

МЕТОДИ РОЗПІЗНАВАННЯ ОБЛИЧ

УДК 004.93

ГОЛУБ'ЯК І.В.

Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника

КОСАРЕВИЧ Р.Я.

Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

В багатьох інтелектуальних системах, у яких використовується ідентифікація осіб, застосовуються алгоритми розпізнавання обличчя за фотознімком. Завданням є Завдання ідентифікації обличчя та ідентифікація будь-яких об'єктів у цілому складається з двох частин: навчання та розпізнавання. Навчання здійснюється шляхом показу окремих об'єктів із зазначенням їх належності до того чи іншого класу. Обличчя особи може бути тільки одним, але його зображення, як правило, може бути із незначними спотвореннями. Саме при розпізнаванні обличчя автоматизованою системою і постають такі проблеми як вплив факторів навколишнього оточення (зміна освітлення, зміна позиції), а також через певні чинники організму (емоції, старіння). У результаті навчання розпізнавальна система повинна набути здатність реагувати однаково на всі об'єкти одного образу. Основним завданням біометричної системи розпізнавання обличчя є виділення інформативних ознак з отриманого образу для реєстрації, а в подальшому порівнянні оброблених ознак з вхідним інформативними ознаками, які вже використовуються для отримання певного доступу. Для цього протягом останніх десятиріч розвинулись численні підходи.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Зараз відома велика кількість уже реалізованих методів для роботи систем розпізнавання з за зображенням обличчя людини, звичайно в кожного є свої недоліки та переваги, які проявляються при певних факторах і немає одного найкращого. На даному етапі

більшість систем розпізнавання обличчя застосовують при роботі все ті ж методи для обробки даних, в процесі досліджень науковцями пропоную нові підходи для покращення роботи систем то удосконалення роботи алгоритму, які дозволяють виключити певні недоліки у їхній роботі. Кожен із запропонованих науковцями методів коректно працює на певному обладнанні та при певній побудові самої системи.

ФОРМУЛЮВАННЯ МЕТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Враховуючи велику кількість недоліків підходів що стосуються як найпростішого зміни рівня освітлення, кута повороту обличчя чи звичайного спотворення вхідного зображення, що є показником якості системи в напрямку пропустити свого, велике значення має показник не пропустити чужого як у випадку збою системи так і у випадку обману системи за допомогою можливих шахрайських методів. Аналіз існуючих підходів та методів дасть можливість зосередитись на оптимальному, з можливістю покращення та часткової зміни алгоритму роботи для покращення якості роботи системи як на роботу пропустити свого так і на не пропустити чужого.

ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ ДОСЛІДЖЕННЯ

Геометричний метод розпізнавання обличчя є одним із перших серед використовуваних методів розпізнавання обличчя [1, с.117]. В методах цього виду розпізнавання полягає у виділенні набору ключових точок (або областей) особи і наступному формуванні

набору ознак. Серед ключових точок можуть бути куточки очей, губ, кінчик носа, центр ока тощо. Даний метод задає високі вимоги до зйомки зображень і потребує надійного алгоритму знаходження ключових точок для загального випадку. У загальному випадку цей метод не є найоптимальнішим, однак для деяких специфічних завдань все ж перспективний [2]. До переваг методу можна віднести використання недорогого обладнання; при відповідному обладнанні є можливість розпізнавання зображень отриманих на значних відстанях. Серед недоліків слід відмітити наступні: низька статистична достовірність, високі вимоги до освітлення, обов'язкове фронтальне зображення особи, з невеликими відхиленнями. Більшість

алгоритмів не враховують можливі зміни міміки обличчя, тобто вираз обличчя має бути нейтральним.

Метод гнучкого порівняння на графах, суть якого зводиться до порівнянню графів, що описують зображення обличчя особи. Кожному зображенню обличчя ставиться у відповідність граф зі зваженими вершинами і ребрами. На етапі розпізнавання один з графів – еталонний – залишається незмінним, в той час як інший деформується з метою найкращої підгонки до еталонного. У подібних системах розпізнавання графи можуть являти собою як прямокутну решітку, так і структуру, утворену характерними (антропометричними) точками особи (Рисунок 1).

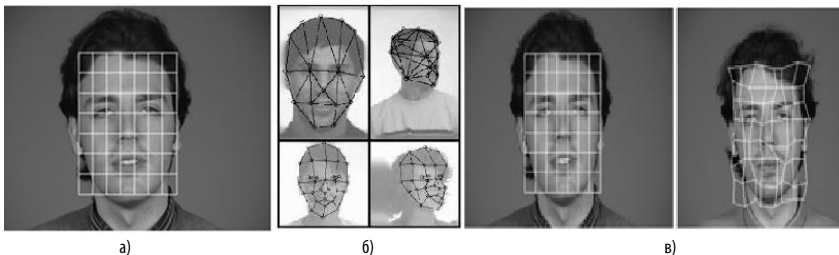


Рисунок 1 – Приклад структури графа для розпізнавання осіб: а) регулярна решітка б) граф на основі антропометричних точок обличчя в) деформації графа у вигляді регулярної решітки.

У роботі [3] показано застосування даного методу для створення системи розпізнавання людських облич. Слід відзначити напрацювання наведені у роботі [4], де пропонується новий підхід для підвищення ефективності методу, застосовуючи дискримінантне відношення Фішера до квадратичної задачі оптимізації за умови набору нерівностей шляхом об'єднання статистичного розпізнавання образів і опорних векторів. Експериментальні результати показують, що ефективність морфологічного узгодження еластичного графа значно покращується за допомогою запропонованого алгоритму зважування. Розширення традиційного підходу до методу пропонують автори статті [5], а саме використання методу для узагальненого розпізнавання облич, який дозволить обробляти більш викривлені чи деформовані образи даючи задовільні результати. У вершинах графа обчислюються значення ознак, найчастіше використовують комплексні значення фільтрів Габора

або їх впорядкованих наборів, які обчислюються в деякій локальній області вершини графа шляхом згортки значень яскравості пікселів з фільтрами [6]. Ребра графа зважуються відстанями між суміжними вершинами. Різниця між двома графами обчислюється за допомогою деякої функції деформації, що враховує як відмінність між значеннями ознак, обчисленими в вершинах, так і ступінь деформації ребер графа. Значення функції деформації при такому положенні деформованого графа і буде мірою відмінності між вхідним зображенням обличчя і еталонним графом. Результат розпізнавання системи – еталон з найкращим значенням цінкової функції деформації. В окремих публікаціях вказується 95–97% ефективність розпізнавання навіть при наявності різних емоційних виразів і зміні ракурсу при формуванні зображення особи до 15 градусів. Проте для порівняння вхідного зображення особи з 87 еталонними витрачається приблизно

25 секунд при роботі на паралельній ЕОМ [7]. Іншим недоліком такого підходу крім високої обчислювальної складності процедури розпізнавання є низька технологічність при запам'ятовуванні нових еталонів, що загалом призводить до нелінійної залежності часу роботи від розміру бази даних осіб. Основною перевагою є низька чутливість до рівня освітленості обличчя та до зміни кута обличчя, але сам по собі цей підхід має нижчі показники за достовірністю розпізнавання [8], ніж методи, побудовані із використанням нейромереж.



Рисунок 2 – Адаптивна розмітка обличчя

Застосування активних моделей зовнішнього вигляду до задачі розпізнавання обличчя, що означає новий підхід до інтерпретації зображень запропоновано у [9]. Також їх застосовують для розпізнавання артикуляції на обличчі [10]. Активні моделі зовнішнього вигляду – це статистичні моделі зображень, які шляхом різного роду деформацій можуть бути підганяні під реальне зображення. В моделях цього виду описуються два типи параметрів: параметри, пов'язані з формою (параметри форми), і параметри, пов'язані зі статистичною моделлю зображення або текстурою (параметри зовнішнього вигляду). Перед використанням модель повинна бути навчена на безлічі заздалегідь розмічених зображень. Кожна мітка має свій номер і

визначає характерну точку, яку повинна буде знаходити модель під час адаптації до нового зображення [11]. Приклад подібної розмітки показаний на Рисунок 2.

Метод головних компонент (МГК) зводить процес розпізнавання чи класифікації до побудови для вхідного зображення певної кількості головних компонент зображень [12, с. 88]. В залежності від їх числа збільшується або зменшується чутливість методу до шумів на зображенні та дрібних відмінностям в обличчях об'єктів [13, с.143]. Виділення ознак за допомогою вейвлет-перетворення вхідних зображень дозволяє значно зменшити кількість вхідної інформації, що важливо для роботи в режимі реального часу [14]. У роботі [15] пропонується підхід для покращення оперативності розпізнавання обличчя у відеопотоках завдяки застосуванню методу головних компонент. Автори роботи [16] пропонують застосування методу головних компонент не до цілого зображення, а роздільно до певних частин обличчя що суттєво покращує роботу системи при таких факторах як погане освітлення та зміна виразу обличчя. Перевагами МГК є те, що на відміну від інших методів він вимагає відносно невелику кількість характеристик. Також при наявності в наборі зображень обличчя варіацій, таких як раса, стать, емоції, освітлення, будуть з'являтися компоненти, величина яких в основному визначається цими факторами. Тому за значеннями відповідних головних компонент можна визначити, наприклад, расу або стать людини [17]. Як негативну сторону МГК слід назвати високі вимоги до умов зйомки зображень. Зображення повинні бути отримані в близьких умовах освітлення, однаковому ракурсі (вирішуються додаванням в навчальну вибірку зображень в різних ракурсах) і повинна бути проведена якісна попередня обробка, що приводить зображення до стандартних умов [18].

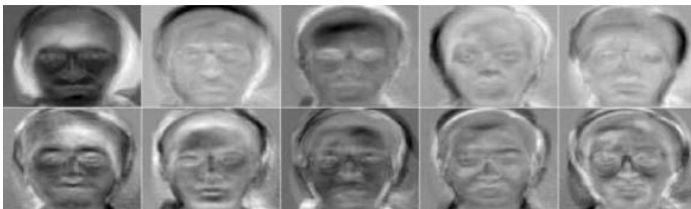


Рисунок 3 – Приклад перших десяти власних векторів (власних осіб), отриманих на навчальному наборі осіб

МГК добре зарекомендував себе в практичних додатках. Однак, у тих випадках, коли на зображенні обличчя присутні значні зміни в освітленості або виразі обличчя, ефективність методу значно зменшується. Вся справа в тому, що підпростір вибирається з такою метою, щоб максимально апроксимувати вхідний набір даних, а не виконати дискримінацію між класами осіб. Було запропоновано вирішення цієї проблеми з вико-

ристанням лінійного дискримінанту Фішера [19] (ЛДФ), за якого лінійний підпростір ознак вибирається так щоб максимізувати відношення міжматрицями міжкласового і внутрішньо класового розкиду. За результатами експериментів в умовах сильного бокового і нижнього затінення зображень обличчя застосування ЛДФ показало 95% ефективність у порівнянні з 53% МГК [19].

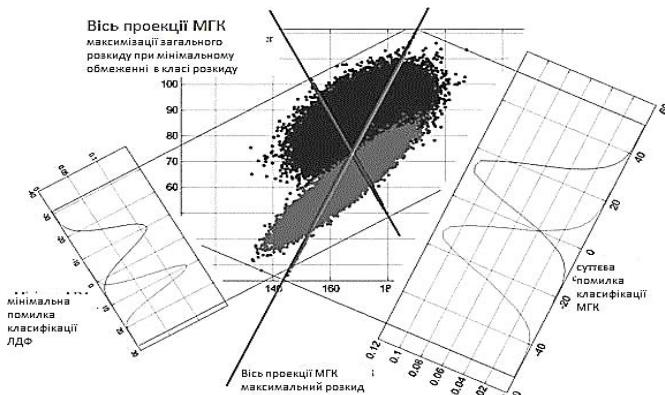


Рисунок 4 – Формування проєкцій за допомогою МГК і ЛДФ

Лінійний дискримінантний аналіз [19, 20] використовує таку проєкцію простору зображень на простір ознак, яка групує якнайближче зображення з тим самим обличчям й одночасно віддаляє один від одного зображення з різними обличчями. В базі даних для роботи алгоритму зберігається множина фотографій людей при різних умовах освітлення для кожної особи. Завдяки цьому, метод стійкий до змін освітленості. Недоліком підходу є відсутність інваріантності до афінних перетворень зображень. У роботах [21, 22] наведено шляхи подолання основних недоліків методу та запропоновані удосконалення, які дозволяють підняти до 99% ймовірність коректного розпізнавання обличчя.

Метод розпізнавання обличчя, тепер відомий як метод Віюлі-Джонса, запропоновано в [23] та дозволяє виявляти об'єкти на зображеннях в реальному часі. В якості ознак для алгоритму розпізнавання авторами були запропоновані ознаки, на основі вейвлетів Хаара [24]. Основною перевагою способу є те, що процес виявлення складається в основному з додавань і порого-

вих порівнянь. Виявлення є швидким, навіть в системах з обмеженими ресурсами, такі як мобільні пристрої. З іншого боку, точність детектора особи сильно залежить від використовуваної бази даних для навчання. Метод складається з 2-х підалгоритмів: алгоритм навчання і алгоритм розпізнавання. Метод має такі переваги – можливе виявлення більше однієї особи на зображенні, використання простих класифікаторів, показує високу швидкість, що дозволяє використовувати цей метод для аналізу відеопотоку. До недоліків слід віднести складність навчання, оскільки у ході навчання алгоритмом необхідно проаналізувати велику кількість тестових зображень. З метою подолання цього недоліку у роботі [25] пропонується використання інтегрального зображення. Завдяки цьому, успішно реалізований детектор особи в режимі реального часу на вбудованій системі. Метод добре працює при спостереженні об'єкта під невеликим кутом, приблизно до 30°. Точність розпізнавання з використанням даного методу частко-

во досягає понад 90%, що є хорошим результатом. Однак при куті відхилення понад 30° ймовірність розпізнавання різко падає. Враховуючи дану особливість унеможливується детектування особи під довільним кутом [26,27]. Слід відмітити велику кількість реалізації даного методу, в тому числі у складі бібліотеки комп'ютерного зору OpenCV. У роботі [28] пропонується застосування даного алгоритму на новій технології GPU, яка може стати найшвидшою в обробці.

Використання нейронних мереж. Одні з найкращих результатів в області розпізнавання осіб досягається за допомогою використання згорткових нейронних мереж (ЗНМ), які є логічним розвитком таких архітектур як когнітрон і неокогнітрон. Успіх обумовлений можливістю обліку двовимірної топології зображення, на відміну від багатощарового перцептрона. Відмінними рисами ЗНМ є локальні рецепторні поля, які забезпечують локальну двовимірну зв'язність нейронів, загальні ваги, що дозволяють детектування окремих рис в будь-якому місці зображення та ієрархічна організація з просторовими семплінгом. Завдяки цим нововведенням ЗНМ забезпечує часткову стійкість до змін масштабу, зсувам, поворотам, зміни ракурсу та іншим спотворень [29-32]. Тестування ЗНМ на базі даних ORL [33], що містить зображення осіб з невеликими змінами освітлення, масштабу, просторових поворотів, положення і різними емоціями, показало 96% точність розпізнавання. Свій розвиток ЗНМ отримали у розробці DeepFace [30], яка використовується для розпізнавання користувачів соцмереж. Слід відмітити, що особливості архітектури даної нейронної мережі носять закритий характер. До недоліків методів, які побудовані на основі нейронних мереж можна віднести додавання нового еталонного особи в базу даних, що вимагає повного перенавчання мережі на всьому наявному наборі, а це досить тривала процедура, яка залежно від розміру вибірки вимагає годин роботи а то і декількох днів. Також їм властиві проблеми математичного характеру, пов'язані з навчанням: попадання в локальний екстремум, вибір оптимального кроку оптимізації, перенавчання, тощо. Важко формалізується етап вибору архітектури мережі (кількість нейронів, шарів, характер зв'язків).

Локальні бінарні шаблони (ЛБШ) вперше були запропоновані в 1996 році для аналізу текстури піттових

зображень. Дослідження показали, що ЛБШ інваріантні до невеликих змін в умовах освітлення і невеликим поворотам зображення [34,35]. Вони є описом околу пікселя зображення в двійковому представленні. Оператор ЛБШ використовує вісім пікселів околу, приймаючи значення інтенсивності центрального пікселя в якості порогу. Пікселі зі значенням інтенсивності більшим чи рівним значенню інтенсивності центрального пікселя приймають значення рівні «1», інші приймають значення рівні «0». Таким чином, результатом застосування базового оператора ЛБШ до пікселя зображення є восьмирозрядний бінарний код, який описує окіл цього пікселя [35]. Точність розпізнавання для бази [33] становить 95%. Методи на основі ЛБШ добре працюють при використанні зображень обличчя із різною мімікою, різним освітленням, поворотами голови. Серед недоліків – необхідність якісної попередньої обробки зображень через високу чутливість до шуму, оскільки за його присутності зростає кількість помилкових бінарних кодів. У роботі [36] пропонується ефективний метод використання ЛБШ, де зображення розділяється на кілька областей, з яких вибирається певна особливість і ЛБШ об'єднуються в розширений вектор ознак, який використовується в якості дескриптора особи.

ВИСНОВКИ

Один із поширених підходів до побудови біометричних систем ідентифікації особи полягає у розпізнаванні зображень обличчя. В роботі розглянуті основні напрямки побудови таких методів розпізнавання. Проведено аналіз їх переваг та недоліків, вказано на обмеження при реалізації для систем ідентифікації. На основі проведеного аналізу можна стверджувати про відсутність абсолютної переваги окремого напрямку. Більш чіткий вибір методу має бути продуктований умовами застосування, тобто властивостями біометричної системи, яка застосовується для отримання того чи іншого виду доступу. Крім того відомі недоліки методів проявляються при неумисному спотворенні зображень, тому також доцільно проаналізувати розглянуті методи на стійкість до зумисних спотворень з метою достовірної класифікації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ:

1. Venetsanopoulos A. Face recognition using kernel direct discriminant analysis algorithms // IEEE Transactions On Neural Networks. – 2003. – Vol.14. – №1. – P.117–126.
2. Vydelenie i raspoznavanie lic [Elektronnij resurs] – Rezhim dostupu do resursu: http://wiki.technicalvision.ru/index.php?title=%C2%FB%E4%E5%EB%E5%ED%E8%E5_%E8_%F0%E0%F1%EF%EE%E7%ED%E0%E2%E0%ED%E8%E5_%EB%E8%F6&action=edit.
3. Wiskott L., Fellous J.-M., Krüger N. Face recognition by elastic bunch graph matching // Intelligent biometric techniques in fingerprint and face recognition – USA. Inc. Boca Raton, FL: CRC Press, 1999. – P. 357–396.
4. Tefas A., Kotropoulos C., Pitas I. Using support vector machines to enhance the performance of elastic graph matching for frontal face authentication / A. Tefas, // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2001. – Vol. 23. -Issue: 7. – P. 735 – 746
5. Shina H., Kima S-D, Choib H.-C. Generalized elastic graph matching for face recognition // Pattern Recognition Letters. – 2007. – Vol. 28. -Issue 9. – P. 1077–1082.
6. Lawrence S., Giles C. L., Tsoira A. C. Face Recognition: A Convolutional Neural Network Approach// IEEE Transactions on Neural Networks, Special Issue on Neural Networks and Pattern Recognition. – 1997. – Vol. 8. – №1. – P.98–113.
7. Lades M., Vorbruggen J., Buhmann J. Distortion invariant object recognition in the dynamic link architecture [Electronic resource] // IEEE Transactions on computers. – 1993. – Vol. 42. – №. 3. – Available at : <http://www.vision.caltech.edu/CNS179/papers/Lades93.pdf>
8. Viola P. Robust realtime face detection // International Journal of Computer Vision. – 2004. – V. 57. – № 2. – P. 137–154.
9. Cootes T. F., Edwards G. J., Taylor C. J. Active appearance models// Computer Vision — ECCV'98. – 2006. Volume 1407 of the series Lecture Notes in Computer Science. – P. 484-498.
10. Davidov M. V., Nikol'skij, Ju. V., Tihans'kij, S. M. Algoritm viznachennja formi gub pid chas artikuljacij dlja ukraïns'koi zhestovoi movi // Visnik Nacional'nogo universitetu "Lvivs'ka politehnika". – 2010. – № 673 : Informacijni sistemi ta merezi. – S. 267-273.
11. Cootes T. F., Edwards G. J., Taylor C. J. Active appearance models. // IEEE Trans. on Pattern Recognition and Machine Intelligence. – 2001. – №23 (6) – P. 681–685.
12. Lisenko A. M. Zastosuvannja biometricznih sistem dlja identifikacii osobi // Visnik Kiïvs'kogo nac. un.-tu im. T.Shevchenka. Juridichni nauki. – 2004. – №60/62. – S. 87-91.
13. Neřian V., HayesIII M. H. Face Detection and Recognition Using Hidden Markov Models // Proc. of IEEE International Conference on Image Processing. – 1998. – vol. 1. – P.141-145.
14. Krak Ju.V.; Kruchinin K.S. Poperednja veivlet-obrobka i vikoristannja metodu golovnih komponent dlja virishennja zadachi identifikacii osobi za fotografichnim zobrazhennjam // Shtuchnij intelekt. — 2010. — № 1. — S. 76-85.
15. Zarishnjak V. M. Vidilennja oblichchja ljudini iz videopotoku na osnovi metodu golovnih komponent [Elektronnij resurs] // Materiali XLV Naukovo-tehnicnoi konferencii VNTU, Vinnicja, 23-24 bereznja 2016 r. - Elektron. tekst. dani. - 2016. - Rezhim dostupu : <http://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fitki/all-fitki-2016/paper/view/1246>.
16. Gottumukkal R., Asari V.K. An improved face recognition technique based on modular PCA approach // Pattern Recognition Letters. – 2004. – Vol. 25.- Issue 4.- P. 429–436.
17. Abate F., Nappi M., Riccio D. 2D and 3D face recognition: A survey [Electronic resource] // Pattern Recognition Letters. -2007. -Vol.28. – P. 1885–1906. – Available at : <https://pdfs.semanticscholar.org/2f5d/44dc3e1b5955942133ff872ebd31716ec604.pdf>
18. Zhou M., Liu X., Geng G. 3D Face Recognition Based on Geometrical Measurement // Advances in Biometric Person Authentication. – 2005. – P. 244-249
19. Belhumeur P., Hespanha J.P, Kriegman D.J.Eigenfaces vs. Fisherfaces: Recognition Using Class Specific Linear Projection // IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence. -1997. –VOL. 19. – №7. – P. 711-720.
20. Viola P. Rapid object detection using a boosted cascade of simple features // IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition. – 2001. – V. 1. – Kauai, Hawaii, USA. – P. 511–518.
21. Pedrycz W., Kwak K.-C. Face recognition using a fuzzy fisherface classifier //Pattern Recognition. -2005. – Vol. 38. – Issue 10. – P. 1717–1732.
22. Belhumeur P.N.; Hespanha J.P.; Kriegman D.J. Eigenfaces vs. Fisherfaces: recognition using class specific linear projection// IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. -1997.-Vol. 19.- Issue 7. – P.711-720.
23. Metod Violy-Dzhonsa (Viola-Jones) kak osnova dlja raspoznavanija lic [Elektronnij resurs] / Rezhim dostupa:<https://habrahabr.ru/post/133826/>
24. Haar A. Z. Theorie der orthogonalen Funktionensysteme. Mathematische Annalen / Published in: C. Heil and D.F. Walnut (eds.)// Fundamental Papers in Wavelet Theory. – Princeton University Press, Princeton 2006. – P. 155-188.
25. Viola P., Jones M. Rapid object detection using a boosted cascade of simple features [Electronic resource] .- 2001. – Available at : <http://www.hpl.hp.com/techreports/Compaq-DEC/CRL-2001-1.pdf>
26. Viola P. Rapid object detection using a boosted cascade of simple features // IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition. – 2001. – V. 1. – Kauai, Hawaii, USA. – P. 511–518.
27. Viola P. Robust realtime face detection // International Journal of Computer Vision. – 2004. – V. 57. – № 2. – P. 137–154.

28. Hefenbrock D.; Oberg J.; Thanh N. T. N. and oth. Accelerating Viola-Jones Face Detection to FPGA-Level Using GPUs // Field-Programmable Custom Computing Machines (FCCM), 2010 18th IEEE Annual International Symposium. – 2010. – Available at : <http://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5474075/>
29. Lawrence S., Giles C.L., Tsoira C. Face Recognition: A Convolutional Neural Network Approach // IEEE Transactions on Neural Networks, Special Issue on Neural Networks and Pattern Recognition. – 1997. – Vol. 8. – №1. – P.98–113.
30. Taigman Y., Yang M., Ranzato M. DeepFace: Closing the Gap to Human-Level Performance in Face Verification [Electronic resource] / [Yaniv Taigman, Ming Yang, Marc Aurelio Ranzato та ін]. – Available at : https://www.cs.toronto.edu/~ranzato/publications/taigman_cvpr14.pdf
31. Meng Joo Er ; Chen W.; Wu Shiqian High-speed face recognition based on discrete cosine transform and RBF neural networks // IEEE Transactions on Neural Networks. – 2005. –Vol. 16. – Issue: 3. – P. 679 – 691.
32. Rowley H.A.; Baluja S.; Kanade T. Rotation invariant neural network-based face detection // Computer Vision and Pattern Recognition, 1998. Proceedings. 1998 IEEE Computer Society Conference. – 1998. – Available at : <http://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/698585/> <http://www.cl.cam.ac.uk/research/dtg/attarchive/facedatabase.html>
33. Mäenpää T. The local binary pattern approach to texture analysis – extensions and applications — Finland ,Oulu University Press, 2003. – 80 p.
34. Ahonen T.; Hadid A.; Pietikainen M. Face Description with Local Binary Patterns: Application to Face Recognition//IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. –2006. – Vol. 28. – Issue 12.- P. 2037 – 2041.
35. Lifshic Ju. Metody raspoznavanija lic // [Elektronnij resurs]. / Rezhim dostupu: <http://yury.name/modern/08modernnote.pdf>

Рецензент: д.т.н., проф. Коваленко В.Ф.,
Херсонський національний технічний університет