2021) та сегментації зображень (Tereikovskiy, Zhengbing Hu, Chernyshev, Tereikovska, Korystin, Tereikovskiy, 2022; Shkurat O. et al., 2020). Завдяки використанню нечіткої логіки (Fayek, 2020) точність розпізнавання облич та масок можливо підвищити шляхом комплексного врахування надійності детектування не тільки облич, але й ділянок очей та рота.

Мета статті. Побудова та дослідження прототипу системи розпізнавання зображень маски на обличчі людини з метою набуття студентами інженерно-педагогічних спеціальностей професійних компетентностей, пов'язаних із розробкою інтелектуальних комп'ютерних систем.

Виклад основного матеріалу. Розроблено концептуальну та логічну моделі прототипу комп'ютерної системи розпізнавання зображень маски на обличчі. Використано метод Віоли-Джонса з використанням каскадів Хаара для локалізації обличчя людини та його елементів на зображенні. Обчислення впевненості у наявності маски на обличчі проведено засобами нечіткої логіки з використанням бази знань Мамдані. Вплив зовнішніх і внутрішніх параметрів на точність розпізнавання зображень маски досліджено за допомогою логічної моделі засобами пакету Mental Modeler.

У даній роботі сформовано прототип системи розпізнавання зображень маски на обличчі людини та проведено його дослідження. Виконано моделювання впливу основних факторів на роботу системи розпізнавання.

Побудова прототипу системи та його дослідження включає наступні етапи. На першому етапі потрібно провести обґрунтування та вибір прототипу системи розпізнавання зображень маски на обличчі. Апаратно-програмний прототип системи розпізнавання буде містити наступні складові частини:

- 1) платформу для розміщення однієї або декількох відеокамер;
- 2) цифрову відеокамеру (під'єднана до мікрокомп'ютера Raspberry Pi 3B+);
- 3) аудіосистему (мікрофон, динаміки);
- 4) екран для відображення інформації;
- 5) комп'ютерний блок обробки зображень (на базі мікрокомп'ютера Raspberry Pi), призначений для виявлення та розпізнання зображень;
- 6) програмна обробка зображень на мові Python з використанням каскадів Хаара та нечіткої логіки.

На другому етапі розроблено концептуальну модель системи. Дана модель системи показує основні дії, що може виконувати користувач. Концептуальна модель зображена на рисунку 1 у вигляді UML діаграми варіантів використання (Web service for constructing UML diagrams) та містить елементи (прецеденти):

- 1) отримати зображення – зчитати зображення з цифрової відеокамери або графічного файлу (у випадку нерухомої камери змінюється масштаб зображення або отримуються зображення з різних відеокамер);
- 2) детектувати обличчя – визначити положення обличчя на зображенні методом Віоли-Джонса з використанням каскадів Хаара;
- 3) детектувати очі – визначити положення очей у межах відповідних ділянок обличчя на зображенні методом Віоли-Джонса з використанням каскадів Хаара;
- 4) детектувати рот – визначити положення рота в межах відповідних ділянок обличчя на зображенні методом Віоли-Джонса з використанням каскадів Хаара;
- 5) розпізнати обличчя з урахуванням очей – розпізнати обличчя на зображенні з урахуванням детектованих ділянок очей засобами нечіткого логічного виведення;
- 6) розпізнати маску – розпізнати зображення маски на розпізнаній ділянці обличчя з урахуванням детектованих ділянок рота засобами нечіткого логічного виведення;
- 7) отримати статистичні дані – отримати інформацію про кількість людей в масках і без масок у певному приміщенні.

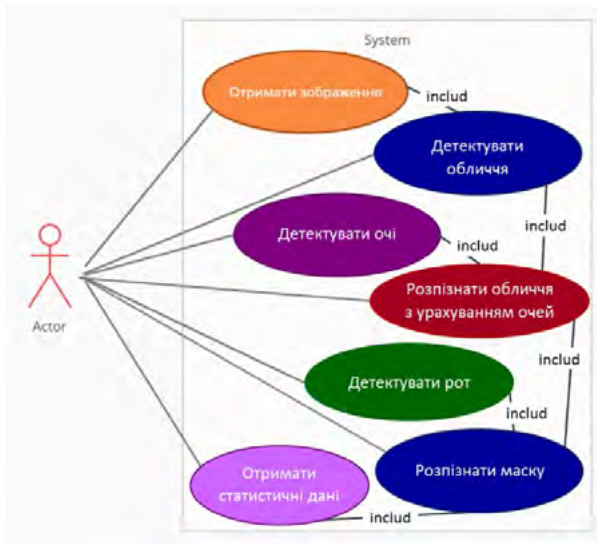


Рис. 1. Концептуальна модель системи розпізнавання зображень маски на обличчі

На третьому етапі розроблено логічну модель системи розпізнавання зображень маски на обличчі. Логічна модель системи розпізнавання побудована за допомогою моделі нечіткої когнітивної карти (НКК) та пакету Mental Modeler (Fuzzy Cognitive Map. Mental Modeler). Нечіткі когнітивні карти (Fuzzy Cognitive Map, FCM) застосовуються для аналізу та прийняття рішень в умовах невизначеності. У даному випадку нечіткі когнітивні карти застосовуються для обґрунтування структури системи, що призначена для розпізнавання зображень маски на обличчі.

Нечітка когнітивна карта будується як знаковий орієнтований граф, у вершинах якого розміщені ключові фактори об'єкта моделювання (концепти), що пов'язані між собою дугами (причинно-наслідковими зв'язками). Такі зв'язки описують ступінь впливу концептів один на одного. У нашому випадку, стан кожного концепту описується однією змінною.

У загальному випадку нечітка когнітивна карта є множиною:

$$\text{НКК} = \{C, F, W\},$$

де C – множина концептів, F – множина зв'язків між концептами, W – множина сили зв'язків.

Для побудови нечіткої когнітивної карти, яка описує систему розпізнавання зображень маски на обличчі, потрібно проаналізувати основні характеристики такої системи, параметри сенсорів (відеокамер), відстань і орієнтацію досліджуваних об'єктів відносно відеокамери, рівень освітлення, параметри каскадів Хаара, виявити вразливості та визначити основні характеристики системи розпізнавання зображень маски

на обличчі. Концепти визначаються як ключові фактори об'єкта моделювання. Значення концептів нормуються у відносних одиницях діапазону від -1 до 1.

Для системи розпізнавання зображень маски на обличчі визначено такі концепти:

1. Accuracy_Face – точність розпізнавання обличчя на зображенні (-1 – розпізнавання обличчя в усіх випадках помилкове, 1 – розпізнавання обличчя в усіх випадках правильне).

2. Accuracy_Mask – точність розпізнавання маски на обличчі (-1 – розпізнавання маски на обличчі в усіх випадках помилкове, 1 – розпізнавання маски на обличчі в усіх випадках правильне).

3. Camera_Distance – відстань від відеокамери до об'єкта (-1 – мінімальна відстань, 1 – максимальна відстань).

4. Camera_Resolution – роздільна здатність відеокамери (-1 – низька роздільна здатність, 1 – висока роздільна здатність).

5. Face_Orientation – орієнтація обличчя відносно напрямку на відеокамеру (-1 – орієнтація в анфас відносно відеокамери, 1 – протилежна орієнтація).

6. Nature_Light – рівень природного освітлення (-1 – низький рівень освітлення, 1 – високий рівень освітлення).

7. Artificial_Light – рівень штучного освітлення (-1 – низький рівень освітлення, 1 – високий рівень освітлення).

8. Cascade_Q – кількість каскадів Хаара (-1 – мала кількість каскадів, 1 – велика кількість каскадів).

9. Cascade_Par – кількість значень параметрів детектування для каскадів Хаара (-1 – мала кількість значень, 1 – велика кількість значень).

У пакеті MentalModeler (ММ) побудовано та параметризовано FCM. Для цього концепти послідовно додавалися в карту (опцією «Add Component») і встановлювалися зв'язки між концептами. Для кожного зв'язку встановлено рівень залежності. Два концепти карти можуть бути пов'язані позитивним зв'язком (наприклад, збільшення/зменшення значення концепту А призводить до збільшення/зменшення значення концепту В), негативним зв'язком (збільшення/зменшення значення концепту А призводить до зменшення/збільшення значення концепту В), також зв'язок може бути відсутнім. Негативна або позитивна оцінка зв'язку задається чисельно в діапазоні [-1, +1]. ММ інтерпретує рівень кожного зв'язку за допомогою значення точкової функції належності 1-го типу, заданої в діапазоні [-1, +1].

Між концептами системи встановлено зв'язки (рис. 2), вибрано ваги зв'язків (рис. 3) і значення концептів.

Використовуючи в ММ інтерфейс роботи з інтелектуальними сценаріями, вибрано один зі сценаріїв моделювання. Моделювання змін в середовищі виконано за допомогою Sigmoid Function. Для запуску сценарію вибрано File > New > Scenario. При виконанні сценарію початкове значення кожного концепту автоматично змінюється з урахуванням значень зв'язків між концептами.

Початкові значення встановлюються в ручному режимі в зоні State Prediction. У вікні відображення результатів моделювання за обраним сценарієм виводяться значення рівня оцінки концептів, обраних для моделювання їх стану (графічно і в чисельному вигляді [-1, +1]). Аналіз результатів

моделювання дозволяє виявити найбільш впливові концепти для системи, що проектується.

Виконано моделювання впливу факторів на точність розпізнавання обличчя «Accuracy_Face» та на точність розпізнавання зображень маски на обличчі «Accuracy_Mask». Спочатку значення всіх факторів впливу встановлені як близькі до середніх, тому прогнозована точність розпізнавання низька. При подальшому моделюванні послідовно збільшувалося значення одного з факторів впливу (Camera_Resolution, Nature_Light, Artificial_Light, Cascade_Q, Cascade_Par) або зменшувалося значення одного з факторів впливу (Camera_Distance, Face_Orientation), при цьому спостерігалось збільшення точності розпізнавання (рис. 4).

Таким чином, для забезпечення високої точності розпізнавання обличчя та маски потрібно встановити високі значення параметрів

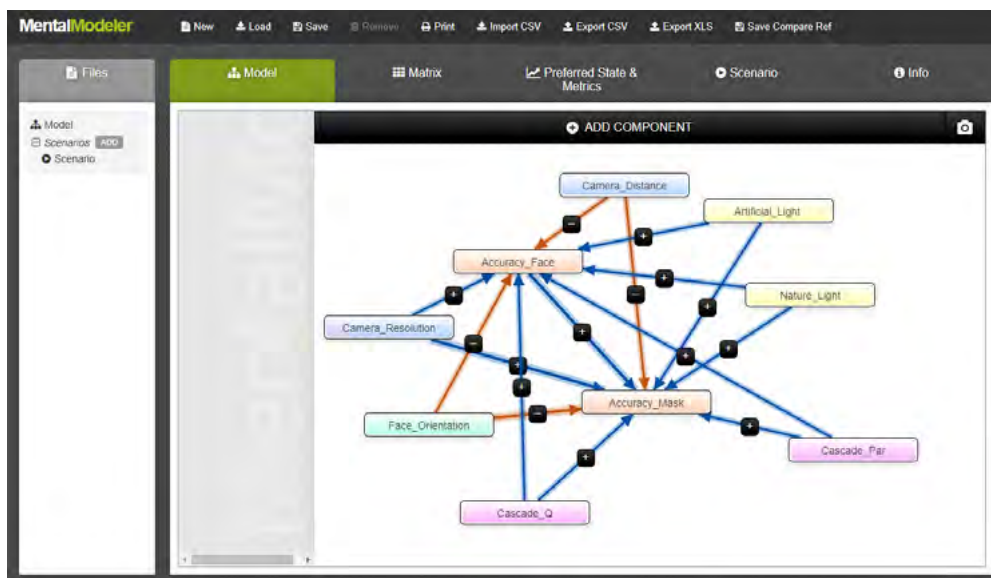


Рис. 2. FCM системи розпізнавання зображень маски на обличчі у вигляді графу

	Accuracy_Face	Accuracy_Mask	Camera_Distance	Camera_Resolution	Face_Orientation	Nature_Light	Artificial_Light	Cascade_Q	Cascade_Par
Accuracy_Face		0.9							
Accuracy_Mask									
Camera_Distance	-0.8	-0.8							
Camera_Resolution	0.8	0.9							
Face_Orientation	-0.8	-0.9							
Nature_Light	0.5	0.5							
Artificial_Light	0.8	0.7							
Cascade_Q	0.7	0.7							
Cascade_Par	0.8	0.8							

Рис. 3. Ваги зв'язків FCM системи розпізнавання зображень маски

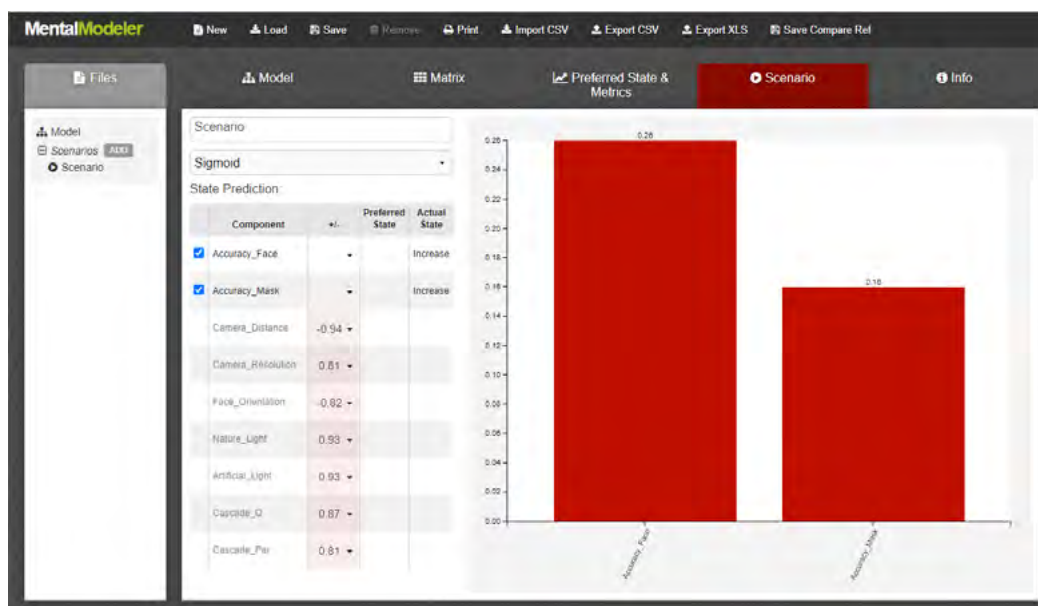


Рис. 4. Моделювання впливу факторів на точність розпізнавання обличчя «Accuracy_Face» та на точність розпізнавання зображень маски на обличчі «Accuracy_Mask», встановлено результуючі значення всіх факторів

(Camera_Resolution, Nature_Light, Artificial_Light, Cascade_Q, Cascade_Par) і низькі значення параметрів (Camera_Distance, Face_Orientation). Всі вищенаведені умови технічно виконати можливо. За умови високого рівня штучного освітлення рівень природного освітлення суттєво не впливає на точність розпізнавання.

Висновок. Розроблено концептуальну та логічну моделі системи розпізнавання зображень маски на обличчі методом Віюлі-Джонса з використанням нечіткого логічного виведення. Сформовано нечіткі когнітивні карти, які використано для обґрунтування структури системи розпізнавання зображень маски. За допомогою логічної моделі засобами пакету Mental Modeler досліджено

вплив параметрів системи на точність розпізнавання маски на обличчі.

У подальшому планується виконати апаратно-програмну реалізацію комп'ютерної системи для розпізнавання зображень маски на обличчі методом Віюлі-Джонса з використанням нечіткого логічного виведення. Для апаратної реалізації системи планується використати мікрокомп'ютер Raspberry Pi, а для програмної реалізації – мову Python. Побудова та дослідження прототипу системи розпізнавання зображень маски на обличчі забезпечить студентам інженерно-педагогічних спеціальностей набуття професійних компетентностей, пов'язаних із розробкою інтелектуальних комп'ютерних систем.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Національна економічна стратегія 2030. URL: <https://nes2030.org.ua/#rec246061582> (дата звернення 17.10.2023).
2. Концепція цифрової трансформації освіти і науки на період до 2026 року. URL: <https://mon.gov.ua/ua/news/konceptsiya-cifrovoyi-transformaciyi-osviti-i-nauki-mon-zaprosnyue-do-gromadskogo-obgovorennya> (дата звернення 17.10.2023).
3. Voitovych, I., Pavlova, N., Voitovych, O., Horbatiuk, R., Dubych (Muzychuk), K., Kovalchuk, V, and Prylepa, I. Training of teachers STEM disciplines to work with students in distance education. *Inequality, Informational Warfare, Fakes and Self-Regulation in Education and Upbringing of Youth, Youth Voice Journal*. 2023. Vol. I, P. 103–112. URL: <https://www.rj4allpublications.com/product/training-of-teachers-stem-disciplines/> (дата звернення 17.10.2023).
4. Kovalchuk, V., Shevchenko, L., Iermak, T., Chekaniuk, K. Computer modeling as a means of implementing project-based activities in STEM-education. *Open Journal of Social Sciences*. 2021. Vol. 9, № 10. P. 173–183. DOI: 10.4236/jss.2021.910013.
5. Kovalchuk, V., Maslich S., Tkachenko, N., Shevchuk, S., Shchypyska, T. Vocational Education in the Context of Modern Problems and Challenges. *Journal of Curriculum and Teaching*. 2022. Vol. 11, № 8. DOI: 10.5430/jct.v11n8p329.
6. Bovik A.L. The Essential Guide to Image Processing. Elsevier Inc. 2009. P. 853. URL: https://www.academia.edu/29298880/Alan_C_Bovik_The_Essential_Guide_to_Image_Proce_BookFi_org (дата звернення 17.10.2023).
7. Balovsyak S. V., Derevyanchuk O. V., Fodchuk I. M., Kroitor O. P., Odaiska Kh. S., Pshenychnyi O. O., Kotyra A., Abisheva A. Adaptive oriented filtration of digital images in the spatial domain. *Proc. SPIE 11176, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments*. 2019. Vol. 11176. P. 111761A-1–111761A-6. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2537165>.

8. Balovsyak S.V., Odaiska Kh. S. Automatic Determination of the Gaussian Noise Level on Digital Images by High-Pass Filtering for Regions of Interest. *Cybernetics and Systems Analysis*. Vol. 54, № 4, P. 662–670. 2018. DOI: 10.1007/s10559-018-0067-3.
9. Balovsyak S. V., Derevyanchuk O. V., Fodchuk I. M. Method of calculation of averaged digital image profiles by envelopes as the conic sections. *Advances in Intelligent Systems and Computing (AISC)*. 2019. Vol. 754. P. 204–212. DOI: 10.1007/978-3-319-91008-6_21.
10. Balovsyak, S.V., Derevyanchuk, O.V., Kravchenko, H.O., Kroitor, O.P., Tomash, V.V. Computer system for increasing the local contrast of railway transport images. *Proc. SPIE, Fifteenth International Conference on Correlation Optics*. 2021. Vol. 12126. P. 121261E1–7. DOI: 10.1117/12.2615761.
11. Terekovskiy, I., Zhengbing Hu, Chernyshev, D., Terekovska, L., Korystin, O., Terekovskiy, O. The Method of Semantic Image Segmentation Using Neural Networks. *International Journal of Image, Graphics and Signal Processing (IJIGSP)*. 2022. Vol. 14, № 6, P. 1–14. DOI: 10.5815/ijigsp.2022.06.01.
12. Shkurat O. et al. Image Segmentation Method Based on Statistical Parameters of Homogeneous Data Set. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2020. Vol. 902. P. 271–281. DOI: 10.1007/978-3-030-12082-5_25.
13. Fayek, A. R. Fuzzy Logic and Fuzzy Hybrid Techniques for Construction Engineering and Management. *Journal of Construction Engineering and Management*. 2020. Vol. 146, № 7. P. 1–12. DOI: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001854.
14. Web service for constructing UML diagrams. URL: <https://app.creately.com/> (дата звернення 16.09.2023)
15. Fuzzy Cognitive Map. Mental Modeler. URL: <https://www.mentalmodeler.com> (дата звернення 18.10.2023).

REFERENCES

1. Natsionalna ekonomichna stratehiia 2030. [National Economic Strategy 2030]. URL: <https://nes2030.org.ua/#rec246061582> (Last accessed: 17.10.2023). [In Ukrainian].
2. Kontsepsiia tsyfrovoyi transformatsii osvity i nauky na period do 2026 roku. [The concept of digital transformation of education and science for the period up to 2026]. URL: <https://mon.gov.ua/ua/news/koncepciya-cifrovoyi-transformaciyi-osvity-i-nauki-mon-zaproschuye-do-gromadskogo-obgovorennya> (Last accessed: 17.10.2023). [In Ukrainian].
3. Voitovych, I., Pavlova, N., Voitovych, O., Horbatiuk, R., Dubych (Muzychuk), K., Kovalchuk, V, and Prylepa, I. Training of teachers STEM disciplines to work with students in distance education. *Inequality, Informational Warfare, Fakes and Self-Regulation in Education and Upbringing of Youth, Youth Voice Journal*. 2023. Vol. I, P. 103–112. URL: <https://www.rj4allpublications.com/product/training-of-teachers-stem-disciplines/> (Last accessed: 17.10.2023).
4. Kovalchuk, V., Shevchenko, L., Iermak, T., Chekaniuk, K. Computer modeling as a means of implementing project-based activities in STEM-education. *Open Journal of Social Sciences*. 2021. Vol. 9, № 10. P. 173–183. DOI: 10.4236/jss.2021.910013.
5. Kovalchuk, V., Maslich S., Tkachenko, N., Shevchuk, S., Shchypyska, T. Vocational Education in the Context of Modern Problems and Challenges. *Journal of Curriculum and Teaching*. 2022. Vol. 11, № 8. DOI: 10.5430/jct.v11n8p329.
6. Bovik A.L. The Essential Guide to Image Processing. Elsevier Inc. 2009. P. 853. URL: https://www.academia.edu/29298880/Alan_C_Bovik_The_Essential_Guide_to_Image_Proce_BookFi_org (Last accessed: 17.10.2023).
7. Balovsyak S. V., Derevyanchuk O. V., Fodchuk I. M., Kroitor O. P., Odaiska Kh. S., Pshenychnyi O. O., Kotyra A., Abisheva A. Adaptive oriented filtration of digital images in the spatial domain. *Proc. SPIE 11176, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments*. 2019. Vol. 11176. P. 111761A-1–111761A-6. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2537165>.
8. Balovsyak S.V., Odaiska Kh. S. Automatic Determination of the Gaussian Noise Level on Digital Images by High-Pass Filtering for Regions of Interest. *Cybernetics and Systems Analysis*. Vol. 54, № 4, P. 662–670. 2018. DOI: 10.1007/s10559-018-0067-3.
9. Balovsyak S. V., Derevyanchuk O. V., Fodchuk I. M. Method of calculation of averaged digital image profiles by envelopes as the conic sections. *Advances in Intelligent Systems and Computing (AISC)*. 2019. Vol. 754. P. 204–212. DOI: 10.1007/978-3-319-91008-6_21.
10. Balovsyak, S.V., Derevyanchuk, O.V., Kravchenko, H.O., Kroitor, O.P., Tomash, V.V. Computer system for increasing the local contrast of railway transport images. *Proc. SPIE, Fifteenth International Conference on Correlation Optics*. 2021. Vol. 12126. P. 121261E1–7. DOI: 10.1117/12.2615761.
11. Terekovskiy, I., Zhengbing Hu, Chernyshev, D., Terekovska, L., Korystin, O., Terekovskiy, O. The Method of Semantic Image Segmentation Using Neural Networks. *International Journal of Image, Graphics and Signal Processing (IJIGSP)*. 2022. V. 14, № 6, P. 1–14. DOI: 10.5815/ijigsp.2022.06.01.
12. Shkurat O. et al. Image Segmentation Method Based on Statistical Parameters of Homogeneous Data Set. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2020. Vol. 902. P. 271–281. DOI: 10.1007/978-3-030-12082-5_25.
13. Fayek, A. R. Fuzzy Logic and Fuzzy Hybrid Techniques for Construction Engineering and Management. *Journal of Construction Engineering and Management*. 2020. Vol. 146, № 7. P. 1–12. DOI: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001854.
14. Web service for constructing UML diagrams. URL: <https://app.creately.com/> (Last accessed: 16.09.2023).
15. Fuzzy Cognitive Map. Mental Modeler. URL: <https://www.mentalmodeler.com> (Last accessed: 18.10.2023).