

АНОТАЦІЯ

Пуріш С.В. Методи машинного навчання для розпізнавання людини за ходою. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 122 – Комп'ютерні науки. – Національний університет "Одеська політехніка", МОН України, Одеса, 2023.

У **вступі** показана актуальність задачі розпізнавання людини за ходою в системах біометричної ідентифікації (СБІ). Показана недосконалість існуючих рішень по розпізнаванню ходи за умов впливу різних факторів середовища або обставин розпізнавання. Визначено об'єкт, предмет, задачі та методи дослідження; наведено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів; висвітлено особистий внесок здобувача.

В **першому розділі** дисертаційної роботи проведено аналіз проблеми розпізнавання людини за ходою в системах біометричної ідентифікації.

Проаналізовано основне призначення та принципи побудови систем біометричної ідентифікації. Наведена узагальнена модель СБІ та розглянуто питання вибору біометричних ідентифікаторів для побудови СБІ.

Окремо було розглянуто використання ходи людини у якості біометричного ідентифікатору. Визначено, що використання ходи для розпізнавання людини дозволяє спростити структуру СБІ за рахунок можливості використання простого та дешевого апаратного забезпечення (звичайні відеокамери) та здійснювати збір біометричної інформації у пасивному режимі. Відзначено, що ходу людини важко підробити або спотворити.

Проаналізовані наукові джерела, які описують методи розпізнавання людини за ходою. Визначено, що методи розпізнавання людини за ходою можна розділити на методи, засновані на моделях та методи, засновані на візуальних ознаках. Методи, засновані на моделях, мають меншу ефективність завдяки тому, що точність отриманих моделей залежить від якості зображення. Методи, засновані на візуальних ознаках, використовують статичну та динамічну інформацію для

розпізнавання ходи та отримують кращі результати. Виходячи з цього, прийнято рішення досліджувати методи, засновані на візуальних ознаках.

Аналіз методів, заснованих на візуальних ознаках, показав, що для отримання локальної інформації про форму ходи частіше всього використовується дескриптор на базі гістограми орієнтованих градієнтів (Histogram of Oriented Gradients, HoG). Одним з недоліків цього дескриптору є утворення вектору ознак великого розміру, що збільшує простір пошуку, ускладнює розпізнавання ходи, а також приводить до зменшення прогностичної здатності моделі.

Для подолання цього недоліку запропоновано метод, що поєднує дескриптор HoG та дескриптор текстур Хараліка для виділення найбільш характерних низьковимірних векторів ознак, здатних однозначно ідентифікувати людей.

Подальший аналіз методів розпізнавання людини за ходою показав, що їх застосування в реальному житті все ще обмежене, в основному через різний вигляд людей або фактори СБІ та середовища (так обставини називають коваріантами розпізнавання). Аналіз коваріантів ходи показав, що найбільш впливовими коваріантами є носіння людьми різного одягу, фронтальне положення камери та різна швидкість ходи людини.

Для подолання або зменшення впливу цих коваріантів ходи запропоновані методи, які базуються на аналізі енергії ходи (Gait Energy Image, GEI), що представляє собою усереднення за один цикл ходи бінарних силуетних масок людини, що рухається.

Для розробки та дослідження запропонованих методів необхідно скористатися відповідними наборами даних, які містять відео з ходою різних людей за різних умов. Виходячи з необхідності розпізнавання ходи людини за умов різних коваріантів ходи, на основі проведеного аналізу популярних наборів даних, визначені набори відеопослідовностей, які забезпечують необхідні коваріанти ходи для рішення поставлених завдань.

За результатами проведеного аналізу сформульовано мету та завдання досліджень.

В другому розділі дисертаційної роботи запропоновано метод розпізнавання людини за ходою на базі гістограми орієнтованих градієнтів та текстурних ознак Хараліка. Запропонований метод містить наступну послідовність кроків.

Крок 1. Отримання зображення енергії ходи людини (GEI). Відео перетворюється на серію зображень, які перетворюються на бінарне зображення з силуетом. GEI створюється шляхом поєднання цих силуетів ходи протягом циклу ходи.

Крок 2. Зображення енергії ходи людини перетворюється на зображення величини градієнта ходи (Gait Gradient Magnitude Image, GGMI). GGMI – це результат застосування фільтра Гауса, а потім детектора країв Собеля до GEI. У той час як гаусова фільтрація видаляє деталі та шум з GEI, пара ядер 3×3 оператора Собеля виділяє області з високою просторовою частотою, які відповідають краям. Таким чином, застосування гаусового фільтра, а потім детектора країв Собеля на GEI значно зменшує кількість інформації, яку потрібно обробити, і, відповідно, видаляє інформацію, яка вважається менш значущою. При цьому зберігаються ключові структурні властивості GEI.

Крок 3. Витягнення ознак ходи з GGMI особи. Ознаки ходи виділяються шляхом застосування глобального дескриптора HoG та дескриптора текстури Хараліка до всіх 9 комірок GGMI. Числове значення текстурної ознаки комірки множиться на ознаки HoG тієї ж комірки. Ознаки з усіх дев'яти комірок GGMI послідовно конкатенуються, щоб отримати вектор ознак низької розмірності.

Крок 4. Попередня обробка отриманих ознак за допомогою методу аналізу головних компонент (Principal Component Analysis, PCA). Це відбувається шляхом зменшення розмірностей, які негативно впливають на надійність класифікації, що, в свою чергу, призводить до покращення продуктивності.

Крок 5. Класифікація особи за допомогою бази векторів, яка зберігається в СБІ.

Для дослідження запропонованого методу були проведені експерименти на п'яти еталонних наборах даних ходи. На наборі даних CASIA A, запропонований метод показав середню точність розпізнавання 97.77%, що перевищує показники

методів-аналогів. На наборі даних CASIA B, метод показав найкращі показники точності майже для всіх кутів огляду камери (перевага над найближчим аналогом склала від 3.8% до 6.4% в залежності від куту огляду). Для набору даних CMU MoVo, запропонований метод показав 82.00% точності розпізнавання людини за ходою, що перевищує показник найближчого методу-аналогу на 5%.

Сформульовано **перший пункт наукової новизни**: удосконалено метод розпізнавання людини за ходою на базі гістограми орієнтованих градієнтів та текстурних ознак Хараліка, що дозволило зменшити часові та обчислювальні витрати на розпізнавання ходи за рахунок зменшення розмірності вектору ознак ходи.

В **третьому розділі** дисертаційної роботи запропоновані методи розпізнавання людини за ходою за умов наявності різних коваріантів ходи.

Для розпізнавання людини за ходою **за умов носіння різного одягу** був запропонований метод розпізнавання людини за ходою на базі локального дескриптору LR2P. Запропонований метод використовує зображення енергії ходи та експлуатує локальні відмінні риси регіонів у GEI, що дозволяє покращити ефективність розпізнавання ходи.

Запропонований метод складається з наступних кроків.

Крок 1. Як і в попередньому методі, на першому кроці відбувається отримання зображення енергії ходи людини (GEI). Відео перетворюється на серію зображень, які перетворюються на бінарне зображення з силуетом. GEI створюється шляхом поєднання цих силуетів ходи протягом циклу ходи.

Крок 2. На цьому етапі обираються два регіони інтересу (Region of Interest, ROI), які вважаються менш схильними до впливу варіацій одягу. Далі, з цих двох регіонів витягуються ознаки ходи. За результатами аналізу наукової літератури, були обрані регіони інтересу, які зображені на рисунку 1.

Крок 3. Для вилучення ознак з регіонів інтересу, був використаний дескриптор LR2P (Local Rotation Robust Pattern), який також представлений в даній роботі.

Крок 4. На базі вилучених ознак, для кожного регіону формується гістограма та вектор горизонтальної ширини значень пікселів дескриптора LR2P.

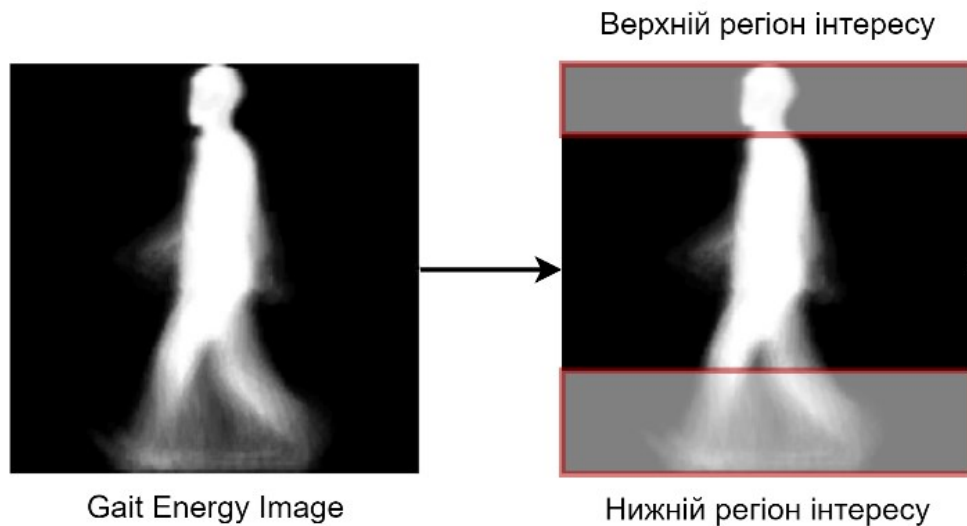


Рисунок 1 – Зображення регіонів інтересу

Крок 5. Отриманий вектор горизонтальної ширини та гістограма для кожного регіону конкатенуються для формування вектору ознак ходи людини.

Крок 6. До вектору ознак застосовуються методи зменшення розмірності.

Крок 7. Класифікація особи за допомогою бази векторів, яка зберігається в СБІ.

Показник точності на наборі даних OU-ISIR В склав 86.22%, що перевищує точність найближчого методу-аналогу на 4.30%. Середній показник точності для всіх 32 стилів одягу на наборі даних OU-ISIR В склав 91.78%, що свідчить про те, що запропонований метод може мінімізувати проблему варіацій одягу.

Сформульовано **другий пункт наукової новизни**: удосконалено метод розпізнавання людини за ходою за умов носіння різного одягу на базі локального дескриптору LR2P, що дозволило збільшити ефективність розпізнавання ходи людини за умов носіння різного одягу за рахунок розбиття регіонів інтересу та використання локального патерну, робастного до поворотів.

Для розпізнавання людини за ходою за умов **фронтальної проєкції камери** був запропонований метод розпізнавання, заснований на аналізі контуру зображення енергії ходи, що складається з наступних кроків.

Крок 1. Як і в попередньому методі, на першому кроці відбувається отримання зображення енергії ходи людини (GEI).

Крок 2. З GEI витягуються зображення вершин та контуру. GEI представляє просторові та часові варіації патерну ходи.

Крок 3. Витягнення з контуру та вершин трьох векторів ознак. В рамках даного методу були запропоновані три дескриптори ознак: вектор інформації про регіон, вектор довжини контуру та вектор вершин горизонтальних сегментів.

Крок 4. Попередня обробка отриманих ознак за допомогою методу аналізу головних компонент (Principal Component Analysis, PCA). Це відбувається шляхом зменшення розмірностей, які негативно впливають на надійність класифікації, що, в свою чергу, призводить до покращення продуктивності.

Крок 5. Класифікація особи за допомогою бази векторів, яка зберігається в СБІ.

Експериментальне дослідження на наборі даних CMU MoVo показало, що запропонований метод демонструє покращену на 6.41% точність розпізнавання ніж метод-аналог. Дослідження на наборі даних CASIA B для нульового кута огляду показало, що запропонований метод дозволив отримати показник точності 99.70%, що перевищує точність найближчого методу-аналогу на 5.30%.

Сформульовано **третій пункт наукової новизни**: *вперше* запропоновано метод розпізнавання людини за ходою за умов фронтальної проєкції камери на базі аналізу контуру зображення енергії ходи, що дозволило збільшити ефективність розпізнавання людини за умов фронтальної проєкції камери.

Для розпізнавання людини за ходою за **умов різної швидкості ходи** був запропонований метод розпізнавання, заснований на використанні просторової динаміки GEI та складається з наступних кроків.

Крок 1. Як і в попередньому методі, на першому кроці відбувається отримання зображення енергії ходи людини (GEI). Відео перетворюється на серію зображень, які перетворюються на бінарне зображення з силуетом. GEI створюється шляхом поєднання цих силуетів ходи протягом циклу ходи.

Крок 2. Всі зразки GEI з бази даних та вхідний GEI перетворюються на просторові зображення (ПЗ). Для отримання просторового зображення виділяється контур GEI, що складається з точної просторової інформації. Далі відбувається сортування геометрії контуру на окремі відсортовані контури. В результаті буде отриманий список координат $C(x, y)$. Ці координати використовуються для отримання просторового зображення $SI(x, y)$.

Крок 3. Із отриманого просторового зображення вилучається множина із трьох ознак:

- метрика схожості інтенсивності – ця метрика надає кількісну оцінку схожості між двома областями зображення;

- метрика схожості контурів – мета обчислення даної метрики полягає в тому, щоб знайти міру подібності між контурами вхідного зразка p_s та зразка із бази даних g_s ;

- метрика просторової несхожості – метою використання даної метрики є знаходження міри відмінності між вхідним зразком p_s та зразком із бази g_s .

Крок 4. Створення списку схожості для кожного вхідного зразка, який відображає схожість або несхожість вхідного зразка з кожним зразком з бази даних. Результатом вилучення ознак є три списки для вхідного зразка p_s , які називаються списками вимірювання схожості ($L_{M_{is}}$, $L_{M_{cs}}$ та $L_{M_{sd}}$, що містять метрики для p_s та кожного екземпляру з бази.

Крок 5. Класифікація та прийняття рішення, що визначає належність вхідного зразка до певного екземпляру з бази даних. Остаточний результат отримується з відсортованих списків вимірювань схожості в модулі прийняття рішення. Прийняття рішення відбувається шляхом обчислення коефіцієнта впевненості A_f для кожного з кандидатів. Кандидат з максимальною сумарною величиною A_f є кваліфікованим для остаточного результату.

Дослідження на наборі даних CASIA C показало, що запропонований метод має показник точності, більший в діапазоні від 0.5% до 6.1%, в залежності від

параметрів дослідження. Середня точність на наборі даних OU-ISIR A склала 98.69%, що перевищує показник точності найближчого методу-аналогу на 9.2%.

Сформульовано **четвертий пункт наукової новизни**: *вперше* запропоновано метод розпізнавання людини за ходою за умов різної швидкості ходи, заснований на використанні просторової динаміки GEI, що дозволило підвищити ефективність розпізнавання людини за умов різної швидкості руху людини.

В **четвертому розділі** дисертаційної роботи був розроблений програмний модуль для ідентифікації людини за ходою. Цей модуль може використовуватись окремо, або у складі системи біометричної ідентифікації, де специфіка ходи людини використовується як унікальний біометричний показник. Такий модуль може бути використаний в різних сферах, де необхідна перевірка особи або контроль доступу. Його можна інтегрувати в системи відеоспостереження та використовувати для різних безпекових процедур та ідентифікації.

У процесі розробки модулю була визначена мета, призначення та цільова аудиторія додатку, а також були його визначені основні функції. Були встановлені вхідні та вихідні потоки інформації, а також створена схема потоків даних. Для визначення функціональних вимог були визначені користувачі програми і створена діаграма прецедентів, яка визначила основні функціональні і нефункціональні вимоги до програмного модулю. Був визначений архітектурний підхід до модулю та надано абстрактне уявлення про систему. Для опису розгортання програмного забезпечення була створена діаграма розгортання та надана структура бази даних. Також було визначено використані технології та описано технологічний стек.

Представлена структура програмного проекту, були визначені і описані основні пакети програмного забезпечення. Для забезпечення якості було проведено тестування програмного забезпечення, включаючи функціональне та модульне тестування.

Таким чином, підтверджено спроможність та правильність технічних рішень, заснованих на результатах дисертаційного дослідження

Розроблені в роботі методи та інструментальні засоби отримали впровадження у діяльності товариства з обмеженою відповідальністю «Добродія

Фудз», приватного акціонерного товариства «Ветропак Гостомельский Склозавод» та знайшли відображення у навчальному процесі та науковій діяльності Національного університету «Одеська політехніка».

Ключові слова: інтелектуальні системи, машинне навчання, біометрична ідентифікація, нейронні мережі, комп'ютерний зір, розпізнавання, класифікація, ідентифікація, цифрова обробка зображень, текстура, контур, дескриптори, ефективність розпізнавання, ітеративні алгоритми.

Список публікацій здобувача за темою дисертації.

1. Purish S.V., Lobachev M.V., Gait recognition methods in the task of biometric human identification // Herald of Advanced Information Technology, 2023, Том 6, № 1. С. 13–25. (Index Copernicus)

<https://hait.od.ua/index.php/journal/article/view/154/201>

2. Lobachev M.V., Purish S.V., Machine learning models and methods for human gait recognition // Herald of Advanced Information Technology, 2023, Том 6, № 3. С. 263–277. (Index Copernicus)

<https://hait.od.ua/index.php/journal/article/view/180/218>

3. Purish S.V., Schöler T., Models and methods for gait-based person identification while wearing different outfit // Electrotechnic and Computer Systems, 2023, Том 113, № 38. С. 6 – 16. (Index Copernicus)

<https://eltecs.op.edu.ua/index.php/journal/issue/view/131>

4. Лобачев М.В., Пуріш С.В., Методи ідентифікації людини за ходом за умов різної швидкості ходи // Наука і техніка сьогодні (Серія «Техніка»), 2023, Том 27, № 13. С. 784 – 795. (Index Copernicus)

<http://perspectives.pp.ua/index.php/nts/issue/view/192>

5. Пуріш С.В., Яковенко Р.О., Годовиченко М.А., Задача вибору біометричних ознак в системах біометричної ідентифікації людини // Proceedings of the 13th International Scientific Conference of students and young researchers «Modern Information Technology», MIT 2023, Odesa, Ukraine. May 18-19, 2023. С. 11–13.

<http://dspace.opu.ua/jspui/handle/123456789/14147>

6. Лобачев М.В., Пуріш С.В., Системи біометричної ідентифікації на базі розпізнавання ходи // Proceedings of the 10th International scientific and practical conference “European Scientific Congress”, Madrid, Spain. October 29-31, 2023. С. 212–215.

<https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2023/10/EUROPEAN-SCIENTIFIC-CONGRESS-29-31.10.23.pdf>

7. Лобачев М.В., Пуріш С.В., Моделі та методи машинного навчання для розпізнавання людської ходи // Proceedings of the VII International Scientific and Practical Conference "Problematic questions of science and problems of development", Berlin, Germany. October 30 – November 01, 2023. С. 341–344.

<https://eu-conf.com/wp-content/uploads/2023/10/PROBLEMATIC-QUESTIONS-OF-SCIENCE-AND-PROBLEMS-OF-DEVELOPMENT.pdf>

8. Пуріш С.В., Метод ідентифікації людини за ходою, інваріантний до одягу // Proceedings of the VIII International Scientific and Practical Conference "Modern technologies of human development", Bordeaux, France. November 06-08, 2023. С. 326–329.

<https://eu-conf.com/wp-content/uploads/2023/10/Modern-technologies-of-human-development.pdf>

9. Пуріш С.В., Біометричні ідентифікатори в біометричних системах обмеження доступу // Proceedings of the 3rd International Scientific and Practical Conference "Modern research in science and education", Chicago, USA. November 09-11, 2023. С. 311–315.

<https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2023/11/MODERN-RESEARCH-IN-SCIENCE-AND-EDUCATION-9-11.11.2023.pdf>

10. Purish S.V., Schöler T., Models and methods for recognizing a person by gait while wearing different clothes // Proceedings of the 2nd International Scientific and Practical Conference "Innovative development of science, technology and education", Vancouver, Canada. November 16-18, 2023. С. 128–131.

<https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2023/11/INNOVATIVE-DEVELOPMENT-OF-SCIENCE-TECHNOLOGY-AND-EDUCATION-16-18.11.23.pdf>

11. Пуріш С.В., Методи розпізнавання ходи людини з фронтальної проєкції камери // Proceedings of the X International Scientific and Practical Conference "Trends and prospects for the development of modern education", Munich, Germany. November 20-22, 2023. С. 403–405.

<https://eu-conf.com/wp-content/uploads/2023/10/TRENDS-AND-PROSPECTS-FOR-THE-DEVELOPMENT-OF-MODERN-EDUCATION.pdf>

ABSTRACT

Purish S.V. Machine learning methods for human gait recognition. – Qualification scientific work in the form of manuscript.

Thesis for the PhD degree in specialty 122 Computer science. – Odessa Polytechnic National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Odesa, 2023.

The **introduction** shows the relevance of the problem of human gait recognition in biometric identification systems (BIS). The imperfection of existing solutions for gait recognition under the influence of various environmental factors or recognition circumstances is shown. The object, subject, objectives and methods of the study are defined; the scientific novelty and practical significance of the results are presented; the personal contribution of the applicant is highlighted.

The **first section** of the thesis analyzes the problem of human gait recognition in biometric identification systems.

An analysis is conducted on the primary objectives and fundamental concepts behind the construction of biometric identification systems.

A comprehensive model of Biometric Identification Systems (BIS) is proposed, along with a discussion on the selection of appropriate biometric identifiers for constructing BIS.

The use of human gait as a biometric identifier was examined independently. The use of gait for human identification has been shown to ease the design of a surveillance system interface (SSI) by enabling the use of cost-effective and readily available hardware, such as standard video cameras. Additionally, gait analysis allows for the collection of biometric data in a non-intrusive manner. The human gait is known to be difficult to counterfeit or manipulate.

Analyzed are scientific publications that provide strategies for identifying individuals based on their gait. Human gait recognition techniques may be categorized into model-based approaches and visual feature-based methods. Model-based approaches are less efficient since the accuracy of the derived models relies on the image's quality. Visual feature-based methods use both static and dynamic information to accurately

identify and improve the recognition of gait. Consequently, it was determined to examine techniques that rely on visual characteristics.

The examination of techniques relying on visual characteristics revealed that a descriptor is often used to get specific details about the gait shape. An inherent drawback of this descriptor is the generation of an extensive feature vector, resulting in an augmented search space, intricate gait detection, and a subsequent decline in the model's predictive capacity.

In order to address this limitation, we suggest a technique that integrates the descriptor with the textural qualifiers. This approach allows us to extract highly distinctive low-dimensional feature vectors that possess the ability to accurately distinguish individuals.

Additional examination of gait-based techniques for identifying humans has shown that their practical implementation is currently restricted, mostly owing to the varying physical characteristics of individuals and external elements within the surroundings (referred to as recognition covariates). The examination of gait variables revealed that the most significant factors include individuals donning diverse attire, the anterior placement of the camera, and varying walking velocities.

In order to counteract or diminish the impact of these factors that affect the way a person walks, techniques centered on the examination of gait energy (specifically, Gait Energy Image or GEI) have been suggested. GEI involves creating an average representation of a person's movement by combining binary silhouette masks across one complete walking cycle.

In order to develop and analyze the approaches that have been created, it is imperative to use suitable datasets that consist of movies showcasing various individuals walking in diverse circumstances.

The identification of video sequences that include the required gait covariates for performing the tasks is based on the study of popular datasets and the necessity to detect human gait under various gait covariates.

The study has formed its purpose and goals based on the findings of the analysis.

In the **second section** of the thesis, on the basis of the descriptor and textural qualifiers, a method for identifying individuals by gait is suggested. The proposed method includes the following sequence of steps.

Step 1. Obtaining the human gait energy image (GEI). The video is converted into a series of images that are transformed into a binary image with a silhouette. The GEI is created by combining these gait silhouettes during the gait cycle.

Step 2. The gait energy picture is transformed into a Gait Gradient Magnitude picture (GGMI). The GGMI is obtained by first applying a Gaussian filter and then a Sobel edge detector to the GEI. Gaussian filtering is used to eliminate fine features and noise from the GEI. On the other hand, the Sobel operator employs a pair of 3×3 kernels to identify areas with high spatial frequency, which often indicate the presence of edges. Applying a Gaussian filter and subsequently a Sobel edge detector to the GEI effectively decreases the quantity of information that requires processing and eliminates less relevant information. Simultaneously, the fundamental structural characteristics of the GEI remain intact.

Step 3. Gaining gait characteristics from the individual's GGMI. The process of obtaining gait characteristics involves the application of the global identifier and the textural identifiers to elements. The textural feature of a cell is multiplied by the HoG characteristics of the same cell, resulting in a numerical value. A low-dimensional feature vector is obtained by successively concatenating the features from all nine GGMI cells.

Step 4. Pre-process the obtained features using the Principal Component Analysis (PCA) method. This is done by reducing the dimensions that negatively affect the reliability of the classification, which in turn leads to improved performance.

Step 5. Classification of a person using the vector database stored in the BIS.

To investigate the proposed method, experiments were conducted on five reference gait datasets. On the CASIA A dataset, the proposed method showed an average recognition accuracy of 97.77%, which is higher than the performance of the benchmark methods. On the CASIA B dataset, the method showed the best accuracy for almost all camera viewing angles (the advantage over the closest analog ranged from 3.8% to 6.4% depending on the viewing angle). For the CMU MoBo dataset, the proposed method

showed 82.00% accuracy in human gait recognition, which exceeds the performance of the nearest analog method by 5%.

The **first point of scientific novelty** is formulated: the method of human gait recognition based on the global qualifiers and textural qualifiers has been improved, which has reduced the time and computational costs of gait recognition by reducing the dimensionality of the gait feature vector.

In the **third section** of the thesis, methods for recognizing a person by gait in the presence of different gait covariates are proposed.

To recognize a person by gait when **wearing different clothes**, a method for recognizing a person by gait based on the local descriptor LR2P was proposed. The proposed method uses the gait energy image and exploits the local distinctive features of regions in the GEI, which can improve the gait recognition performance.

The proposed method consists of the following steps.

Step 1. As in the previous method, the first step is to acquire a human gait energy image (GEI). The video is converted into a series of images that are transformed into a binary image with a silhouette. The GEI is created by combining these gait silhouettes during the gait cycle.

Step 2. At this stage, two regions of interest (ROIs) are selected, which are considered to be less affected by clothing variations. Next, gait features are extracted from these two regions. Based on the results of the scientific literature analysis, the regions of interest were selected, as shown in Figure 1.

Step 3. To extract features from the regions of interest, we used the LR2P (Local Rotation Robust Pattern) descriptor, which is also presented in this paper.

Step 4. Based on the extracted features, a histogram and a vector of the horizontal width of the pixel values of the LR2P descriptor are generated for each region.

Step 5. The resulting vector and histogram for each region are summed to form a resulting vector of human gait specifics.

Step 6. Dimensionality reduction methods are applied to the feature vector.

Step 7. Classification of a person using the vector database stored in the BIS.

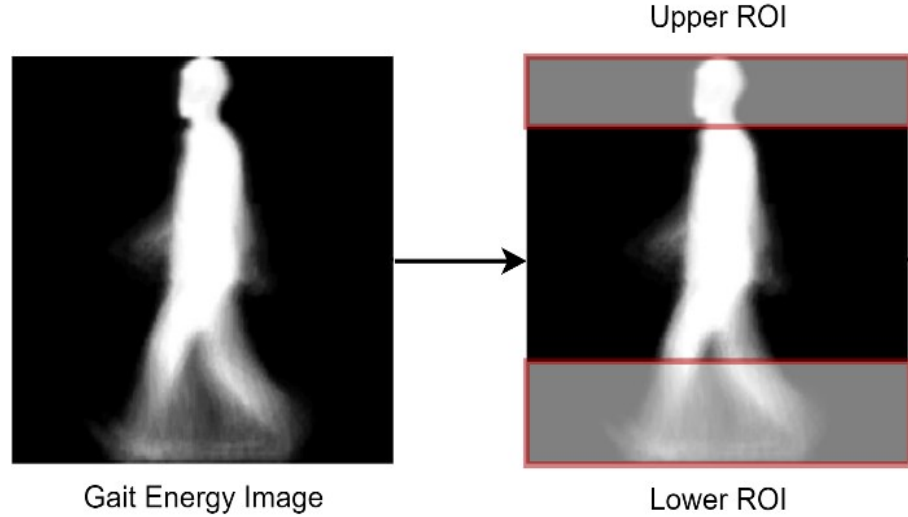


Figure 1 - Images of regions of interest

The accuracy rate on the OU-ISIR B dataset was 86.22%, which exceeds the accuracy of the nearest analog method by 4.30%. The average accuracy rate for all 32 clothing styles on the OU-ISIR B dataset was 91.78%, which indicates that the proposed method can minimize the problem of clothing variations.

The **second point of scientific novelty** was formulated: the method of recognizing a person by gait while wearing different clothes based on the local descriptor LR2P was improved, which made it possible to increase the efficiency of recognizing a person's gait while wearing different clothes by splitting regions of interest and using a local pattern robust to turns.

To recognize a person by gait **in a frontal camera projection**, we proposed a recognition method based on the analysis of the gait energy image contour and consisting of the following steps.

Step 1. As in the previous method, the first step is to obtain a human gait energy image (GEI).

Step 2. Vertex and contour images are extracted from the GEI. GEI represents the spatial and temporal variations of the gait pattern.

Step 3. Extracting three feature vectors from the contour and vertices. Three feature descriptors were proposed as part of this method: a vector of information about the region, a vector of contour length, and a vector of horizontal segment vertices.

Step 4. Pre-processing of the obtained features using the Principal Component Analysis (PCA) method. This is done by reducing the dimensions that negatively affect the reliability of the classification, which in turn leads to improved performance.

Step 5. Classification of a person using the vector database stored in the BIS.

An experimental study on the CMU MoBo dataset showed that the proposed method demonstrates a 6.41% improvement in recognition accuracy over the analog method. The study on the CASIA B dataset for the zero viewing angle showed that the proposed method allowed to obtain an accuracy rate of 99.70%, which exceeds the accuracy of the nearest analog method by 5.30%.

The **third point of scientific novelty** was formulated: for the first time, a method of recognizing a person by gait in a frontal camera projection based on the analysis of the image contour of gait energy was proposed, which increased the efficiency of human recognition in a frontal camera projection.

To recognize a person by gait **at different gait speeds**, we proposed a recognition method based on the use of GEI dynamics and consisting of the following steps.

Step 1. As in the previous method, the first step is to obtain an image of human gait energy (GEI). The video is converted into a series of images that are transformed into a binary image with a silhouette. The GEI is created by combining these gait silhouettes during the gait cycle.

Step 2. All GEI samples from the database and the input GEI are transformed into spatial representation. To obtain a spatial representation, a GEI contour is extracted, consisting of spatial knowledge. Next, the contour geometry is sorted into separate sorted contours. The result is a list of coordinates. These coordinates are used to obtain the spatial representation.

Step 3. A set of three features is extracted from the obtained spatial image:

Intensity similarity metric - this metric quantifies the similarity between two image areas;

Contour similarity metric - the purpose of calculating this metric is to find the degree of similarity between the contours of the input sample p_s and the sample from the database g_s ;

Spatial dissimilarity metric - the purpose of using this metric is to find the degree of difference between the input sample p_s and the sample from the database g_s .

Step 4. Creating a similarity list for each input sample, which reflects the similarity or dissimilarity of the input sample with each sample from the database. The result of feature extraction is three lists for the input sample p_s , called similarity measurement lists ($L_{M_{is}}$, $L_{M_{cs}}$ ta $L_{M_{sd}}$), containing metrics for p_s and each instance from the database.

Step 5. Classification and decision-making that determines whether the input sample belongs to a particular instance from the database. The final result is obtained from the sorted lists of similarity measurements in the decision module. The decision is made by calculating the confidence factor A_f for each candidate. The candidate with the highest total A_f is qualified for the final result.

The analysis of the CASIA C dataset revealed that the suggested approach achieves an accuracy rate varying between 0.5% and 6.1%, contingent upon the specific parameters used in the research. The OU-ISIR A dataset achieved an average accuracy of 98.69%, surpassing the accuracy of the nearest analogous approach by 9.2%.

The **fourth point of scientific novelty** was formulated: for the first time, a method of recognizing a person by gait at different gait speeds based on the use of GEI dynamics was proposed, which made it possible to increase the efficiency of human recognition at different human movement speeds.

In the **fourth section** of the thesis, a software module for identifying a person by gait was developed. This module can be used separately or as part of a biometric identification system, where the specificity of a person's gait is used as a unique biometric indicator. This module can be used in various areas where identity verification or access control is required. It can be integrated into video surveillance systems and used for various security procedures and identification.

In the process of developing the module, the goal, purpose, and target audience of the application were determined, and its main functions were defined. Input and output information flows were established, and a data flow diagram was created. To determine the functional requirements, the users of the application were identified and a precedent

diagram was created, which identified the main functional and non-functional requirements for the program module. The architectural approach to the module was defined and an abstract view of the system was provided. To describe the software deployment, a deployment diagram was created and a database structure was provided. The technologies used were also identified and the technology stack was described.

The structure of the software project was presented, the main software packages were identified and described. To ensure the quality, the software was tested, including functional and unit testing.

Thus, the feasibility and correctness of technical solutions based on the results of the dissertation research was confirmed.

The methods and tools developed in this work have been implemented in the activities of Dobrodiya Foods Limited Liability Company, private joint stock company Vetropack Gostomel Glassworks and are reflected in the educational process and scientific activities of the Odessa Polytechnic National University.

Keywords: intelligent systems, machine learning, biometric identification, neural networks, computer vision, recognition, classification, identification, digital image processing, texture, contour, descriptors, recognition efficiency, iterative algorithms.

List of publications of the applicant on the topic of the dissertation

1. Purish S.V., Lobachev M.V., Gait recognition methods in the task of biometric human identification // Herald of Advanced Information Technology, 2023, Vol. 6, № 1. P. 13–25. (Index Copernicus)

<https://hait.od.ua/index.php/journal/article/view/154/201>

2. Lobachev M.V., Purish S.V., Machine learning models and methods for human gait recognition // Herald of Advanced Information Technology, 2023, Vol. 6, № 3. P. 263–277. (Index Copernicus)

<https://hait.od.ua/index.php/journal/article/view/180/218>

3. Purish S.V., Schöler T., Models and methods for gait-based person identification while wearing different outfit // Electrotechnic and Computer Systems, 2023, Vol. 113, № 38. P. 6 – 16. (Index Copernicus)

<https://eltecs.op.edu.ua/index.php/journal/issue/view/131>

4. Лобачев М.В., Пуріш С.В., Методи ідентифікації людини за ходом за умов різної швидкості ходи // Наука і техніка сьогодні (Серія «Техніка»), 2023, Vol. 27, № 13. P. 784 – 795. (Index Copernicus)

<http://perspectives.pp.ua/index.php/nts/issue/view/192>

5. Пуріш С.В., Яковенко Р.О., Годовиченко М.А., Задача вибору біометричних ознак в системах біометричної ідентифікації людини // Proceedings of the 13th International Scientific Conference of students and young researchers «Modern Information Technology», MIT 2023, Odesa, Ukraine. May 18-19, 2023. P. 11–13.

<http://dspace.opu.ua/jspui/handle/123456789/14147>

6. Лобачев М.В., Пуріш С.В., Системи біометричної ідентифікації на базі розпізнавання ходи // Proceedings of the 10th International scientific and practical conference “European Scientific Congress”, Madrid, Spain. October 29-31, 2023. P. 212–215.

<https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2023/10/EUROPEAN-SCIENTIFIC-CONGRESS-29-31.10.23.pdf>

7. Лобачев М.В., Пуріш С.В., Моделі та методи машинного навчання для розпізнавання людської ходи // Proceedings of the VII International Scientific and Practical Conference "Problematic questions of science and problems of development", Berlin, Germany. October 30 – November 01, 2023. P. 341–344.

<https://eu-conf.com/wp-content/uploads/2023/10/PROBLEMATIC-QUESTIONS-OF-SCIENCE-AND-PROBLEMS-OF-DEVELOPMENT.pdf>

8. Пуріш С.В., Метод ідентифікації людини за ходою, інваріантний до одягу // Proceedings of the VIII International Scientific and Practical Conference "Modern technologies of human development", Bordeaux, France. November 06-08, 2023. P. 326–329.

<https://eu-conf.com/wp-content/uploads/2023/10/Modern-technologies-of-human-development.pdf>

9. Пуріш С.В., Біометричні ідентифікатори в біометричних системах обмеження доступу // Proceedings of the 3rd International Scientific and Practical Conference "Modern research in science and education", Chicago, USA. November 09-11, 2023. P. 311–315.

<https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2023/11/MODERN-RESEARCH-IN-SCIENCE-AND-EDUCATION-9-11.11.2023.pdf>

10. Purish S.V., Schöler T., Models and methods for recognizing a person by gait while wearing different clothes // Proceedings of the 2nd International Scientific and Practical Conference "Innovative development of science, technology and education", Vancouver, Canada. November 16-18, 2023. P. 128–131.

<https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2023/11/INNOVATIVE-DEVELOPMENT-OF-SCIENCE-TECHNOLOGY-AND-EDUCATION-16-18.11.23.pdf>

11. Пуріш С.В., Методи розпізнавання ходи людини з фронтальної проєкції камери // Proceedings of the X International Scientific and Practical Conference "Trends and prospects for the development of modern education", Munich, Germany. November 20-22, 2023. P. 403–405.

<https://eu-conf.com/wp-content/uploads/2023/10/TRENDS-AND-PROSPECTS-FOR-THE-DEVELOPMENT-OF-MODERN-EDUCATION.pdf>