

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ФЕСЕНКО Андрій Олексійович

УДК 004.056.5:57.087.1(043.5)

**МЕТОДИ ОБРОБКИ ДАНИХ ДЛЯ СИСТЕМ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ТА
АУТЕНТИФІКАЦІЇ НА ОСНОВІ БІОМЕТРИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК
ОКА**

05.13.21 – системи захисту інформації

Науковий керівник
Швець Велеріян Анатолійович
кандидат технічних наук, доцент
доцент кафедри засобів
захисту інформації
ННІДС НАУ

Київ – 2017

АНОТАЦІЯ

Фесенко А.О. Методи обробки даних для систем ідентифікації на основі біометричних характеристик ока. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового степеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.21 «системи захисту інформації» – Національний авіаційний університет, Київ 2017.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню важливої науково–технічної задачі розробці методів обробки даних для систем біометричної ідентифікації по біометричним характеристикам ока.

У кожному суспільстві можна виділити сектори, системи або мережі порушення функціонування яких може привести до колапсу на загальнодержавному, регіональному або місцевому рівнях. Комплекс цих секторів, систем або мереж може входити в склад критичної інфраструктури (таких як, атомна енергетика, авіаційна галузь, хімічна промисловість та інші). Розвиток сучасних інформаційних та комунікаційних технологій, які є основою критичної інфраструктури, характеризується постійним підвищенням рівня вимог до їх безпеки.

Система захисту критичної інфраструктури являє собою сукупність організаційних і технічних заходів для забезпечення захисту секторів критичної інфраструктури від різних загроз. Ідентифікація користувачів, яка продовжується подальшою їх аутентифікацією, є основою систем безпеки об'єктів критичної інфраструктури, оскільки ці процедури дозволяють виявити несанкціонованих користувачів інформаційно комунікаційних систем на початкових етапах – встановити автентичність та визначити повноваження суб'єкта при його допуску в систему, контроль встановлених повноважень в процесі сеансу роботи, реєстрацію дій тощо.

З точки зору надійності, найбільш ефективними на сьогодні методами ідентифікації та аутентифікації є біометричні, які дозволяють вирішити проблеми втрати паролів та особистих ідентифікаторів. Серед біометричних технологій (яких

на сьогодні є досить широкий спектр) однією із найперспективніших є біометрія з використанням райдужної оболонки ока (РОО), яка має специфічну структуру і містить багато текстурної інформації. Просторові структури, які спостерігаються в райдужці, унікальні для кожного індивіда, а індивідуальні відмінності з'являються в процесі анатомічного розвитку. Крім того, у порівнянні з іншими біометричними об'єктами, ідентифікація по райдужці є стабільнішою і надійною.

Метою роботи є підвищення ефективності методів обробки даних в системах ідентифікації та аутентифікації користувачів по райдужній оболонці ока. Під ефективністю розуміємо зменшення об'єму оброблюваної інформації в базах даних систем контролю і управління доступом та підвищення швидкодії обробки даних.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі задачі:

- 1) проаналізувати сучасні підходи, методи і системи біометричної ідентифікації та аутентифікації користувачів;
- 2) удосконалити інтегрально–диференціальний метод локалізації зображення райдужної оболонки ока для зниження обчислювальних витрат;
- 3) розробити більш ефективний метод кодування райдужної оболонки ока;
- 4) розробити метод прийняття рішень для біометричних систем ідентифікації та аутентифікації;
- 5) розробити програмні засоби для проведення експериментальних досліджень запропонованих методів.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному:

1. Удосконалено інтегрально–диференціальний метод локалізації зображення райдужної оболонки ока, який за рахунок попередньої НЧ–фільтрації (інтегрування) дозволяє зменшити локальні зміни інтенсивності пікселів, а наступна ВЧ–фільтрація (диференціювання) дозволяє виділити межі райдужної оболонки ока, така послідовність дій дозволяє знизити обчислювальні витрати при збереженні високої точності.

2. Вперше запропоновано метод кодування зображення райдужної оболонки ока, який за рахунок фазових відгуків при обробці модифікованим DoG–фільтром зображення райдужної оболонки ока, дозволяє кодувати один піксель

зображення, одним бітом інформації і як наслідок зменшує об'єм бази даних систем контролю і управління доступом.

3. Отримав подальший розвиток метод прийняття рішень на основі статистичних критеріїв Неймана–Пірсона, який за рахунок використання нормованої відстані Хеммінга в біометричних системах ідентифікації по райдужній оболонці ока, дає змогу не зберігати в базі даних еталонне зображення.

Практичне значення одержаних результатів полягає у наступному:

- Удосконалено інтегрально–диференціальний алгоритм локалізації зображення для зменшення області пошуку райдужної оболонки та зменшення обчислювальних витрат.

- Розроблено алгоритм кодування райдужної оболонки ока, за рахунок використання в системах контролю і управління доступом модифікованого DoG–фільтра для отримання бінарного коду райдужки.

- Розроблені програмні модулі попередньої обробки зображення райдужки, DoG–фільтра, обчислення відстані Хеммінга та порогу, модуль порівняння кодів райдужок і прийняття рішень по статистичному критерію.

- Запропонована система ідентифікації та аутентифікації користувача без еталонного зображення райдужки, за допомогою застосування бінарного коду райдужки (фазові відгуки DoG–фільтра) і нормованої відстані Хеммінга з використанням статистичного критерію Неймана–Пірсона, що дало змогу зменшити об'єм бази даних систем контролю і управління доступом, що в свою чергу зменшує час доступу до неї.

Результати дисертації використовуються у навчальному процесі кафедри засобів захисту інформації Національного авіаційного університету. Розроблені методи доведені до придатних інженерних рішень та були впроваджені в ПАТ «Миронівський хлібопродукт», ТОВ «Акксон Софт»

У процесі виконання дисертації отримані такі вагомі результати:

1. На основі проведеного аналізу сучасних підходів, методів і систем біометричної ідентифікації користувачів обрано один з найбільш надійних методів

ідентифікації та аутентифікації, а саме ідентифікація по райдужній оболонці ока, який по сукупності якостей має вагомі переваги перед іншими, а також має великі перспективи застосування в СКУД.

2. Удосконалено інтегрально–диференціальний метод локалізації зображення райдужної оболонки ока, який за рахунок удосконаленого алгоритму локалізації ока на зображенні, дозволяє зменшити область пошуку меж райдужної оболонки та знизити обчислювальні витрати при збереженні високої точності методу та підвищує швидкодію в 13,5 раз.

3. На основі запропонованого алгоритмічного рішення розроблено метод кодування РОО при застосуванні модифікованого DoG–фільтра, що дало можливість підвищити швидкодію в 20 разів для попередньої обробки зображень РОО завдяки отриманню однозначного бінарного кода, що в свою чергу дало можливість зменшити об'єм БД в 25 разів.

4. Розроблено метод прийняття рішень для систем біометричної ідентифікації і аутентифікації з використанням статистичного критерію Неймана–Пірсона на основі КР без еталонного зображення РОО з використанням нормованої відстані Хеммінга.

5. У роботі запропонована система ідентифікації та аутентифікації користувача без еталонного зображення райдужки (складається з двох програмних модулів), за допомогою застосування бінарного коду райдужки (фазові відгуки DoG–фільтра) і нормованої відстані Хеммінга з використанням статистичного критерію Неймана–Пірсона, що дало змогу зменшити об'єм бази даних систем контролю і управління доступом, що в свою чергу зменшує час доступу до неї.

Розроблені програмні засоби і проведено експериментальне дослідження програмних модулів з ціллю оцінки швидкодії та оцінки об'єму бази даних систем контролю та управління доступом, що підтвердило придатність розроблених методів для використання в системах захисту інформації.

ПУБЛІКАЦІ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Фесенко А.О. Основні біометричні характеристики, сучасні системи та технології біометричної аутентифікації/ А.О.Фесенко, В.А.Швець// Безпека інформації. – 2013. – №2, Том 19. – С. 99 – 111.
2. Фесенко А.А. Современные методы цифровой идентификации личности/ А.А.Фесенко, В.А.Швец // Системи управління, навігації та зв'язку. – 2013. – Вип. 1. – С. 291–296.
3. Фесенко А.О. Кодування та розпізнавання текстурних ознак райдужної оболонки для задач біометрії/А.О.Фесенко// Зв'язок – 2014. – №4. –С.56–62.
4. Фесенко А.А. Метод принятия решений в системе индентификации личности по изображению радужной оболочки глаза/ Зв'язок. – 2015. – №3. – С.23–31.
5. Фесенко А.А. Критерий обнаружения как влияющий фактор объема базы данных, биометрических систем контроля доступа /А.А.Фесенко, В.А.Швец// Захист інформації. – 2016. – №4, Том 18. – С. 308 – 313.
6. Фесенко А.О. Локалізація меж райдужної оболонки ока на основі його зображення/ Ю.Я.Самохвалов, А.О. Фесенко, В.А.Швець// Інформаційна безпека. – 2017.– №1(25)№2(26). – С.120–125.
7. Фесенко А.А. Информативность коэффициентов Фурье в аутентификации по радужной оболочке глаза/ Фесенко А.А., Фесенко В.А., Швець В.А , Швець А.В. // Захист інформації – 2017. – №1, Том 19. – С. 33 – 42.
8. Фесенко А.О. Огляд експериментальної системи ідентифікації особи за зображенням райдужної оболонки ока/ А.О. Фесенко, М.О.Рябий// Актуальні питання забезпечення кібернетичної безпеки та захисту інформації. –2015: І міжнар. наук.–практ. конф., 22–28 лютого 2015 р. : тези доп. – К. : Вид–во Європейського університету,2015. С. 113–117.
9. Фесенко А.О. Метод ідентифікації користувачів на базі райдужної оболонки ока/А.О.Фесенко, В.А.Швець//SITS'2015:XII всеукраїнська наук.–практ. конф. 09–12 червня 2015 р.: тези доп.– К. :Вид–во ТОВ "Ділова інформація",2015. С.81–84.

10. Фесенко А.О. Критерії вибору порогу при ідентифікації за райдужною оболонкою ока/А.О.Фесенко, О.Г.Оксіюк// IT&I:III Міжнародна наук.–практ. конф. 8–10 листопада 2016р.: тези доп.– К.:Вид–во Виданично–поліграфічний центр «Київський університет»,2016. С.284–286

11. Фесенко А.О. Біометричні технології в в системах контролю і управління доступом (СКУД)/ А.О.Фесенко, О.Г.Оксіюк, В.О.Фесенко// Проблеми кібербезпеки інформаційно–телекомунікаційних систем: II наук.–практ. конф. 23–24 березня 2017 року: тези доп.– К.:Вид–во Виданично–поліграфічний центр «Київський університет»,2017. С.360–365

12. Швець В.А. Использование преобразования Фурье в аутентификации по радужной оболочке глаза/ В.А. Швець, В.А.Фесенко, А.А.Фесенко, В.В.Швець// Матеріали XIII Міжнар. наук.–тех. конф. «АВІА–2017». – 19–21 квіт. 2017р.: тези доп. – К. НАУ, 2017. – Т.1. – С. 2.50–2.53.

13. Фесенко А.О. Цифрові фільтри зображень/Фесенко А.О.,Оксіюк О.Г., Фесенко В.О.// ITSEC: матеріали VII Міжнар. наук.–тех. конф. – 16–18 трав. 2017р.: тези доп. – К.: НАУ, 2017. – С. 36.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на науково–технічних конференціях та семінарах, серед яких: Міжнародна науково–практична конференція «Актуальні питання забезпечення кібернетичної безпеки та захисту інформації» (Київ–2015); Всеукраїнська науково–практична конференція «Стан та удосконалення безпеки інформаційно–телекомунікаційних систем (SITS)» (Миколаїв, 2015); Міжнародна науково–практична конференція «Інформаційні технології та взаємодії» (IT&I) (Київ, 2016); науково–практична конференція «Проблеми кібербезпеки інформаційно–телекомунікаційних систем» (Київ, 2017); Міжнародна науково–практична конференція «АВІА» (Київ, 2017); Міжнародна науково–практична конференція «ITSEC» (Київ, 2017).

ABSTRACT

Fesenko A.O. Methods of data processing for identification systems based on eye biometrics. – Manuscript.

Thesis for a Candidate of Technical Science degree in specialty 05.13.21 – information security systems. – National Aviation University, Kyiv, 2017.

Thesis is devoted to applied scientific research task to developing data processing methods for biometric identification systems by eye biometrics.

The analysis of current approaches, methods and different biometric identification systems was carried out and showed that by set of characteristics widespread use of identification by the iris eye has notable advantages over other biometric features and unlimited prospects of application in security systems. However, essential disadvantage of such systems is the algorithmic complexity and high demands for computing resources as well as high cost. In this regard, current research in the area of developing new methods for data processing and iris image recognition, that are resistant to different types of interference, arising during shooting, that would allow to improve system characteristics and reduce demands to hardware, thereby reducing its value are very important.

Existing algorithms for iris localization have several disadvantages, which reduces the performance of biometric systems. For the first time was proposed and developed approach to identify users by improved integral-differential algorithm of localization iris image, that allows at first determine the region of the eyes at human face image and by the following the procedures integration (low-frequency filtering) performed pixel brightness averaging (image blurring), and further differentiation (high-frequency filtering) allows to allocate boundaries of the iris. This approach helps reduce search area of iris boundaries and reduce computational complexity while maintaining high accuracy of the method and significantly increases the speed of finding iris boundaries.

For the first time was proposed and developed the method of encoding iris using modified DoG-filter that allows receiving the iris code where each image pixel corresponds to one bit of information. To obtain *Iris*-code proposed to use the values of modified filter phase feedbacks. Phase submitting images can get rid of the influence of uneven illumination in the identification by the iris of the eye. These feedbacks have permanent jump over 0 of frequency axis that distinguishes them. When frequency

response passes through 0 of frequency axis then harmonic phases receive permanent jump on π . When receiving just one crossing over 0 of frequency axis, frequency response is gradually approaching by its value to 0. Therefore harmonics phases of filtered iris image would have values that are located within 0 to π and π to 2π , which corresponds to 0 or 1 in the iris binary code. This reduces iris code size and as a result reducing size of Access control system database, which have time privilege compared with using Gabor filter.

Developed method for identifying users without iris image sample, such approach to solving the problem became possible by receiving clear iris binary code (DoG-filter response) and using normalized Hamming distance as a criterion of binary codes similarity measure, with further using Neyman-Pearson statistical criterion for decision making. Applying this approach to the decision making made it possible to reduce Access control system database size, which in turn decreases the access time to it. This approach makes it possible to solve two classes of problems – iris code search in the database with the aim to identify and preliminary control access to objects that are under the protection. Experimentally sensitivity of iridescent shells comparison to image rotation (tilting the head when shooting). In this paper, the technique that would reduce this dependence and reduce thus the likelihood of possible errors. On the registration changed simulation input image rotation on certain corners and calculation codes for each of them to save the results in a database. The value of rotation angles can be determined based on sensitivity analysis Hamming distance to rotate the image. In a change to the identification decision is made by the smallest distance from one of the copies of the pattern.

Was developed special software and conducted experimental research of program modules with purpose of performance evaluation and assessment of access control systems database volume, which confirmed the suitability of developed methods for protection and critical infrastructure: secured access to computer system, border control, access control, terrorism counteracting, Internet security and more.

The result of the work done is solving actual scientific problem of development and research methods for biometric data processing systems based on the characteristics of the human eye.

Keywords: biometric identification, iris code, decision making, statistical criteria, normalized Hamming distance.

ЗМІСТ

СПИСОК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	13
ВСТУП	14
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СИСТЕМ БІОМЕТРИЧНОЇ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ТА АУТЕНТИФІКАЦІЇ КОРИСТУВАЧІВ	20
1.1 Порівняння біометричних технологій.....	20
1.2. Око як об'єкт розпізнавання.....	28
1.3 Основні поняття і методи	36
1.4 Висновки до першого розділу.....	42
Список використаних джерел у першому розділі	44
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИ ПОПЕРЕДНЬОЇ ОБРОБКИ І ТЕКСТУРНИХ АНАЛІЗУ ЗОБРАЖЕННЯ РАЙДУЖНОЇ ОБОЛОНКИ ОКА	47
2.1. Принципи ідентифікації особистості по райдужній оболонці ока	47
2.2. Формалізація вимог до зображення райдужної оболонки	49
2.3. Отримання і обробка зображення райдужної оболонки ока	51
2.3.1. Інтегрально-диференціальний алгоритм локалізації райдужної оболонки з послідовним уточненням.....	53
2.3.2. Удосконалення методу локалізації POO.....	55
2.4. Текстурні ознаки райдужної оболонки ока	60
2.5. Формування фазових текстурних ознак райдужки ока на основі фільтрів Габола	62
2.6. Метод формування фазових текстурних ознак райдужної оболонки ока на базі DoG-фільтра	72
2.7 Удосконалення DoG-фільтра	76
2.7. Висновки до другого розділу роботи	79
Список використаних джерел у другому розділі	81
РОЗДІЛ 3. ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ В СИСТЕМІ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ОСОБИСТОСТІ ПО ЗОБРАЖЕННЯ РАЙДУЖНОЇ ОБОЛОНКИ ОКА	84
3.1 Основні критерії для систем ідентифікації та аутентифікації по райдужній оболонці ока.....	84

3.2	Методи отримання коду РОО	91
3.3	Коди райдужок і їх порівняння	92
3.4	Прийняття рішень в системі.....	96
3.4.1	Прийняття рішень при ідентифікації легітимних користувачів.....	97
3.4.2.	Прийняття рішень при аутентифікації користувачів	102
3.5.	Висновки до третього розділу.....	102
	Список використаних джерел в третьому розділі.....	104
РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ		
ІДЕНТИФІКАЦІЇ ОСОБИСТОСТІ ПО ЗОБРАЖЕННЯ РАЙДУЖНОЇ		
ОБОЛОНКИ ОКА		
		107
4.1.	Методика і програмно-апаратне забезпечення проведення експериментального дослідження системи	107
4.2.	Вибір параметрів фільтрів.....	108
4.3	Оцінка інформативності коду райдужки в залежності від параметрів фільтра.....	109
4.4.	Вибір розрядності кода РОО.....	110
4.5.	Результати експериментальних досліджень.....	110
4.6.	Верифікація отриманих результатів.....	114
4.7.	Висновки до розділу	119
	Список використаних джерел у четвертому розділі	121
ВИСНОВКИ.....		
		125
	Додаток А. Лістинги (коди) програмних модулів.....	127
	Додаток Б. Документи, що підтверджують впровадження результатів дисертації	151

СПИСОК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ІКТ – інформаційно комунікаційна технологія

КІ – критична інфраструктура

БД – база даних

СКУД – система контролю та управління доступом

DOG-фільтр – Difference of Gaussian (різниця гаусіанів)

ІЧ-діапазон – інфрачервоний діапазон

РОО – райдужна оболонка ока

КР – код райдужки

НЧ-фільтрація – низькочастотна фільтрація

ВЧ-фільтрація – високочастотна фільтрація

ІБ – інформаційна база

ІС – інформаційна система

АЧХ – амплітудно-частотна характеристика

ВСТУП

Актуальність теми. У кожному суспільстві можна виділити сектори, системи або мережі порушення функціонування яких може привести до колапсу на загальнодержавному, регіональному або місцевому рівні. Комплекс цих секторів, систем або мереж може входити в склад критичної інфраструктури КІ (таких як, атомна енергетика, авіаційна галузь, хімічна промисловість та інші), отже КІ - сукупність об'єктів інфраструктури держави, які є найбільш важливими для економіки та промисловості, функціонування суспільства та безпеки населення і виведення з ладу або руйнування яких може мати вплив на національну безпеку і оборону, природне середовище, призвести до значних фінансових збитків та людських жертв [1]. Розвиток сучасних інформаційно комунікаційних технологій ІКТ, які є основою КІ, характеризується постійним підвищенням рівня вимог до їх безпеки.

Система захисту КІ являє собою сукупність організаційних і технічних заходів для забезпечення захисту секторів КІ від різних загроз (з боку терористів, диверсантів, екстремістів), у разі появи надзвичайних або кризових ситуацій, та і від наслідків ненавмисних дій, які могли б нанести збитки для КІ. Така система захисту повинна успішно протистояти різним загрозам при адекватному рівні охоронних заходів, залежно від значення сектора КІ, потенційних загроз і їх можливих наслідків. Ідентифікація користувачів, яка продовжується подальшою їх аутентифікацією, є основою систем безпеки об'єктів КІ, оскільки ці процедури дозволяють виявити несанкціонованих користувачів ІКТ на початкових етапах – встановити автентичність та визначити повноваження суб'єкта при його допуску в систему, контроль встановлених повноважень в процесі сеансу роботи, реєстрацію дій тощо.

З точки зору надійності, найбільш ефективними на сьогодні методами ідентифікації та аутентифікації є біометричні, які дозволяють вирішити проблеми втрати паролів та особистих ідентифікаторів[2]. Серед біометричних технологій (яких на сьогодні є досить широкий спектр) однією із найперспективніших є біометрія з використанням райдужки людського ока, яка має специфічну структуру

і містить багато текстурної інформації. Просторові структури, які спостерігаються в райдужці, унікальні для кожного індивіда, а індивідуальні відмінності з'являються в процесі анатомічного розвитку. Крім того, у порівнянні з іншими біометричними об'єктами, ідентифікація по райдужці є стабільнішою і надійною [3].

Питаннями розробки й дослідження нових біометричних методів ідентифікації та аутентифікації в різний час займаються такі вчені як В. Вишневський, Я. Дорогий, С. Садиков, А. Саченко, С. Теленик та ін.

У 2000-х роках до вирішення завдань розпізнавання по райдужній оболонці ока підключилося безліч наукових лабораторій, найбільших результатів домоглися: група, очолювана Prof. J. Daugman в Cambridge University, UK; група, очолювана Prof. K. Bowyer в University of Notre Dame, IN, USA; Prof. Hugo Proenca, University of Beira Interior, Portugal; Prof. Adam Czajka, Warsaw University of Technology, Poland.

У середині 2000-х років почали з'являтися програмно-апаратні комплекси розпізнавання по РОО, з них найбільш відомими є системи Panasonic, LG, OKI.

Однак у цій галузі є низка завдань: створення сучасних засобів сканування, поліпшення процедур попередньої обробки зображення, підвищення швидкодії, зменшення об'єму оброблюваної інформації, розв'язання яких має важливе наукове та практичне значення. З цих позицій розробка й дослідження методів обробки даних (зокрема, процедур попередньої обробки) для систем ідентифікації та аутентифікації на основі біометричних характеристик людського ока є актуальним науковим завданням.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Одержані результати дисертаційної роботи безпосередньо пов'язані з виконанням держбюджетних науково - дослідних робіт Національного авіаційного університету та з «Основними науковими напрямками та найважливішими проблемами фундаментальних досліджень у галузі природничих, технічних і гуманітарних наук НАНУ на 2014–2018 роки», з Стратегією національної безпеки України від 26 травня 2015 року № 287/2015 у контексті п. 4.12 «Реформування системи технічного і криптографічного захисту інформації з урахуванням практики держав–

членів НАТО та ЄС», НДР 23/14.01.04 «Системи контролю доступу по біометричними ознаками людини».

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є підвищення ефективності методів обробки даних в системах ідентифікації та аутентифікації користувачів по райдужній оболонці ока. Під ефективністю розуміємо зменшення об'єму оброблюваної інформації в базах даних систем контролю і управління доступом та підвищення швидкодії обробки даних.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі **задачі:**

- 1) проаналізувати сучасні підходи, методи і системи біометричної ідентифікації та аутентифікації користувачів;
- 2) удосконалити інтегрально–диференціальний метод локалізації зображення райдужної оболонки ока для зниження обчислювальних витрат;
- 3) розробити більш ефективний метод кодування райдужної оболонки ока;
- 4) розробити метод прийняття рішень для біометричних систем ідентифікації та аутентифікації;
- 5) розробити програмні засоби для проведення експериментальних досліджень запропонованих методів.

Об'єктом дослідження є процес обробки даних в біометричних системах ідентифікації та аутентифікації по райдужній оболонці ока.

Предметом дослідження є методи та моделі попередньої обробки даних в системах ідентифікації та аутентифікації на основі біометричних характеристик людського ока.

Методи дослідження. Використано методи цифрової обробки зображень, методи цифрової фільтрації, методи проектування баз даних, теорія ймовірності для прийняття рішення про аутентифікацію користувача, методи математичної статистики – для оброблення результатів експериментальних досліджень, комп'ютерного моделювання. Моделювання і обробка даних здійснювалася за допомогою програмного забезпечення Matlab та мови програмування C++.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному:

1. Удосконалено інтегрально-диференціальний метод локалізації зображення райдужної оболонки ока, який за рахунок попередньої НЧ-фільтрації (інтегрування) дозволяє зменшити локальні зміни інтенсивності пікселів, а наступна ВЧ-фільтрація (диференціювання) дозволяє виділити межі райдужної оболонки ока, така послідовність дій дозволяє знизити обчислювальні витрати при збереженні високої точності.

2. Вперше запропоновано метод кодування зображення райдужної оболонки ока, який за рахунок фазових відгуків при обробці модифікованим DoG-фільтром зображення райдужної оболонки ока, дозволяє кодувати один піксель зображення, одним бітом інформації і як наслідок зменшує об'єм бази даних систем контролю і управління доступом.

3. Отримав подальший розвиток метод прийняття рішень на основі статистичних критеріїв Неймана-Пірсона, який за рахунок використання нормованої відстані Хеммінга в біометричних системах ідентифікації по райдужній оболонці ока, дає змогу не зберігати в базі даних еталонне зображення.

Практичне значення одержаних результатів полягає у наступному:

– Удосконалено інтегрально – диференціальний алгоритм локалізації зображення для зменшення області пошуку райдужної оболонки та зменшення обчислювальних витрат.

– Розроблено алгоритм кодування райдужної оболонки ока, за рахунок використання в системах контролю і управління доступом модифікованого DoG-фільтра для отримання бінарного коду райдужки.

– Розроблені програмні модулі попередньої обробки зображення райдужки, DoG-фільтра, обчислення відстані Хеммінга та порогу, модуль порівняння кодів райдужок і прийняття рішень по статистичному критерію.

– Запропонована система ідентифікації та аутентифікації користувача без еталонного зображення райдужки, за допомогою застосування бінарного коду райдужки (фазові відгуки DoG-фільтра) і нормованої відстані Хеммінга з використанням статистичного критерію Неймана-Пірсона, що дало змогу

зменшити об'єм бази даних систем контролю і управління доступом, що в свою чергу зменшує час доступу до неї.

Результати дисертації використовуються у навчальному процесі кафедри засобів захисту інформації Національного авіаційного університету. Розроблені методи доведені до придатних інженерних рішень та були впроваджені в ПАТ «Миронівський хлібопродукт», ТОВ «Акксон Софт»

На практиці, отримані у дисертації результати можуть бути використаними для захисту процедур на об'єктах КІ як: вхід в комп'ютерну систему (райджка є паролем); прикордонний контроль (райджка як паспорт); оплата за телефонний дзвінок без готівки, карток і рін-коду; пасажирський транспорт; контроль доступу (в будинок, офіс, лабораторію і т.д.); водійські права та інші особисті документи; аутентифікація особистості при наданні пільг; криміналістика; протиугінна система автомобіля; протидія тероризму (наприклад, моніторинг безпеки аеропортів); безпека фінансових операцій (електронна комерція, банківські операції); Інтернет-безпека (контроль доступу до інформації); криптографія з біометричним ключем тощо.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на науково–технічних конференціях та семінарах, серед яких: Міжнародна науково–практична конференція «Актуальні питання забезпечення кібернетичної безпеки та захисту інформації» (Київ–2015); Всеукраїнська науково–практична конференція «Стан та удосконалення безпеки інформаційно–телекомунікаційних систем (SITS)» (Миколаїв, 2015); Міжнародна науково–практична конференція «Інформаційні технології та взаємодії» (IT&I) (Київ, 2016); науково–практична конференція «Проблеми кібербезпеки інформаційно–телекомунікаційних систем» (Київ, 2017); Міжнародна науково–практична конференція «АВІА» (Київ, 2017); Міжнародна науково–практична конференція «ITSEC» (Київ, 2017).

Публікації. За тематикою дослідження опубліковано 13 наукових праць, серед них 7 статей у фахових наукових виданнях та 6 у збірниках праць конференцій.

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел. Загальний обсяг дисертації становить 155 сторінок, в тому числі 123 сторінок основного тексту, ілюстрацій – 40, таблиць – 12.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СИСТЕМ БІОМЕТРИЧНОЇ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ТА АУТЕНТИФІКАЦІЇ КОРИСТУВАЧІВ

1.1 Порівняння біометричних технологій

Біометрія — це сукупність методів розпізнавання та ідентифікації осіб на основі їхніх унікальних фізіологічних або поведінкових характеристик. До біометричних ознак належать: відбитки пальців, структура обличчя, візерунки райдужної оболонки та сітківки ока, геометрія кисті, голос, почерк, стиль набору тексту на клавіатурі, а також візерунок вен на зап'ясті.

Серед сучасних біометричних технологій найпоширенішими є ідентифікація за відбитками пальців, геометрією руки, формою підпису, райдужною оболонкою ока, частотною характеристикою голосу, тепловою картою кровоносних судин обличчя та, в окремих випадках, за фрагментами ДНК.

Ідентифікація особистості людини по зображенню райдужної оболонки ока (РОО) – швидко розвивається метод біометрії, вже має широке застосування в системах контролю доступу. Він заснований на тому, що малюнок райдужної оболонки ока має індивідуальну, слабо змінюється з часом структуру. Унікальність структури райдужної оболонки ока відома з найдавніших часів [3]. Ідея ідентифікації особистості по РОО була запропонована офтальмологами в 1936 році. У 1958 році письменник Ян Флемінг висловив її в одному зі своїх детективів про Джеймса Бонда «Операція 'Кульова Блискавка'». За мотивами цього твору в 1984 році був знятий фільм «Ніколи не кажи ніколи».

У 1985 році Леонард Флом і Аран Сафір подали заявку на патент (виданий в 1987 р) на розпізнавання людини за характеристиками зіниці і райдужної оболонки на зображенні [4,5]. У 1992 році Джон Даугман опублікував роботу, в якій показав найвищу теоретично досягну точність розпізнавання по райдужці [6]. У 1994 році система ідентифікації особистості по зображеннях райдужної оболонки ока на основі досліджень Даугмана була запатентована. У тому ж році Вільдс

запропонував альтернативний метод сегментації райдужки і зберігання інформації про її текстуру [7]. У 1998 ще один метод був запропонований Боулс [8].

У 2000-х роках технологія розпізнавання за РОО набула широкого визнання та популярності. Це зумовлено трьома основними чинниками. Передусім, значне вдосконалення апаратного забезпечення: поява доступних камер високої якості та потужних обчислювальних систем зробила можливим ефективну обробку зображень у реальному часі. Другим чинником стало активне впровадження біометричних технологій у сфері безпеки — зокрема, у рамках боротьби з тероризмом і розширення паспортних систем у багатьох країнах. Нарешті, розпізнавання за райдужкою виявилось одним із найточніших біометричних методів, що значно підвищило його привабливість для практичного застосування [9–11].

Останні наукові огляди [12–15] демонструють надзвичайну активність дослідницької спільноти в галузі розпізнавання зображень райдужної оболонки ока — кількість праць, присвячених цій тематиці, давно сягнула сотень. Значний внесок у розвиток цієї сфери роблять дослідники з України та Європейського Союзу. Зокрема, варто згадати фахівців лабораторій комп'ютерного зору кількох провідних технічних університетів Польщі та Німеччини, де активно впроваджуються алгоритми глибокого навчання для підвищення точності біометричної ідентифікації. Також інтерес до тематики виявляють прикладні дослідницькі центри, що спеціалізуються на безпекових технологіях.

Помітну увагу проблематиці розпізнавання за РОО приділяють і наукові колективи у Сполучених Штатах, Великій Британії та Португалії, де ця технологія активно досліджується як у фундаментальному, так і в прикладному аспектах (University of Notre Dame, P.J.Flynn, K.W.Bowyer, Michigan State University, A.Ross, University of Cambridge, J.Daugman, University of Beira Interior, H.Proenca Warsaw University of Technology, A.Czajka). Системи розпізнавання по райдужці розроблені фірмами Iritech, LG, OKI, Panasonic, Sagem, Neurotechnology, Morpho.

Системи розпізнавання за РОО знаходять широке практичне застосування. В Об'єднаних Арабських Еміратах вони вже понад десятиліття використовуються при

паспортному контролі [16]. За офіційними даними, щоденно в цій системі виконується близько 2,7 мільярдів біометричних операцій [17]. В Індії ідентифікація за райдужкою є однією з ключових технологій у масштабному проєкті біометричної паспортизації, який станом на кінець 2011 року охопив понад 300 мільйонів громадян [18]. Таким чином, в даний момент розпізнавання по РОО є одним з основних і першим по точності методом аутентифікації, що викликає великий інтерес як у практичному, так і в теоретичному аспектах.

В зв'язку зі активним впровадженням біометричних технологій по РОО і їх реєстрації виникають проблеми у постійному збільшенні об'єму БД еталонів і як наслідок збільшення часу ідентифікації та аутентифікації, а також актуальною проблемою є робота системи в режимі один до багатьох.

Аутентифікація людини, тобто підтвердження того, що він є тим, за кого себе видає, поза всяких сумнівів є актуальним завданням, практичним вирішенням якої заняті тисячі і мільйони людей по всьому світу.

Сканування райдужної оболонки може бути використано в наступних цілях:

- вхід в комп'ютерну систему (райдужка є паролем);
- прикордонний контроль (райдужка як паспорт);
- контроль доступу (в будинок, офіс, лабораторію і т.д.);
- аутентифікація особистості при наданні пільг;
- криміналістика;
- протидія тероризму (наприклад, моніторинг безпеки аеропортів);
- безпеку фінансових операцій (електронна комерція, банківські операції);
- криптографія з біометричним ключем для шифрування і дешифрування

повідомлень.

Автоматизація процесів розпізнавання особи, зокрема із залученням новітніх технологій, є ключовим чинником у формуванні інфраструктури сучасного цифрового суспільства. Особливе значення в цьому контексті має ідентифікація — визначення особи шляхом пошуку її відповідника в базі даних. Стрімкий розвиток комп'ютерного зору, алгоритмів цифрової обробки зображень і зростання обчислювальних потужностей за останні роки зробив можливим вирішення

складних завдань автоматичного виявлення, аналізу та розпізнавання таких складних для формалізації об'єктів, як біометричні ознаки людини. Завдяки цьому ідентифікація та аутентифікація особи дедалі частіше виконуються за допомогою спеціалізованих біометричних систем, що сформували окрему прикладну галузь на стику математики, інформатики й біології — біометричну ідентифікацію.

На сьогодні досліджується й застосовується велика кількість біометричних параметрів, що отримали назву модальностей [2]. Серед них — відбитки пальців, зображення обличчя, райдужна оболонка та сітківка ока, візерунок вен, форма кисті, манера ходи, почерк, а також голосові характеристики. Багато з цих ознак використовувалися з метою ідентифікації задовго до появи цифрових технологій.

Загалом, методи розпізнавання за зображенням райдужної оболонки досягли високого рівня технологічної зрілості. Сучасні комерційні рішення забезпечують точність, співмірну з класичними методами ідентифікації, наприклад, введенням PIN-коду, демонструючи низькі показники хибних спрацьовувань та відмов.

Щоб бути ефективним у системах ідентифікації, біометричний параметр повинен відповідати ряду важливих критеріїв [19]:

- Універсальність — кожна особа має володіти цією ознакою;
- Унікальність — не існує двох осіб з однаковим значенням параметра;
- Стабільність — ознака не повинна суттєво змінюватися з часом;
- Вимірюваність — можливість надійного та зручного вимірювання;
- Ефективність — забезпечення потрібної точності, швидкості та прийнятних витрат на ресурси;

Зручність у використанні — готовність користувачів застосовувати метод у повсякденному житті;

Захищеність від шахрайства — стійкість до спроб фальсифікації або підробки.

Кожна з описаних технологій має свої сильні сторони і певні обмеження. Для об'єктивного порівняння методів біометричної ідентифікації часто використовуються таблиці, в яких усі модальності оцінюються за зазначеними критеріями.

Порівняльна оцінка біометричних методів за модальностями

Біометрія	Універсаль- ність	Унікаль- ність	Сталість	Вимірюва- ність	Ефектив- ність	Доступ- ність	Захище- ність
Відбиток пальця	С	В	В	С	В	С	В
Геометрія обличчя	В	Н	С	В	Н	В	Н
Форма кисті	С	С	С	В	С	С	С
Райдужка	В	В	В	С	В	Н	В
Сітківка	В	В	С	Н	В	Н	В
Динаміка підпису	Н	Н	Н	В	Н	В	Н
Розпізнавання по голосу	С	Н	Н	С	Н	В	Н
Клавіатурний почерк	Н	Н	Н	С	Н	С	С
Термографія обличчя	В	В	Н	В	С	В	В

Н низька С- середня В- висока

Крім базових характеристик, при розробці біометричних систем важливо враховувати низку специфічних вимог, що впливають на їхню практичність і зручність впровадження:

Економічна доцільність: як технічні засоби (сенсори), так і ПЗ має бути доступними для кожного користувача.

Комфорт у використанні: інтерфейс та апаратні засоби ідентифікації повинні бути інтуїтивно зрозумілими, а також передбачати можливість легкої деактивації або видалення користувача з системи.

Тривалість та стабільність експлуатації: обладнання повинне забезпечувати надійну роботу протягом тривалого часу без збоїв.

Таблиця 1.2 містить порівняльний аналіз біометричних методів з урахуванням цих додаткових вимог, що мають особливу актуальність у контексті ЕЦП.

Таблиця 1.2

Порівняння біометричних методів за спеціальними вимогами

Біометричний метод	Економічна доцільність	Комфорт у використанні	Тривалість та стабільність експлуатації
Відбиток пальця	С	В	С/В
Обличчя	С	Н	С
Форма кисті	В	С	С
Райдужка	В	В	С
Сітківка	В	Н	С
Динаміка підпису	С	В	С
Розпізнавання по голосу	Н	В	Н
Клавіатурний почерк	Н	С	Н
Судини кисті	С	В	С
Термограма лиця	С	Н	С

Н- низька С- середня В- висока

Вартість впровадження біометричних технологій значною мірою залежить від потреби в спеціалізованому обладнанні. Дешевшими є ті методи, що не вимагають складних пристроїв — наприклад, сканування відбитків пальців або голосова

ідентифікація. Натомість системи, які базуються на розпізнаванні райдужки, сітківки чи форми кисті, потребують дорогого оптичного устаткування, що суттєво підвищує загальні витрати.

Зручність використання також варіюється: найбільш ергономічними вважаються методи, які не потребують складних дій від користувача — достатньо торкнутися сенсора, сказати фразу або ввести підпис. Утім, системи, що потребують точної позиціонування (наприклад, вирівнювання очей або обличчя в полі зору камери), часто викликають труднощі та знижують комфорт взаємодії.

Ключову роль у виборі біометричної технології відіграє також середовище її використання. Якщо в офісних умовах можливе застосування практично будь-якого методу, то для мобільних або публічних середовищ критично важливими є надійність, стійкість до зовнішніх впливів і мінімальна потреба у взаємодії з користувачем. У громадських місцях перевагу надають пасивним методам або адаптивним сенсорам, які не потребують точного позиціонування.

Частота використання системи також визначає її доцільність: у випадках частого звернення, наприклад у фінансових установах, доцільними є швидкі, надійні та маловимогливі до користувача методи. Таблиця 1.3 ілюструє відповідність біометричних технологій до типових сценаріїв застосування.

Загальний аналіз показує: кожен метод має як переваги, так і обмеження, тому універсального рішення для всіх умов і задач не існує. Вибір оптимальної технології залежить від балансу між вартістю, точністю, зручністю та специфікою середовища використання.

Крім того, важливим чинником є потреба в масштабованості системи — можливості обробляти велику кількість користувачів без втрати продуктивності та якості розпізнавання. У цьому контексті перевагу мають методи з високою швидкістю обробки та невисокими вимогами до апаратного забезпечення. Зокрема, технології, що підтримують ідентифікацію в режимі "один до багатьох", є більш придатними для великих інформаційних систем, де автентифікація здійснюється без попередньо відомої інформації про користувача.

Порівняння біометричних методів за зручністю в різних застосуваннях

Модальність	Середовище		
	Дім / Офіс (ПК, ноутбук)	Мобільні умови (смартфон, ноутбук)	Громадські місця (банкомат, термінал)
Відбиток пальця	Зручно	Зручно	Зручно
Розпізнавання обличчя	Зручно	Частково (за виключенням телефона)	Зручно
Геометрія кисті	Зручно	Незручно	Незручно
РОО	Зручно	Незручно	Зручно
Сітківка	Незручно	Не підходить	Не підходить
Динаміка підпису	Зручно	Обмежено	Обмежено
Голосова ідентифікація	Зручно	Зручно	Проблеми з шумом
Почерк на клавіатурі	Зручно	Зручно	Не скрізь доступно
Візерунок вен кисті	Зручно	Незручно	Не підходить

Біометричні методи ідентифікації застосовуються в різних сферах — від смартфонів до державних систем безпеки. Кожна технологія має свої переваги й обмеження, і вибір залежить від конкретного контексту. Універсального рішення не існує: ефективність визначається частотою використання, рівнем безпеки та умовами застосування. Тому перед впровадженням важливо проводити оцінку технологій за кількома критеріями — точність, зручність, вартість та адаптивність до середовища.

Ідентифікація за райдужною оболонкою ока поєднує в собі всі ці якості, що робить її перспективною для застосування в умовах, де потрібна багаторазова

перевірка особи. У таблиці 1.4 представлено зіставлення різних біометричних технологій з урахуванням їх ефективності для повторного використання.

Таблиця 1.4

Порівняння модальностей за ефективністю багаторазової ідентифікації

Модальність	Оцінка придатності	Коментар
Відбиток пальця	Висока	Простий і зручний у використанні
Обличчя	Висока	Широко застосовується, добре сприймається користувачами
Форма кисті	Середня	Обмежене застосування, потребує спеціального обладнання
Райдужка	Середня	Висока точність, але низька практичність у масовому застосуванні
Сітківка	Низька	Складна реалізація, некомфортна взаємодія
Динаміка підпису	Висока	Природна асоціація з традиційним підписом
Голосова ідентифікація	Середня	Потребує захисту від шумів та імітацій
Клавіатурний почерк	Низька	Трудомісткий та дорогий у порівнянні з ПІН-кодом
Візерунок вен кисті	Середня	Технологія обмеженого поширення, потребує спеціальних сенсорів
Термограма лиця	Висока	Перспективний метод, зручний і швидкий у використанні

1.2. Око як об'єкт розпізнавання

Райдужна оболонка ока (iris, з давньогрецької — «веселка»), — це тонка м'язово-пігментна структура, що формує передню частину судинної оболонки ока.

Вона має вигляд кругової пластинки з центральним отвором — зіницею, через який проходить світло до сітківки.

Основна функція райдужки полягає в регулюванні кількості світла, що потрапляє в око: у яскравому освітленні зіниця автоматично звужується, а в умовах недостатнього світла — розширюється. Таким чином, райдужка виконує роль динамічної діафрагми, що забезпечує оптимальне освітлення внутрішніх структур ока.

Зовнішній край райдужки прикріплений до війкового тіла та склери, тоді як внутрішній край, що безпосередньо оточує зіницю, залишається вільним [20].

Ілюстративне зображення РОО наведено на рисунку 1.1.

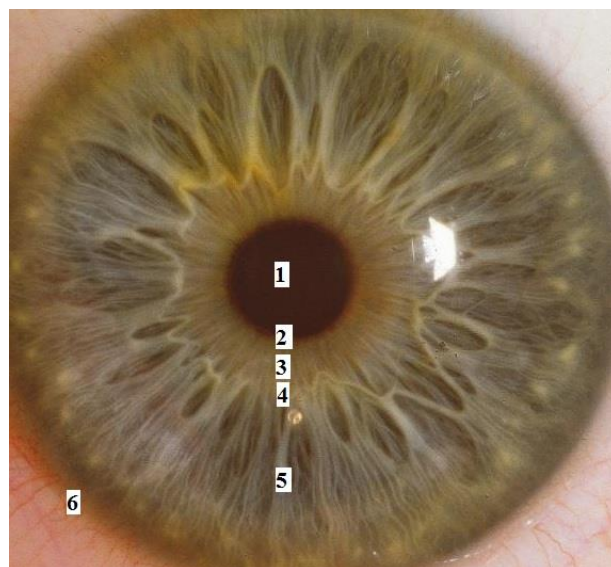


Рис. 1.1. Зображення РОО.

(1-зіниця, 2-пігментна межа зіниці, 3- зіничний пояс, 4 – автономне кільце, 5 –циліарний пояс, 6- корінь райдужки)

У структурі райдужної оболонки виділяють передню поверхню, звернену до рогівки, та задню, що межує з кришталіком. Передня частина, видима через прозору рогівку, визначає колір очей, який формується залежно від вмісту двох основних пігментів — меланіну та ліпофусцину. Від концентрації та розподілу цих пігментів у товщі тканини залежить відтінок райдужки. Крім того, різна здатність

пігментів поглинати світло впливає на сприйняття деталей райдужки при освітленні з різними довжинами хвиль.

Райдужка має кільцеподібну форму з типовими розмірами: близько 12,5 мм по горизонталі та 12,0 мм по вертикалі [20]. Її зовнішній край утворює майже правильне коло, яке є стабільним анатомічним орієнтиром у всіх людей. Внутрішній край формує зіницю — у здорової людини вона має округлу форму з легким зміщенням центру в напрямку носа [20, 21]. У деяких випадках можливі незначні відхилення від ідеальної круглої форми або децентрація, як показано на рис. 1.2.

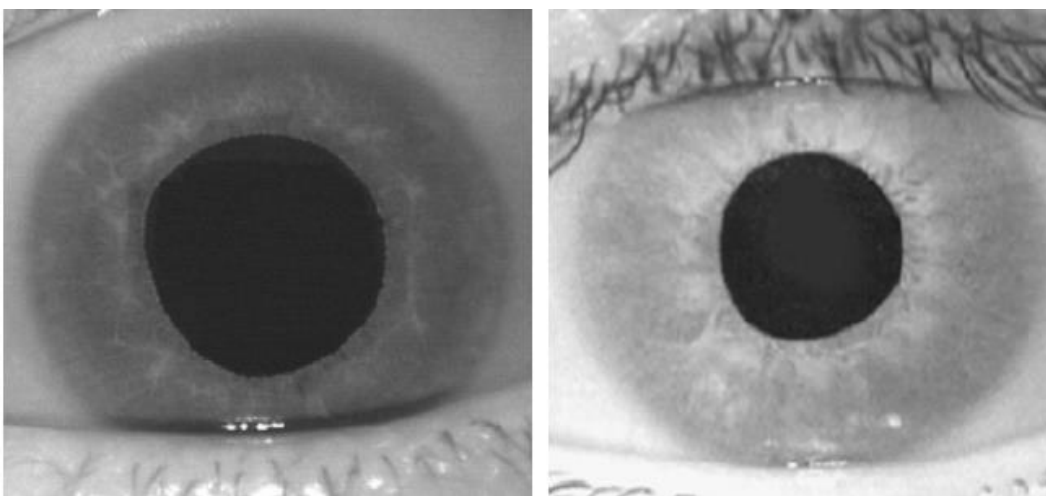


Рис. 1.2. Приклади некруглих зіниць.

Зміщення центру зіниці та відхилення її форми від ідеального кола часто пов'язані з віковими змінами або окремими офтальмологічними порушеннями. З роками ці аномалії можуть ставати більш вираженими. Буває коливання розташування центру зіниці та зміни її радіусу в певних напрямках може сягати до 20% відносно середніх значень.

Аналіз великої кількості зображень РОО дозволяє визначити типові співвідношення та геометричні обмеження між формою та положенням зіниці й зовнішнім контуром райдужки. Ці статистичні залежності є важливими для точного моделювання та розпізнавання біометричних ознак ока.

$$\begin{aligned}
r_p &> \frac{1}{7} r_l, \\
r_p &< \frac{3}{4} r_l, \\
r_p &> d = \sqrt{(x_l - x_p)^2 + (y_l - y_p)^2}, \\
2(r_l - r_p - d) &> r_l - r_p + d,
\end{aligned}
\tag{1.1}$$

де $(x_p; y_p)$ — координати центру об'єкта дослідження, апроксимуючи зіницю, r_p — радіус зіниці, $(x_l; y_l)$, r_l — центр і радіус райдужки, d — відстань між центрами оболонок. Перша нерівність (1.1) нам дає розуміння, що радіус РОО не може перевищувати радіус зіниці більш ніж у сім разів. Друга умова встановлює верхню межу: зіниця не може займати більше 75% площі райдужної оболонки. Третє обмеження забезпечує, щоб центр зіниці залишався всередині зовнішнього контуру райдужки. Четверта вимога стосується симетрії — якщо через обидва центри провести пряму, то довжини відрізків, відсічених цією прямою на обох контурах, мають відрізнятись не більше ніж у два рази.

Малюнок райдужки формується складною системою мікроструктур — переважно радіально спрямованих волокон, які переплітаються з елементами сполучної тканини. Цей унікальний для кожної людини візерунок є основою для біометричної ідентифікації. У більшості випадків зображення райдужки має низький контраст — її яскравість значно поступається контрасту інших частин ока, таких як темна зіниця чи світла склера. Деякі типи вирізняються особливо тонкою текстурою, без виразних яскравих або темних елементів, що ускладнює обробку зображення та висуває підвищені вимоги до якості оптики й умов зйомки.

Деталі малюнка РОО стають помітними по-різному залежно від довжини хвилі світла. Так, у людей зі світлими очима структура найкраще візуалізується у видимому діапазоні, тоді як у темнооких — у ближньому інфрачервоному. Це пов'язано з особливостями пігментації і світлопоглинання, тому вибір оптимального спектра для зйомки й досі залишається предметом досліджень.

Формування структур оболонки відбувається ще до народження і залишається майже незмінним упродовж життя. Після народження можливі лише зміни кольору через накопичення пігменту, проте сама геометрія малюнка

зберігається сталою. З віком можуть спостерігатися процеси депігментації, пов'язані з фізіологічним старінням, але вони майже не впливають на розпізнавання. Завдяки цим властивостям райдужна оболонка вважається однією з найбільш стабільних біометричних ознак.

Райдужка має велику інформаційну насиченість, оскільки містить велику кількість мікроструктурних елементів, які можна використовувати для ідентифікації. Її незмінна плоска форма та фіксовані розміри зменшують вплив зовнішніх факторів і спрощують нормалізацію зображення. Дослідження показують, що з райдужки діаметром близько 200 пікселів можна отримати не менше 200 біт унікальної інформації.

Якість зображення райдужки значною мірою залежить від умов зйомки. Відблиски на рогівці, спричинені сторонніми джерелами світла, можуть маскувати важливі деталі. Тому всі сучасні системи розпізнавання райдужної оболонки використовують інфрачервоне підсвічування, яке зменшує вплив зовнішнього освітлення і не створює дискомфорту для користувача.

Оскільки райдужка — це невелика за розмірами структура, для отримання якісного зображення потрібне точне розміщення ока в зоні фокусування. Навіть мінімальне відхилення голови або очей від оптимального положення здатне суттєво вплинути на результат. У більшості систем використовується направлене позиціонування або додаткові камери для контролю орієнтації. В однокамерних системах компенсація зміщення ускладнена і потребує аналізу кількох варіантів зображення з різними кутами повороту, що підвищує навантаження на систему і може зменшити точність розпізнавання.

Райдужна оболонка — надзвичайно надійна біометрична характеристика з високим рівнем інформативності та стабільності. Водночас її використання потребує точного обладнання, контрольованих умов зйомки та коректного позиціонування. Попри ці обмеження, технологія демонструє високу ефективність у сферах, де можливе забезпечення стабільного середовища — наприклад, у прикордонному контролі, банківській сфері чи урядових системах ідентифікації..

Для більш чіткого розуміння проаналізуємо найбільш поширені системи на ринку СКУД табл.1.5.

Таблиця 1.5

Системи найбільш поширені на ринку СКУД з використанням райдужки

Система	параметри					
	Фокусна відстань, м	Час на зйомку, с	Максимальна кількість записів в БД	Пропускна можливість системи користувачів за хв.	FAR	FRR
LG -3000	0.1	0.04	1000	10	0,00066	0,00078
OKI IRISPASS-WG	0.45	30	1000	1-2	0,00066	0,00078
Panasonic BM-ET300	0.35	0.5	10000	10	0,00066	0,00078
Securimetrics Pier 2.3	0.12	0.008	2000	30	0,00066	0,00078
Sarnoff IOM	3	8	50000	30	0,00066	0,00078
Циркон 4	0.4	2	2000	12-30	0,00066	0,00078
EySwipe-Nano	0.3	2	50000	20	0,00066	0,00078

Аналіз поширених систем ідентифікації та аутентифікації за зображенням райдужної оболонки ока (РОО) показує, що всі вони мають спільне обмеження — фіксовану кількість записів у базі даних, що впливає на масштабованість і продуктивність таких рішень.

Сучасні підходи до аутентифікації особи зазвичай базуються на трьох основних принципах:

Принцип володіння — автентифікація здійснюється на основі об'єкта, що належить користувачеві (наприклад, перепустка, банківська картка, ключ або документ, що посвідчує особу).

Принцип знання — ідентифікація ґрунтується на інформації, яку знає лише користувач (пароль, PIN-код, секретне питання тощо).

Принцип фізичних або поведінкових ознак — автентифікація здійснюється за допомогою біометричних характеристик. Приклади таких ознак детально розглянуто вище.

Сучасні вимоги до систем біометричної ідентифікації, зокрема розпізнавання за РОО, передбачають здатність алгоритмів працювати в режимі ідентифікації типу «один до багатьох». У такому сценарії особа не ідентифікує себе заздалегідь жодним способом — ні за допомогою картки, ні документа — і система самостійно повинна виконати пошук у повній базі зареєстрованих шаблонів, встановлюючи її особу. Це значно відрізняється від традиційного верифікаційного режиму «один до одного», коли користувач попередньо декларує свою ідентичність, а система лише перевіряє її шляхом порівняння з одним зразком.

Хоча більшість біометричних рішень орієнтовані саме на верифікацію, технологія розпізнавання райдужки вже успішно використовується в ідентифікаційних системах. Один із найяскравіших прикладів — програми в міжнародних аеропортах. Зокрема, після пілотного впровадження в лондонському аеропорту Хітроу у 2001 році, вже у 2002 році система розпізнавання за райдужкою була впроваджена в аеропорту Схіпхол (Амстердам, Нідерланди) у межах програми Privium.

Учасники програми — переважно пасажери, які часто подорожують — отримували персональний Iris-код, що зберігається у захищеній базі даних. Після цього вони могли проходити імміграційний контроль без черг: достатньо лише зафіксувати погляд у камеру, яка автоматично зчитує райдужку, обробляє зображення за алгоритмами Даугмана і ідентифікує користувача менш ніж за одну секунду. Камера оснащена низкою інтелектуальних функцій — автоматичним вмиканням при наближенні, автофокусом, системою наведення за допомогою

дзеркала та голосовими підказками, що робить процес зручним і швидким. Висока якість зображення значно знижує ймовірність помилок розпізнавання.

Інший масштабний проєкт був реалізований в аеропорту Франкфурт-на-Майні, де в програмі брали участь близько 10 000 постійних пасажирів німецьких авіаліній. Протягом першого року в середньому 140 осіб щоденно користувалися системою розпізнавання райдужки, і ця кількість стабільно зростала.

Аналогічні ініціативи під назвою IRIS (Immigration and Recognition of Iris System) були реалізовані в 10 великих терміналах Великої Британії та в восьми аеропортах Канади. Ці проєкти засвідчили, що біометрична ідентифікація за РОО є ефективною, зручною для користувачів і має потенціал до широкого впровадження як альтернатива традиційним документам. Об'єм баз даних систем контролю і управління доступом на базі РОО залежить від розрядності коду. Якщо розрядність коду райдужки 8×256 біт, то ймовірність повторення коду райдужки приблизно 1:10000. Відповідно об'єм БД повинен бути менший чим 10000 записів, тоді одна із задач є отримання стійкого коду райдужної оболонки ока, який не буде повторюватись 2^{33} раз.

Один із ключових викликів, що постає перед розробниками таких систем, полягає в забезпеченні унікальності та стійкості біометричних шаблонів при масовому використанні. Навіть за умови високої ентропії райдужного коду, зростання кількості зареєстрованих користувачів підвищує ризик колізій — випадків, коли дві особи мають ідентичні або близькі коди. Це особливо критично у системах з великою базою даних, де ідентифікація виконується в режимі "один до багатьох". У зв'язку з цим ведуться активні дослідження, спрямовані на підвищення розрядності коду райдужної оболонки, покращення алгоритмів обробки зображень і впровадження додаткових рівнів верифікації.

Ще одним важливим аспектом є забезпечення сталості біометричного коду незалежно від зовнішніх чинників, таких як освітлення, поворот голови, фізіологічні зміни або стан очей. Сучасні алгоритми використовують методи нормалізації, фільтрації та компенсації змін, що дозволяє зберігати високу точність навіть при варіативних умовах. Це дає змогу впроваджувати системи РОО у

динамічних середовищах — на транспорті, у медичних установах або в місцях масового скупчення людей, де важко забезпечити ідеальні умови для реєстрації зображення.

У перспективі можна очікувати подальше зростання ролі технологій розпізнавання за райдужкою в мультифакторних системах безпеки. Інтеграція з іншими методами (наприклад, розпізнаванням обличчя або голосу) підвищує надійність системи, знижує ризики помилкової ідентифікації й забезпечує більш гнучкий підхід до контролю доступу. По мірі вдосконалення апаратного забезпечення та зниження вартості технології можна прогнозувати її поступове впровадження не лише в аеропортах, але й у сфері фінансів, охорони здоров'я, електронного урядування та персональних мобільних пристроїв.

1.3 Основні поняття і методи

Зображення можна розглядати як функцію $I = (x, y) = I(p)$, що представляють дискретні позиції пікселів. Кожна пара координат x і y визначає окремий піксель зображення, $x, y \in Z$; $x, y \in \mathbb{Z}$. [38,39].

Розміри зображення обмежені по горизонталі та вертикалі, тобто існує певна кількість рядків і стовпців пікселів.: $x \in [0, W - 1]$, $y \in [0, H - 1]$. Функція яскравості I , що відповідає кожному пікселю, є цілим числом і не перевищує заданого максимального значення. $L : I(x, y) \in \mathbb{Z}, I(x, y) \in [0, L - 1]$

Таким чином, будь-яке зображення можна представити у вигляді матриці, де кожен елемент — це невід'ємне ціле число в певному діапазоні яскравості. Бінарні зображення є окремим випадком, у якому пікселі можуть набувати лише одного з двох можливих значень (наприклад, 0 або 1), що відповідає двом рівням яскравості — темному й світлому $I = (x, y) \in \{0, 1\}$.

Гістограма яскравості — це функція, що описує, як розподілені значення яскравості по всьому зображенню. Вона відображає, скільки пікселів мають кожне можливе значення яскравості. Для кожного рівня яскравості формується окремий

стовпчик, висота якого відповідає кількості пікселів із цим значенням, що дозволяє швидко оцінити контраст і динамічний діапазон зображення.

$$h(b) = |\{p : I(p) = b\}|. \quad (1.2)$$

Інтегральна гістограма — це функція, яка відображає загальну кількість пікселів, яскравість яких не перевищує заданого порогового рівня.

$$H(b) = |\{p : I(p) \leq b\}| \equiv \sum_{b'=0}^b h(b'). \quad (1.3)$$

Однією з найуживаніших операцій під час обробки зображень є визначення порогового значення яскравості на основі аналізу гістограми [41,42]. Такий підхід дозволяє розділити зображення на області з різними рівнями яскравості, що особливо корисно для виділення об'єктів або контурів. Суть операції полягає у виборі такого порога, за якого пікселі, яскравість яких нижча або вища за цей рівень, класифікуються відповідно до заданого критерію (наприклад, «об'єкт» або «фон»), що є ключовим етапом у задачах бінаризації та сегментації зображень.

$$T_b : H(T_b) \leq lWH, H(T_b + 1) > lWH, T_b \in Z, \quad (1.4)$$

Нехай l - частка пікселів (квантиль), W і H - розмір зображення, На основі такого порогу виконується бінаризація — перетворення зображення у двотонове.

$$I'(p) = \begin{cases} 0, & \text{if } I(p) \leq T_b, \\ 1, & \text{if } I(p) > T_b. \end{cases} \quad (1.5)$$

Типово вважається, що пікселі з яскравістю 1 репрезентують зацікавленість в дослідженні, а 0 відповідає фону. Такий підхід до бінаризації (1.5) є ефективним визначником області зображення. У випадках, коли необхідно навпаки — виділити темні зони, застосовується альтернативна бінаризація (1.6), яка акцентує увагу на низьких значеннях яскравості.

Вибір типу бінаризації залежить від цілей аналізу: наприклад, у задачах виявлення тіней, затемнених об'єктів чи пошкоджень в матеріалах, пріоритет надається темним пікселям. Застосування відповідного типу бінаризації дозволяє спростити подальшу обробку та підвищити точність алгоритмів сегментації.

$$I'(p) = \begin{cases} 0, & \text{if } I(p) < T_b, \\ 1, & \text{if } I(p) \geq T_b. \end{cases} \quad (1.6)$$

Ключовим поняттям у аналізі зображень є градієнт яскравості — це вектор, що складається з часткових похідних функції зображення за напрямками координат x та y . Він характеризує напрямок і швидкість зміни яскравості у кожній точці:

$$g(p) = \nabla(p) = \begin{pmatrix} g_x \\ g_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial x} I(p) \\ \frac{\partial}{\partial y} I(p) \end{pmatrix}. \quad (1.7)$$

У дискретному випадку вираз (1.7) записується у вигляді різниці.

$$g(p) = \begin{pmatrix} I(x+1, y) - I(x-1, y) \\ I(x, y+1) - I(x, y-1) \end{pmatrix}. \quad (1.8)$$

На практиці градієнти часто обчислюють за допомогою масок Прюїтта.

$$g(x, y) = \begin{pmatrix} -I(x-1, y+1) & +0 & +I(x+1, y+1) \\ -I(x-1, y) & +0 & +I(x+1, y) \\ -I(x-1, y-1) & +0 & +I(x+1, y-1) \end{pmatrix}, \quad (1.9)$$

$$g(x, y) = \begin{pmatrix} +I(x-1, y+1) & +I(x, y+1) & +I(x+1, y+1) \\ +0 & +0 & +0 \\ -I(x-1, y-1) & -I(x, y-1) & -I(x+1, y-1) \end{pmatrix},$$

де ξ і η - напрямки.

Зазвичай цікавими є не самі значення градієнтів, а їх напрямок та співвідношення компонент, зокрема в діагональних напрямках. Тому обчислені за формулами (1.7) та (1.8) градієнти не нормуються до абсолютних значень яскравості. Аналогічно можна побудувати просту гістограму абсолютних значень градієнта:

$$h(G) = |\{p : \|g(p)\| = G\}|, \quad (1.12)$$

і з накопиченням

$$H(G) = |\{p : \|g(p)\| \leq G\}| \equiv \sum_0^G h(G'). \quad (1.13)$$

За (1.4) по розраховуємо поріг:

$$T_g : H(T_g) \leq lWH, H(T_g + 1) > lWH, T_g \in R, \quad (1.14)$$

і проводиться бінаризація зображення.

Важливим аспектом зміни яскравості, є і напрямок зміни. При пошуку області інтересу у формі кола зазвичай відомий його центр. Тобто показники яскравості на межі кола зазвичай орієнтовані по напрямку від центра до відповідного пікселя або навпаки. Це дає можливість локалізувати пікселі, що належать до контуру кола, за напрямком їх градієнтів, який має відповідати напрямку на центр. Такий підхід значно підвищує точність виявлення контурів кругових об'єктів на зображенні, особливо в умовах зашумленості або неоднорідного освітлення:

$$\frac{g \cdot (p - c)}{\|g\| \|p - c\|} < T\phi, \quad (1.15)$$

де g - вектор градієнта в точці p , c - центр, $T\phi$ - порогове значення кута, що враховує похибки визначення центру та зашумленість. Зазвичай координатний початок зміщують у центр кола c , що дозволяє спростити умову (1.15):

$$\frac{g \cdot c}{\|g\| \|c\|} < T\phi, \quad (1.16)$$

У багатьох методах обробки зображень спочатку виділяються пікселі-кандидати — ті, що з більшою ймовірністю належать до шуканого об'єкта (наприклад, пікселі з малою яскравістю чи високим градієнтом). Для зниження розмірності та узагальнення даних над такими пікселями виконують проектування. $K = \{p_i\}$.

Проекція множини точок на вісь — це перенесення їх координат на пряму, задану рівнянням $\rho = \cos \phi x + \sin \phi y$:

$$\Pi(l) = \sum_{p_i \in K} \delta(p_{i,x} \sin \phi - p_{i,y} \cos \phi). \quad (1.17)$$

У дискретному випадку для пікселів-кандидатів проекція виконується шляхом обчислення їх координат уздовж заданої осі:

$$\Pi(l) = \left\{ \left\{ p : p \in K, \quad l - \frac{1}{2} \leq p_x \sin \phi - p_y \cos \phi < l + \frac{1}{2} \right\} \right\}. \quad (1.18)$$

На горизонтальну і вертикальну осі, тобто $\phi = \pi/2$ і $\phi = 0$ відповідно, (1.18) спрощується до:

$$\Pi_{hor}(l) = |\{p \in K, p_x = l\}|, \quad \Pi_{ver}(l) = |\{p \in K, p_y = l\}|. \quad (1.19)$$

Оскільки контури РОО це кола, ключову роль у їх виявленні відіграють методи пошуку та виділення їх. Ефективним підходом для аналізу подібних об'єктів є використання кругової проекції. Припустимо, що на зображенні присутня округла область, і певним методом уже виділено множину пікселів межі цієї області — множину кандидатів K , яка також може містити зашумлені або випадкові точки. Припустимо, що відомо наближене положення центра цієї області. Для спрощення подальших розрахунків перенесемо початок координат у знайдену центральну точку.

Круговою проекцією назвемо функцію:

$$P(r) = \frac{|p : r - 0,5 \leq \|p\| < r + 0,5, p \in K|}{|p : r - 0,5 \leq \|p\| < r + 0,5|}. \quad (1.20)$$

Це означає, що для кожного значення радіуса визначається частка кандидатів серед усіх пікселів, розташованих на цій відстані від центру. Оскільки контур кола має приблизно сталу відстань до центра, відповідні кандидати утворюють локальні піки на круговій проекції. Натомість випадкові або нецентровані контури дають більш рівномірний розподіл. Таким чином, різкі локальні максимуми на круговій проекції можуть свідчити про наявність концентричних меж.

На відміну від кругової, радіальна проекція оцінює кількість кандидатів у секторах за кутовим напрямком, а не радіусом.

$$P(\Phi) = \frac{|p : \Phi - \delta\phi \leq \|\phi(p)\| < \Phi + \delta\phi, p \in K|}{|p : \Phi - \delta\phi \leq \|\phi(p)\| < \Phi + \delta\phi|} \quad (1.21)$$

де $\phi(p)$ - кутова координата p , $\delta\phi$ - крок дискретизації при побудові проекції. Аргумент Φ - дискретний, можна взяти $\Phi \in [0; 359]$, якщо дискретизувати один градус в один відлік, тоді $\delta\phi = 1/2$, кут Φ вимірюється в градусах.

Для опису виявлених об'єктів часто застосовують поняття еквівалентного еліпса — геометричної фігури (еліпса з відповідною площею), яка має ті самі моменти інерції нульового, першого та другого порядку, що й сам об'єкт.

Припустимо, що об'єкт K складається з набору пікселів:

$$K = \{(x_i; y_i)\}_{i=1}^N \quad I(x_i, y_i) \neq 0. \quad (1.22)$$

Моменти будуть наступні

$$\begin{aligned}
 0: \quad M &= \sum_{i=1}^N 1 \equiv N; \\
 1: \quad M_x &= \sum_{i=1}^N x_i \quad M_y = \sum_{i=1}^N y_i; \\
 2: \quad M_{xx} &= \sum_{i=1}^N x_i^2 \quad M_{xy} = \sum_{i=1}^N x_i y_i \quad M_{yy} = \sum_{i=1}^N y_i^2.
 \end{aligned}
 \tag{1.23}$$

Еліпс можна описати за допомогою п'яти параметрів: координатами його центру (двома значеннями) c_x і c_y , довжинами великої та малої півосей a і b , а також кутом повороту ϕ , це є найбільш доцільним з точки зору опису об'єкта та формулювання на цій основі критеріїв. Координати центру обчислюються:

$$c_x = \frac{M_x}{M}, c_y = \frac{M_y}{M}. \tag{1.24}$$

Нормовані другі моменти

$$\overline{M}_{xx} = \frac{M_{xx}}{M} - \left(\frac{M_x}{M}\right)^2, \quad \overline{M}_{xy} = \frac{M_{xy}}{M} - \frac{M_x}{M} \frac{M_y}{M}, \quad \overline{M}_{yy} = \frac{M_{yy}}{M} - \left(\frac{M_y}{M}\right)^2. \tag{1.25}$$

Кут нахилу

$$\phi = \frac{1}{2} \arctan \frac{2\overline{M}_{xy}}{M_{xx} - M_{yy}}. \tag{1.26}$$

Осі еліпса

$$\begin{aligned}
 a &= 2\sqrt{\cos^2 \phi \overline{M}_{xx} + 2\cos \phi \sin \phi \overline{M}_{xy} + \sin^2 \phi \overline{M}_{yy}}, \\
 b &= 2\sqrt{\sin^2 \phi \overline{M}_{xx} - 2\cos \phi \sin \phi \overline{M}_{xy} + \cos^2 \phi \overline{M}_{yy}}.
 \end{aligned}
 \tag{1.27}$$

Еквівалентне коло є окремим випадком еквівалентного еліпса та характеризується трьома параметрами: координатами центру c_x і c_y , радіусом r , що в свою чергу можемо обрахувати наступним чином:

$$c_x = \frac{M_x}{M}, c_y = \frac{M_y}{M}, r = \sqrt{\frac{M}{2\pi}}. \tag{1.28}$$

У більшості випадків ядра мають компакту форму і володіють радіальною симетричною структурою. Найчастіше використовуються елементи круглої, квадратної або хрестоподібної форми. Вибір ядра визначає характер обробки:

залежно від його конфігурації можна досягти розширення, стискання, згладжування або виявлення меж об'єктів на зображенні. Таким чином, морфологічні операції є важливим інструментом для покращення структури виділених областей і подальшої сегментації.

Далі розглянемо морфологічні операції, які застосовуються до бінарного зображення — тобто до множини пікселів із ненульовим значенням, що виділені на основі попереднього аналізу (див. вираз 1.22). Основним елементом для таких операцій є структурний елемент, або ядро, — множина пікселів, зазвичай задана у вигляді масиву з фіксованою геометричною формою, наприклад

$$J_5 = \begin{Bmatrix} (0;1) \\ (-1;0) & (0;0) & (1;0) \\ (0;-1) \end{Bmatrix}, \quad J_9 = \begin{Bmatrix} (-1;1) & (0;1) & (1;1) \\ (-1;0) & (0;0) & (1;0) \\ (-1;-1) & (0;-1) & (1;-1) \end{Bmatrix}. \quad (1.29)$$

Зсув множини J на вектор $s = (s_x; s_y)$ назовемо множиною:

$$J_z = \{(j_i + s_x, j_i + s_y)\}. \quad (1.30)$$

Дилатація K по ядру J назовемо:

$$K \oplus J = \{s : K \cup J_s \neq \emptyset\}. \quad (1.31)$$

Ерозія K по ядру J назовемо:

$$K \oplus J = \{s : \bar{K} \cup J_s \neq \emptyset\} = \{s : \bar{J}_s \subset K\}. \quad (1.32)$$

1.4 Висновки до першого розділу

Порівняльний аналіз різних біометричних методів ідентифікації свідчить, що технологія розпізнавання за РОО має ряд суттєвих переваг у контексті точності, стійкості, надійності та захисту від підробок. Завдяки унікальності структури райдужки кожної людини та стабільності її параметрів упродовж життя, ця технологія вважається однією з найбільш перспективних у сфері систем безпеки. Вона демонструє високу ефективність як у верифікаційному режимі, так і в режимі повноцінної ідентифікації «один до багатьох», що особливо важливо для реалізації безконтактних і швидких процедур доступу в умовах підвищених вимог до захисту даних.

Втім, попри беззаперечні переваги, розпізнавання за райдужною оболонкою має низку суттєвих обмежень. Одним із головних викликів є висока алгоритмічна складність, яка вимагає значних обчислювальних ресурсів — як на етапі попередньої обробки зображення, так і при виконанні порівняння з базою шаблонів. Також слід зазначити, що обладнання для зчитування зображень райдужки — зокрема високоточні камери з інфрачервоним підсвічуванням та системи наведення — є дорогим, що ускладнює масове впровадження технології, особливо в мобільних або розподілених системах.

У цьому контексті надзвичайно актуальними є дослідження, спрямовані на створення нових методів обробки та розпізнавання зображень райдужної оболонки, які б дозволяли:

- забезпечувати високу точність і надійність навіть за наявності шумів, спотворень та варіацій освітлення;
- зменшити обчислювальне навантаження шляхом оптимізації алгоритмів;
- підвищити швидкість ідентифікації;
- знизити вартість апаратного забезпечення за рахунок використання менш складних сенсорів без втрати якості розпізнавання.

Подальший розвиток цієї технології відкриває широкі можливості для її застосування у сфері цифрової ідентифікації, прикордонного контролю, фінансових сервісів, безконтактного доступу до приміщень, а також у мобільних пристроях нового покоління.

Список використаних джерел у першому розділі

1. Постанова Кабінету Міністрів України «Про затвердження Порядку формування переліку інформаційно-телекомунікаційних систем об'єктів критичної інфраструктури держави» від 23.08.2016 р. №563 [Електронний ресурс] / Верховна рада України // Закон України. - Режим доступу: [http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/563-2016-%D0%BF\(1310.2016\)](http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/563-2016-%D0%BF(1310.2016)) .
2. Гуменюк Г. Б., Ніколаєнко С. М., Варакін Ю. О. Біометричні технології і системи: методологія, архітектура, реалізація. – Київ: Наукова думка, 2014. – 312 с. ISBN 978-966-00-1409-3.
3. Ковтуненко В. О., Кравець В. С. Основи побудови біометричних систем безпеки: Навчальний посібник. – Київ: НАВС України, 2013. – 176 с. ISBN 978-966-437-421-5.
4. Introduction to Computer Security Matt Bishop, University of California - Davis ISBN: 0321247442
5. Flom L., Sar A. Iris recognition system // United States Patent 4641349. Filed February 20, 1985.
6. Daugman J. High condence personal identication by rapid video analysis of iris texture // Proc. IEEE Internat. Carnahan conf. on security technology, 1992. P. 50-60.
7. Wildes R.P., Asmuth J.C., Green G.L. et al. A system for automated iris recognition // Proc. of the 2nd IEEE Workshop on Applications of Computer Vision. 1994. P. 121-128.
8. Boles W., Boashash B. A human identication technique using images of the iris and wavelet transform // IEEE Trans. Signal Process. 1998. V.46. N.4.P.1185-1188.
9. Multiple Biometric Grand Challenge (MBGC - 2007) // <http://www.nist.gov/itl/iad/ig/mbgc.cfm>
10. Multiple Biometric Evaluation (MBE2009) // <http://www.nist.gov/itl/iad/ig/mbe.cfm>

11. Murynin A.B., Kuznetsov V.D., Matveev I.A. Automatic Stereoscopic System For Person Recognition // 23rd Int. Congress on High-Speed Photography and Photonics, Moscow, 1998; Proc. of SPIE Volume: 3516, pp.409-416.
12. Bowyer K.W., Hollingsworth K., Flynn P.J. Image understanding for iris biometrics: a survey // Computer Vision and Image Understanding. 2008. V.110. N.2. P.281-307.
13. Bowyer K.W., Hollingsworth K., Flynn P.J. A Survey of Iris Biometrics Research: 2008-2010, in Handbook of Iris Recognition, Mark Burge and Kevin W. Bowyer, editors, Springer, 2012.
14. Labati R.D., Genovese A., Piuri V., Scotti F. Iris segmentation: state of the art and innovative methods // Intelligent Systems Reference Library. 2012. V.37.P.151-182.
15. Ng R.Y.F., Tay Y.H., Mok K.M. A Review of Iris Recognition Algorithms//Proc. Int. Symp. Information Technology. 2008. V.2. P.1-7.
16. Al-Raisi A.N., Al-Khoury A.M. Iris recognition an the challenge of homeland and border control security in UAE // Telemat. Inform. 2008. V.25. N.2.P.117-132.
17. Daugman J., Malhas I. Iris recognition border crossing system in UAE // Biometrics. 2004. V.44. N.2. P.4953.
18. Aadhaar gains momentum, clocks two crores in October, The Times of India. 2011.//http://articles.economictimes.indiatimes.com/2011-11-02/news/30350146_1_aadhaar-numbers-uidai-director-general-enrollment-stations
19. Jain, A. K.; Ross, Arun & Prabhakar, Salil (January 2004), "An introduction to biometric recognition", IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology T. 14th (1): 4-20
20. Wildes R.P. "Iris Recognition: An Emerging Biometric Technology." Proceedings of the IEEE, Vol. 85, No. 9, 1997, pp. 1348–1363.
21. Кондратюк Д. С., Лавріненко І. А. Методи обробки та аналізу зображень у задачах технічного зору: Навч. посібник. – К.: НТУУ «КПІ», 2012. – 210 с.
22. Жук М. Ф., Сичов В. А. Технології біометричної ідентифікації особистості: Навч. посібник. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2008. – 198 с.
23. Jensen B. The science and practice of iridology. - 21st Printing, 1995.-372 p.

24. Kansky J.J. Clinical Ophthalmology: a Systematic Approach, Elsevier. London,2003.
25. Daugman J. High condence visual recognition of persons by a test of statistical independence // IEEE TPAMI. 1993. V.15. N.11. P.1148-1161.
26. ISO/IEC 19794-6:2011 Preview Information technology -- Biometric data interchange formats -- Part 6: Iris image data.
27. ANSI INCITS 377-2009 Information technology - Finger Pattern Data Interchange Format
28. ANSI INCITS 381-2009 Information Technology - Finger Image Based Data Interchange Format
29. ANSI INCITS 378-2004 Information technology - Finger Minutiae Format for Data Interchange
30. ANSI INCITS 379-2004 - Information Technology Iris Image Interchange Format
31. ANSI INCITS 396-2005 Information Technology - Hand Geometry Interchange Format Information Technology Industry Council
32. ANSI INCITS 385-2004 - Face Recognition Format for Data Interchange
33. ANSI INCITS 442-2010 Information Technology – Biometric Identity Assurance Services (BIAS)
34. ANSI INCITS 429 - Conformance Testing Methodology For Ansi Incits 358-2002, Bioapi Specification
35. ANSI/NIST-ITL 1-2007 - Data Format for the Interchange of Fingerprint Facial, & Other Biometric Information
36. Дьяконов В. П. Методы и алгоритмы распознавания образов. — СПб.: БХВ-Петербург, 2004. — 512 с..
37. Duda R.O., Hart P.E., Stork D.G. Pattern Classification. — 2nd ed. — New York: Wiley-Interscience, 2000. — 654 p.
38. Jain A.K., Ross A.A., Nandakumar K. Introduction to Biometrics. – 2nd ed. – New York: Springer, 2011. – 312 p.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИ ПОПЕРЕДНЬОЇ ОБРОБКИ І ТЕКСТУРНИХ АНАЛІЗУ ЗОБРАЖЕННЯ РАЙДУЖНОЇ ОБОЛОНКИ ОКА

2.1. Принципи ідентифікації особистості по райдужній оболонці ока

На основі результатів, отриманих у першому розділі дослідження, можна зробити висновок про нагальну потребу у створенні нових алгоритмів та методів для ефективної локалізації райдужної оболонки на зображеннях, її подальшої нормалізації, а також екстракції та кодування текстурних ознак з метою точної ідентифікації. Порівняльний аналіз біометричних технологій засвідчив, що використання райдужної оболонки ока як ідентифікатора має низку переваг: високу унікальність, стабільність у часі та широкі можливості застосування у системах контролю доступу. Водночас ці системи мають і певні обмеження, зокрема високу складність обчислювальних процедур, ресурсоємність та фінансову затратність. Це зумовлює потребу в наукових дослідженнях, спрямованих на розробку нових методів обробки зображень райдужки, які були б менш чутливими до шумів і спотворень, а також дозволили б зменшити технічні вимоги до систем.

Особливістю райдужної оболонки є її складна текстурна будова, яка є унікальною для кожної особи і практично не змінюється з часом. Саме текстурні ознаки містять ключову інформацію для ідентифікації, тоді як кольорові характеристики менш надійні, оскільки можуть змінюватися з віком або під впливом зовнішніх чинників. Основна задача при створенні системи ідентифікації — точне виділення цих ознак та побудова їх стійкого цифрового представлення, яке може бути використане для подальшого порівняння.

Біометрична система ідентифікації — це автоматизований комплекс, призначений для підтвердження особи на основі унікальних біологічних або поведінкових характеристик. Типова структура такої системи включає дві основні компоненти: модуль реєстрації та модуль ідентифікації. Під час етапу реєстрації сенсор фіксує біометричні дані користувача (наприклад, зображення райдужки), після чого спеціальний блок обробки формує з цих даних цифровий шаблон —

компактну та інформативну репрезентацію ознак. Цей шаблон зберігається у базі даних системи, яка може бути централізованою або розподіленою (наприклад, у вигляді збереження даних на смарт-картці користувача).

Під час ідентифікації система повторно зчитує біометричну інформацію користувача, формує з неї поточний шаблон та здійснює його порівняння з наявними записами у базі даних. Процес зіставлення відбувається у відповідному програмному модулі, який ухвалює рішення про успішність ідентифікації на основі ступеня збігу ознак. Загальний функціональний цикл роботи біометричної системи наведений на рис. 2.1.

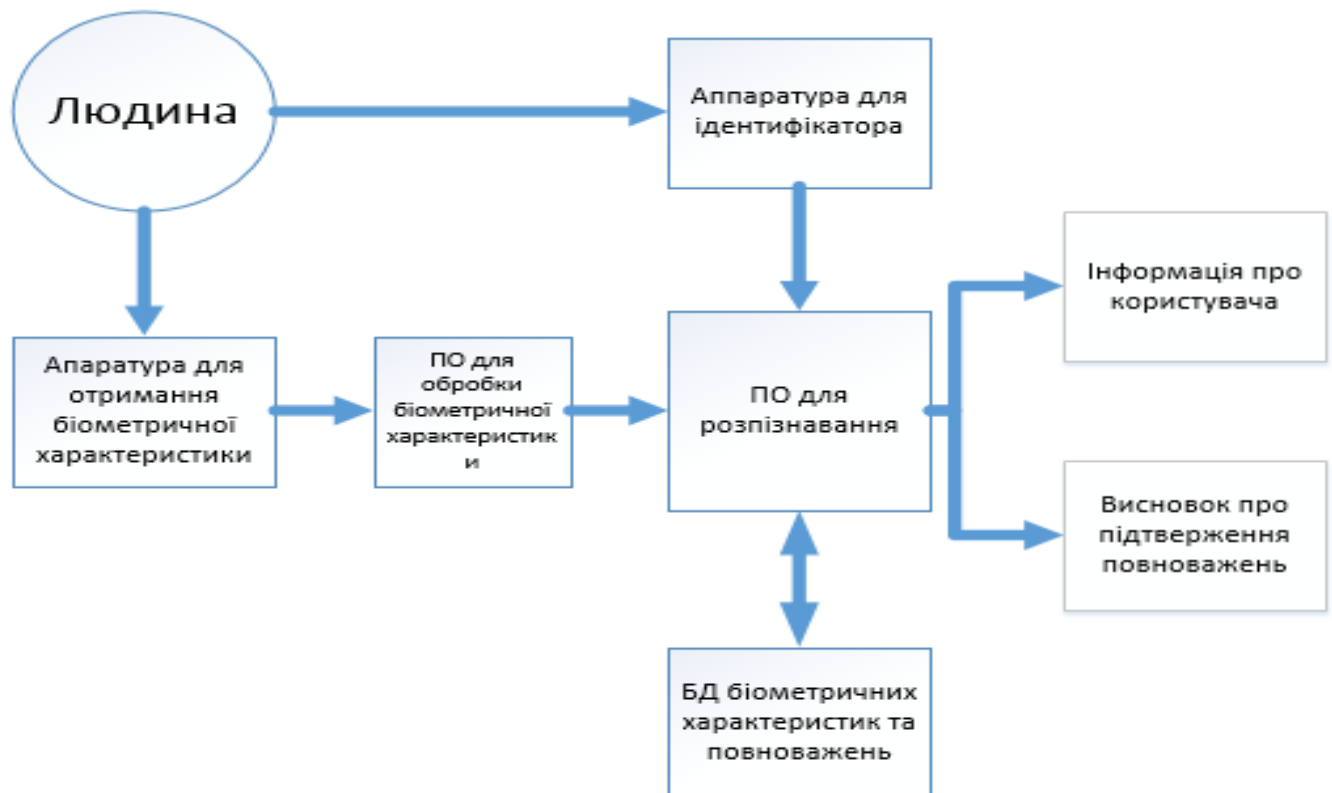


Рис. 2.1. Загальний функціональний цикл роботи біометричної системи ідентифікації

Алгоритм обробки зображення ока в біометричній системі ідентифікації особи за райдужною оболонкою включає послідовність ключових етапів, кожен із яких виконує специфічну функцію, необхідну для точного та надійного розпізнавання. Узагальнена блок-схема цього процесу наведена на рисунку 2.2.

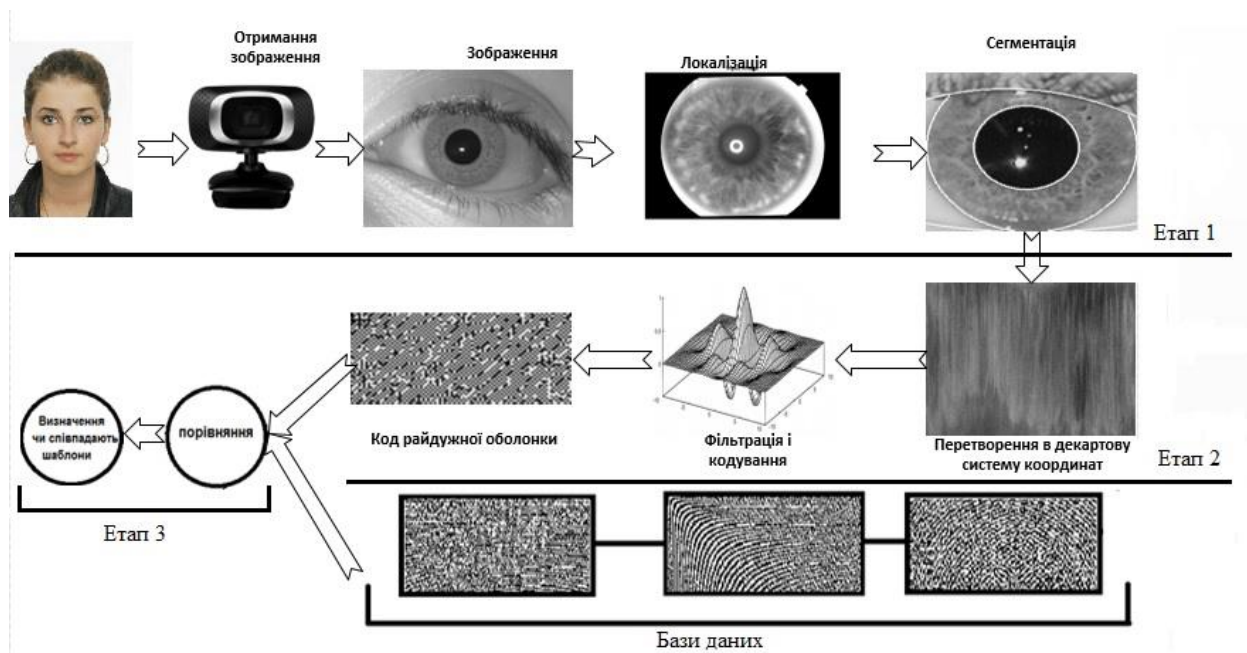


Рис. 2.2. Біометрична система заснована на РОО

Схема на рис. 2.2 демонструє повну послідовність процедур — від моменту захоплення зображення до фінального рішення про автентичність користувача, і є основою для побудови надійних систем біометричної ідентифікації на основі райдужної оболонки ока.

2.2. Формалізація вимог до зображення райдужної оболонки

Для забезпечення стабільної та швидкої ідентифікації за РОО, використовувані зображення мають відповідати ряду мінімальних технічних вимог [5–7]:

Просторова роздільна здатність системи повинна становити не менше 3,2 лінії/мм при контрасті 60%, а зображення — щонайменше 17 пікселів/мм. Це дозволяє уникнути артефактів через недостатню дискретизацію. Якість фокусування має забезпечувати зазначену чіткість. Оптимальний діаметр зіниці — до 7 мм, лімба — не менше 14 мм. Приклад зображення з належною якістю показано на рис. 2.3.

Динамічний діапазон зображення повинен становити щонайменше 256 градацій яскравості (8 біт), причому принаймні 7 біт мають бути захищені від впливу шуму. Відблиски не повинні перевищувати максимальне значення яскравості (255), а інші зони ока повинні залишатися в межах діапазону 0–255.



Рис. 2.3. Приклад зображення РОО належної якості

Зображення РОО має забезпечувати щонайменше 90 градацій яскравості між райдушкою та склерою, і не менше 50 — між райдушкою та зіницею для очей будь-якого кольору.

Щонайменше 70% площі райдужної оболонки має бути вільною від перекриття повіками, віями, відблесками чи іншими перешкодами.

Масштаб зображення слід підібрати так, щоб райдушка діаметром 14 мм займала 200–300 пікселів. Відстань від краю райдужки до межі зображення має становити щонайменше 70 пікселів (див. рис. 2.4).

Співвідношення сигнал/шум повинно перевищувати 40 дБ, з урахуванням шумів, зумовлених стисненням.

Зображення повинно бути у стандартній орієнтації: верхня повіка — зверху, слізний канал — праворуч для правого ока та ліворуч для лівого.

Для підвищення якості розпізнавання бажано дотримуватись таких умов: голова повинна бути вертикально (допустимий нахил — до 10°), око — максимально відкрите, окуляри та кольорові або жорсткі контактні лінзи — зняті.

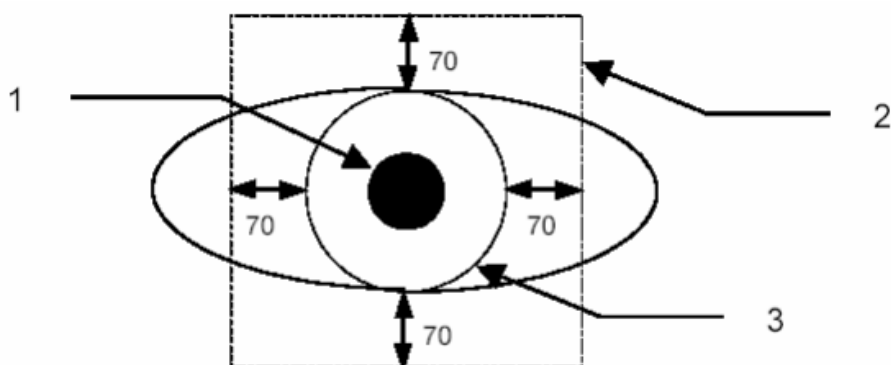


Рис. 2.4. Необхідний масштаб зображення

(1.Межа зіниці, 2. Межа зображення 3.Межа райдужки)

2.3. Отримання і обробка зображення райдужної оболонки ока

Для забезпечення достатньої деталізації райдужки з метою розпізнавання, система введення зображень повинна забезпечувати щонайменше 50 пікселів на радіус. Зазвичай використовуються ПЗС-камери з роздільною здатністю 640×480 пікселів, чутливі до ближнього інфрачервоного діапазону (700–900 нм). Часто застосовуються подвійні камери: одна — ширококутна для грубої локалізації ока, інша — вузькокутна для високоякісної зйомки райдужки.

Фокусування виконується в реальному часі, наприклад шляхом максимізації енергії високочастотної складової спектра. Зворотний зв'язок (дзеркало чи екран) допомагає користувачу правильно позиціонувати око. Незважаючи на це, зображення райдужки містить непотрібні області (зіницю, повіки), а також може змінюватися за розміром і освітленням при зміні положення. Тому важливими етапами є локалізація райдужки, її нормалізація і попередня обробка для зменшення впливу цих факторів, як буде описано у наступних розділах.

Крім того, для підвищення стійкості до змін умов зйомки (наприклад, варіацій освітлення, відстані до камери або повороту голови) сучасні системи все частіше застосовують алгоритми адаптивної обробки зображень. Це включає автоматичне коригування контрасту, фільтрацію шуму та геометричну нормалізацію райдужки. Застосування таких методів дозволяє зменшити похибки при подальшому виділенні ознак та забезпечує вищу точність ідентифікації незалежно від зовнішніх впливів.

Порівняння методів виділення контурів

Метод	Недоліки	Застосування
Робертса	Низька точність із-за використання маски 2x2. Розриви контурів зображення.	Чутливий до шуму
Собеля	Оснований на методі Робертса. Використовує маску 3x3. Розриви контурів. Використовуються попередньо визначені вагові коефіцієнти	Грубе наближення градієнта яскравості
Канні	Оснований на методі Робертса. Використовуються два порога. Використовує маску 3x3. Розрив контурів.	Для звуження меж виконують придушення немаксимальних точок уздовж градієнта.
Превіта	Передбачено 8 ядер, що відповідають різним напрямкам, що підвищує точність визначення меж.	Велика складність обчислень (в 8 разів більше, ніж при Собелі).
Градiєнтний інтегрально-деференціальний	Травалість обчислень. Використовує градієнт яскравості.	Широке застосування на практиці в СКУД, в біології та медицині
DoG	Збільшується чіткість країв і дрібних деталей на зображенні	Дуже неточно позначаються межі гострих кутів. Компоненти фільтра схильні реагувати на шум, а не тільки на край.

2.3.1. Інтегрально-диференціальний алгоритм локалізації райдужної оболонки з послідовним уточненням

Внутрішню та зовнішню межі РОО можна апроксимувати колами, які зазвичай не є концентричними. Один із методів локалізації [9,10] передбачає фільтрацію, виявлення перепадів яскравості та використання перетворення Хафа для переходу до декартової системи координат. Інший підхід [9–13] визначає межі райдужки шляхом максимізації градієнтів яскравості у напрямку, перпендикулярному до меж.

$$\max_{(r, x_0, y_0)} \left| G_\sigma(r) * \frac{\partial}{\partial r} \oint_{r, x_0, y_0} \frac{I(x, y)}{2\pi r} ds \right|, \quad (2.1)$$

Оператор виконує ітеративний пошук максимуму контурного інтеграла градієнта яскравості вздовж кола з радіусом r , центром (x_0, y_0) , використовуючи згортку з гаусовим фільтром $G_\sigma(r)$ для виявлення розмитих кругових перепадів яскравості.

Для обчислення виразу (2.1) на комп'ютері його слід представити в дискретному вигляді, використовуючи приріст радіуса та дискретні координати зображення. Градієнт при цьому апроксимується дискретною формулою:

$$\frac{\partial G_\sigma(r)}{\partial r} \approx G_\sigma^1(n) = \frac{1}{\Delta r} (G_\sigma(n\Delta r) - \frac{1}{\Delta r} G_\sigma((n-1)\Delta r)), \quad 2.2$$

де Δr мінімальний приріст радіуса, а $n = \frac{r}{\Delta r}$. Контурний інтеграл і згортка у формулі (2.1) замінюються на дискретну суму з кроком за кутом $\Delta\theta$. У результаті для дискретних значень остаточно вираз набуває такого вигляду:

$$\max_{(n\Delta r, x_0, y_0)} \left| \sum_k \left\{ \frac{(G_\sigma((n-k)\Delta r) - G_\sigma((n-k-1)\Delta r)) \sum_m I[(k\Delta r \cos(m\Delta\theta) + x_0), (k\Delta r \sin(m\Delta\theta) + y_0)]}{\Delta r \sum_m I[(k-2)\Delta r \cos(m\Delta\theta) + x_0], ((k-2)\Delta r \sin(m\Delta\theta) + y_0]} \right\} \right|. \quad 2.3$$

Також недоліком цього методу є те, що межа РОО може мати дуже велику помилку за рахунок того, що вираз 2.3 припиняє розрахунок при досягненні меж зображення ока, де межа РОО не співпадає з межами зображення ока Рис 2.5.

Для усунення цих недоліків необхідно розробити новий або удосконалити цей метод.

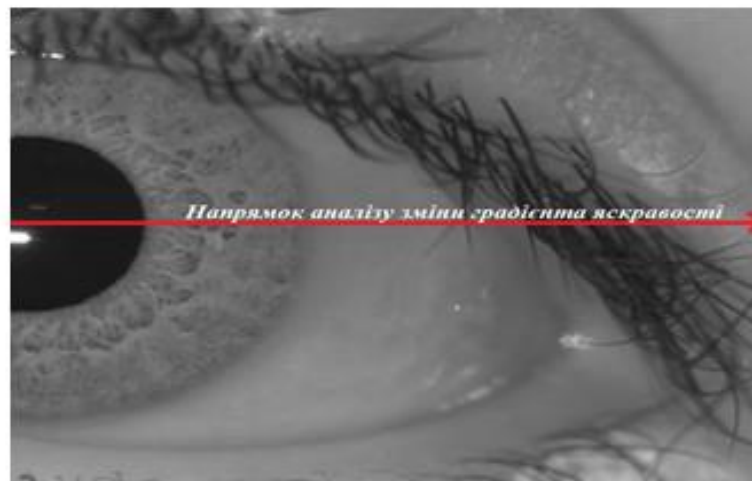
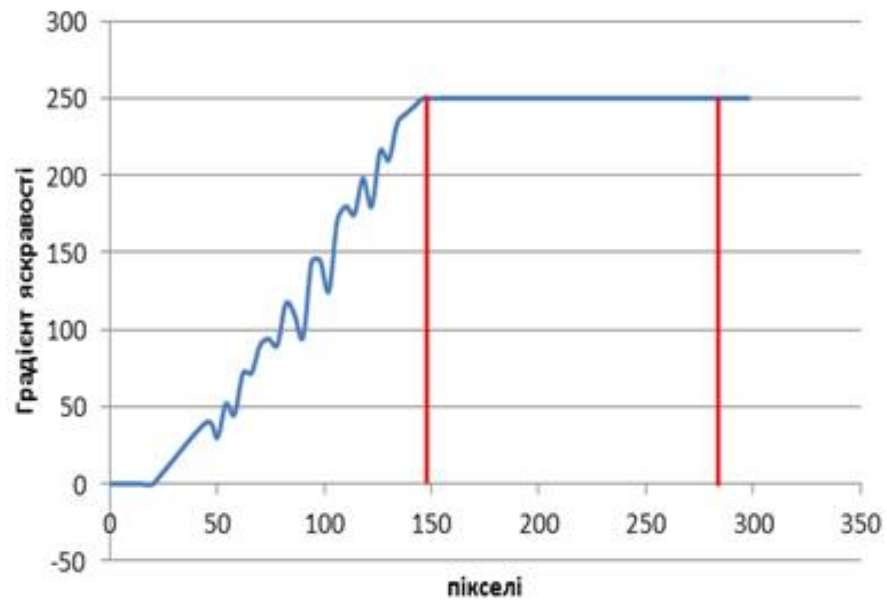


Рис 2.5. Інтегрально-диференціальний метод

Центр зіниці часто зміщений вниз і до носа відносно центру райдужки, а її радіус становить 0,1–0,8 від радіуса райдужки. Тому параметри зіниці визначаються окремо. Оператор (2.1) дозволяє виявити межі зіниці та зовнішню межу райдужки, однак через слабкий контраст зовнішньої межі (особливо в ІЧ-світлі), для її пошуку використовується інформація про межу зіниці. Після точного визначення меж райдужки аналогічний підхід застосовується для виділення меж із повіками. Метод ефективний, але потребує значних обчислювальних ресурсів.

2.3.2. Удосконалення методу локалізації РОО

Аналіз значної кількості зображень ока з бази даних CASIA показав, що перехід від райдужної оболонки до склери супроводжується різким перепадом яскравості пікселів. Такі зміни можна ефективно виявити, використовуючи першу або другу похідну функції яскравості, що дозволяє точно локалізувати межі переходу [13]. Зазвичай ці межі добре виявляються фільтрами високих частот. Проте, застосування ВЧ-фільтрації до всього зображення ока може викликати появу шумів у зоні райдужної оболонки, де також присутні різкі перепади яскравості.

Щоб уникнути цього, перед виявленням контурів райдужки та зіниці необхідно виконати згладжування зображення, тобто застосувати фільтрацію нижніх частот. Таким чином, для успішного розв'язання задач:

- виявлення меж райдужки та зіниці (ВЧ-фільтрація);
- згладжування по яскравості (НЧ-фільтрація),

потрібно використовувати фільтр з амплітудно-частотною характеристикою, зображеною на рис. 2.6. Проаналізувавши велику кількість зображень ока з БД Casia можна зробити висновок, що перехід від райдужної оболонки до склери є різка зміна яскравості пікселя і в якості міри такого перепаду можна взяти першу або другу похідну від функції зміни яскравості, яка однозначно буде характеризувати нам межі переходів [13], які виділяються фільтром високих частот, однак якщо застосувати фільтр ВЧ до всього зображення ока в області РОО з'явиться високочастотні шуми викликані фільтрацією зображення РОО, в яких також є різкі яскравісні перепади. Тому для виділення контурів РОО і зіниці на зображенні ока потрібно згладити по яскравості, тобто виділити тільки нижні частоти в зображенні.

З двох вище перерахованих задач:

- виділення меж РОО і зіниці , тобто ВЧ-фільтрація;
- згладжування по яскравості , тобто НЧ-фільтрація.

Впливають вимоги до фільтра, який зможе виділяти межі РОО і зіниці – це буде фільтр з АЧХ наведено на рис 2.6.

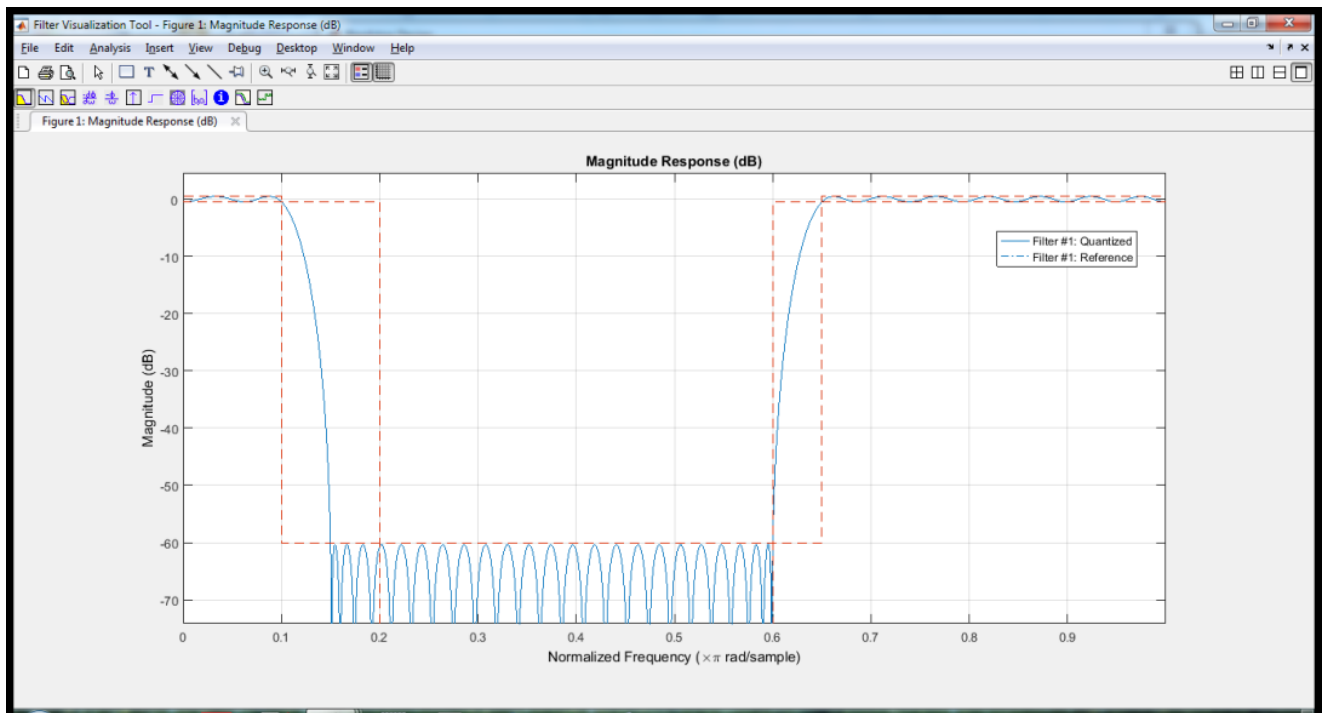


Рис 2.6. Амплітудно-частотна характеристика фільтра

АЧХ на рис 2.6 це характеристика загороджувального фільтра, де ширина полоси затримки буде характеризувати якість виділення меж РОО і зіниці.

Чим менша частота ω_1 тим більше буде згладжування, тобто яскравість пікселелів буде більш рівномірна, чим більша частота ω_2 - тим краще будуть виділятися межі РОО і зіниці, де $\omega_1 < \omega_2$.

Користуючись інструментом digital signal processing toolbox пакета matlab по заданій АЧХ отримаємо двомірну імпульсну характеристику (маска фільтра) загороджувального фільтра яка представлена на рис 2.7.

3	4	-1
4	4	-1
-1	-1	-1

Маска 3x3

1	-8	0	8	-1
-8	-8	0	8	-1
0	0	0	8	-1
8	8	8	8	-1
-1	-1	-1	-1	-1

Маска 5x5

Рис. 2.7 Маска режекторного фільтра

Результат фільтрації представлено на рис 2.8, на якому видні чіткі межі зіниці і РОО.

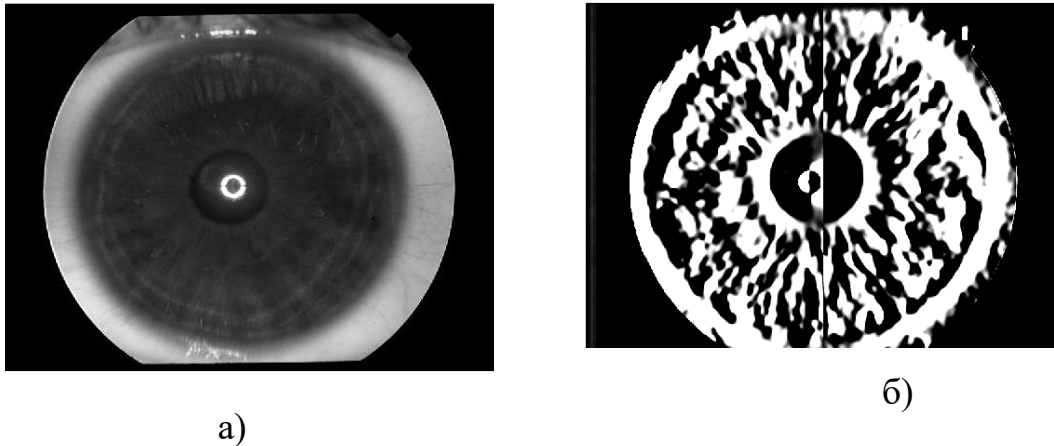


Рис 2.8 Результат фільтрації

а)вхідне зображення б)зображення після фільтрації

Розмір райдужки може варіюватися як між різними людьми, так і в однієї особи через умови зйомки. Щоб зменшити вплив цих деформацій на розпізнавання, зону райдужки перетворюють у прямокутник розміром 320×640 .

Метод реалізується через послідовне виконання відповідних процедур.

Процедура 1: Отримуємо зображення обличчя людини $I(x, y)$, де $x = [1, M]$, $y = [1, N]$ N і M розмірність вхідного зображення, зазначимо, що розмірність має бути кратною 2.

Процедура 2: Виділяємо зону розташування ока, згідно біометричних особливостей. $I'(x, y)$, де $x' = \left[1, \frac{M}{2}\right]$, $y' = \left[1, \text{fix} \frac{2N}{3}\right]$.

Процедура 3: Вираховуємо зміни яскравості $dI_{x''} = \begin{cases} I'_{x''} < rift; dI_{x''} = dI_{x''}; \\ I'_{x''} > rift; dI_{x''} + 1. \end{cases}$,

$$dI_{y''} = \begin{cases} I'_{y''} < rift; dI_{y''} = dI_{y''}; \\ I'_{y''} > rift; dI_{y''} + 1. \end{cases}$$

Процедура 4: Визначення області ока, використовуючи особливості зміни яскравості на зображенні $I'\{x', y'\} = \{\min(dI_{x''})\} \cap \{\min(dI_{y''})\}$.

Процедура 5: Сегментація зображення зіниці та РОО. В результаті отримуємо матрицю $I''(x, y) = I'(x, y) * H(x, y)$, $H(x, y)$ де двомірна імпульсна характеристика (маска) режекторного фільтра.

Процедура 6: Знаходження радіусів райдужної оболонки ока і зіниці за допомогою використання псевдокоду:

```

 $y'' = \frac{y''}{2} = const$ 
for ((n=1:x''))
    if min (I'''(y'',n))
         $r_p = r_p + 1$            %-радіус зіниці
    end
    if minmin (I'''(y'',n))
         $r_i = r_i + 1$          %-радіус райдужної оболонки ока
    end
end.

```

Процедура 7: Після локалізації райдужки її внутрішня й зовнішня межі формують кільцеву зону для аналізу. Перехід до полярних координат дозволяє подати цю зону як прямокутну область інтересу.

Результат роботи процедур наведено на рисунку 2.9.

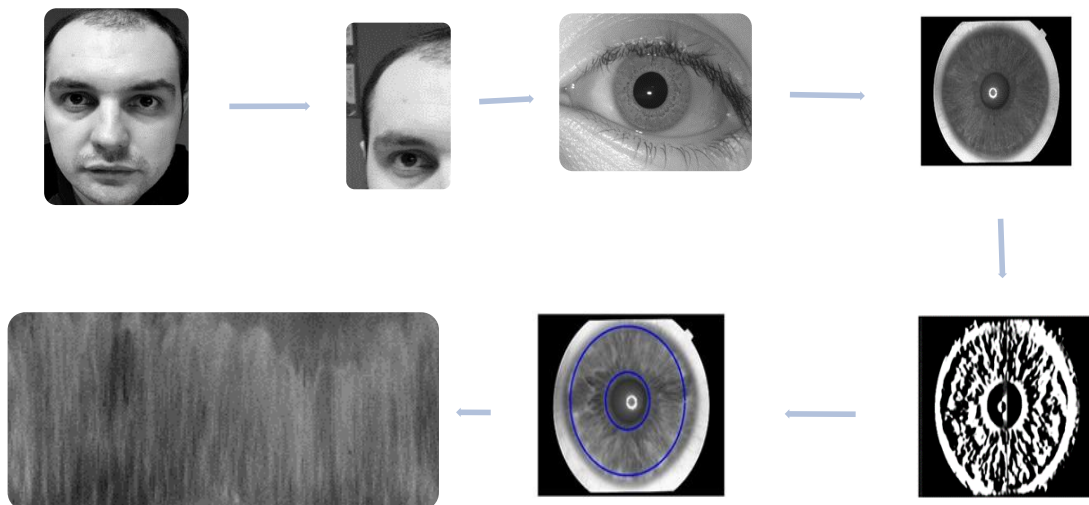


Рис 2.9 Візуалізація роботи процедур 1-7

Центри зіниці та райдужки можуть не збігатися: внутрішнє коло має центр $I(I_x, I_y)$ і радіус R_i , зовнішнє — центр, $O(O_x, O_y)$ і радіус R_o . Взаємозв'язок між цими параметрами розглянуто далі:

- 1) $I_x = O_x$;
 - 2) $I_x > O_x, I_y \geq O_y$;
 - 3) $I_x > O_x, I_y \leq O_y$;
 - 4) $I_x > O_x, I_y \leq O_y$;
 - 5) $I_x < O_x, I_y \leq O_y$.
- (2.2)

Розглянемо другий випадок (рис. 2.10):

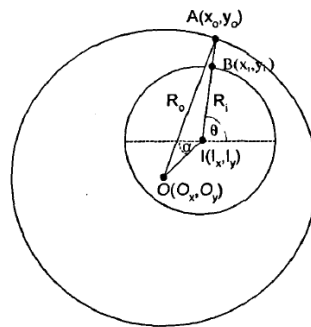


Рис. 2.10. Модель другого випадку зображення райдужки

Після локалізації РОО її межі задають кільцеву область, яку перетворюють у прямокутну через перехід до полярних координат [13,14].

Параметри $\theta(\theta \in [0; 2\pi])$ і $\rho(\rho \in [0; 1])$ описують полярну систему координат. Тоді, перетворення $I(x(\rho, \theta), y(\rho, \theta)) \rightarrow I(\rho, \theta)$ може бути виконано наступним чином:

$$\begin{cases} x(\rho, \theta) = (1 - \rho) * x_p(\theta) + \rho * x_i(\theta); \\ y(\rho, \theta) = (1 - \rho) * y_p(\theta) + \rho * y_i(\theta), \end{cases} \quad (2.3)$$

де

$$\begin{cases} x_p(\theta) = x_{p0}(\theta) + r_p * \cos(\theta); \\ y_p(\theta) = y_{p0}(\theta) + r_p * \sin(\theta), \end{cases} \quad (2.4)$$

$$\begin{cases} x_i(\theta) = x_{i0}(\theta) + r_i * \cos(\theta); \\ y_i(\theta) = y_{i0}(\theta) + r_i * \sin(\theta), \end{cases} \quad (2.5)$$

де r_p і r_i — відповідно радіус зіниці і РОО, $(x_p(\theta), y_p(\theta))$ і $(x_i(\theta), y_i(\theta))$ — координати внутрішньої і зовнішньої межі РОО в напрямку θ .

Це дозволяє компенсувати деформацію текстури РОО при зміні зіниці та усунути її неконцентричність відносно області дослідження (рис. 2.11).

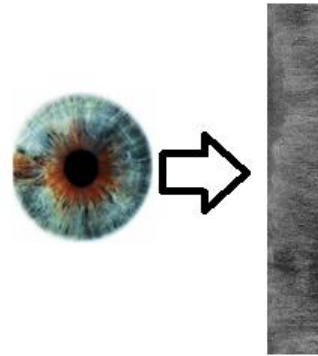


Рис. 2.11. Початкове локалізоване → нормалізоване зображення райдужної оболонки

Області поблизу меж райдужки із зіницею та склерою видаляються, щоб усунути завади, що спричинені частинами зображення, що не належать до самої райдужки. Помилки локалізації можуть виникати через те, що форма зіниці відхиляється від ідеального кола.

2.4. Текстурні ознаки райдужної оболонки ока

Структура людської райдужки є надзвичайно складною та насиченою численними мікроскопічними деталями. В її будові присутні колагенові волокна, складки, корони, крипти, ділянки з різною пігментацією, плями, западини та кільцеві утворення (див. рис. 2.12). Аналіз геометричних параметрів цих елементів і їх просторового розташування дає змогу отримати кількісні характеристики, які ефективно використовуються для ідентифікації, автентифікації та контролю особи [15].

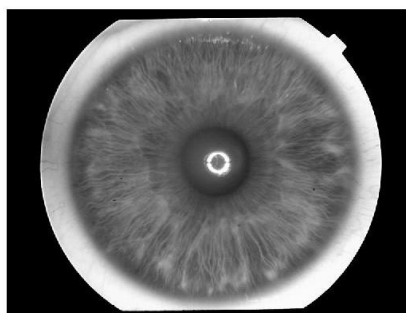


Рис. 2.12. Структура райдужки

Було виконано порівняння нормалізованих зображень райдужної оболонки X та F за допомогою кореляційного коефіцієнта:

$$r(X, Y) = \frac{\text{cov}(X, Y)}{D(X) \cdot D(Y)}, \quad (2.6)$$

де $D(X)$, $D(Y)$ – дисперсії зображень, $\text{cov}(X, F)$ – їх коваріація, яка відображає силу лінійної залежності між ними.

Результати експериментів представлені на рис. 2.13:

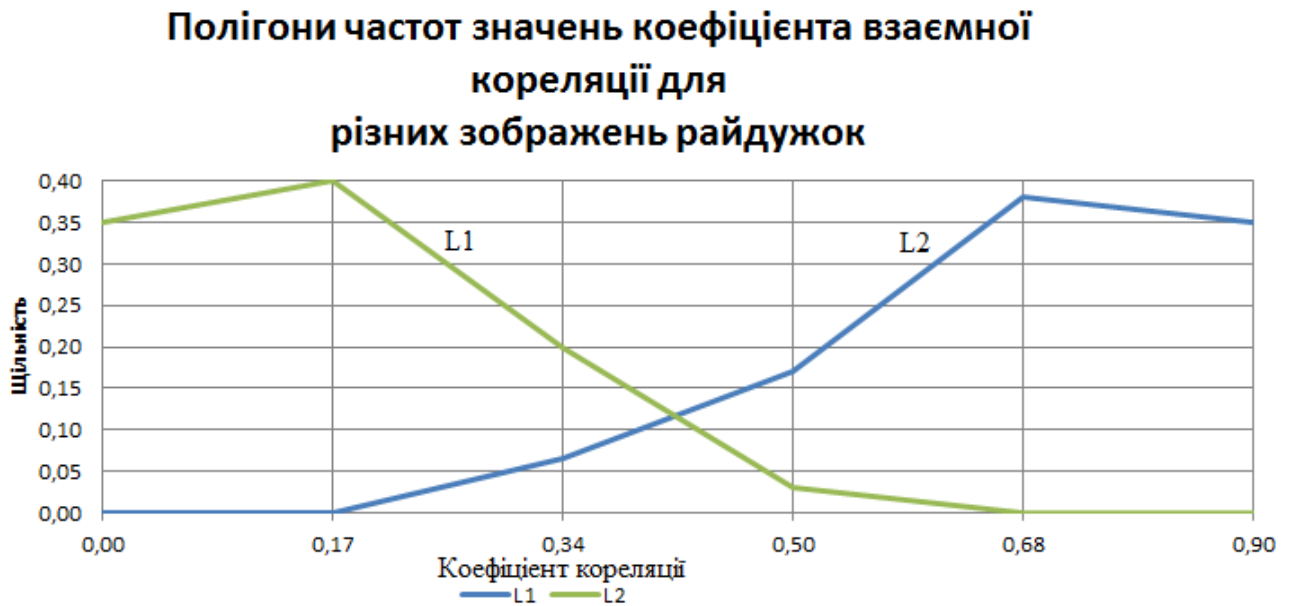


Рис. 2.13. Полігон розподілу значень коефіцієнта взаємної кореляції для різних зображень райдужної оболонки: $l1$ - те ж око, $l2$ - різні очі

Як показано на рис. 2.13, коефіцієнт взаємної кореляції має низьку роздільну здатність, тому подальший аналіз зосереджено на ефективніших методах, заснованих на виділенні текстурних ознак. До таких методів висуваються вимоги: стійкість до змін яскравості, контрасту, зсуву та висока роздільна здатність. Найчастіше застосовують фільтри Габора, 2D-косинусне перетворення та вейвлети Хаара. Порівняння методів наведено в табл. 2.2..

Такі методи дозволяють ефективно кодувати унікальні просторові структури райдужної оболонки, що є критично важливим для точного розпізнавання. У таблиці також враховано альтернативні підходи, здатні зменшити обчислювальну складність без втрати точності.

Порівняння фільтрів для виділення текстурних ознак

Метод	Недолік	Формування текстурних ознак
Габбора	складна реалізація. Результати в комплексному вигляді (дійсна і уявна частина)	За яскравістю
Двомірне косинусне перетворення	час обчислення пропорційно квадрату розмірності зображення. Обчислення в форматі з плаваючою комою	За яскравістю
Двомірні вайвлети Хаара	несиметричність і негладкість форми, тобто виникає нескінченне чергування "пелюсток".	За яскравістю або за значенням фази після фільтрації
Різниця Гаусіанів (DoG-фільтр)	Використовується як два гаусових фільтра	за значенням фази після фільтрації

2.5. Формування фазових текстурних ознак райдужки ока на основі фільтрів Габора

Запропонована система ознак базується на локальній фазовій інформації, що зберігає структурні характеристики зображення навіть при зміні контрасту. Як показано на рис. 2.14, при заміні амплітуд ДПФ випадковими значеннями (рис. 2.14б), структура зображення частково зберігається завдяки незмінній фазі (рис. 2.14а). Комбінація фази одного зображення з амплітудою іншого (рис. 2.14в) підтверджує домінуюче значення фази. Натомість випадкова заміна фази (рис. 2.14г) призводить до повної втрати структурної інформації. Локалізовані фазові ознаки визначаються через фільтри Габора, які дозволяють аналізувати просторові відношення між елементами текстури [1, 8, 15–17].



a)

Рис. 2.14. Вхідне зображення



б)



в)



г)

Рис. 2.14 Перетворення зображення:
(б- значення фаз відгуків прирівняні до нуля, в- значення амплітуд відгуків прирівняні до одиниці, г – значення фаз всіх відгуків замінені випадковими числами)

Розглянемо двовимірну нормалізовану функцію Габора:

$$\begin{aligned} \psi(x, y, \zeta_0, \nu_0, x_0, y_0, \rho, \theta, \sigma, \beta) = \\ = \frac{1}{\sqrt{\pi\sigma\beta}} e^{-\left[\frac{((x-x_0)\cos\theta+(y-y_0)\sin\theta)^2}{2\sigma^2} + \frac{(-(x-x_0)\sin\theta+(y-y_0)\cos\theta)^2}{2\beta^2} \right]} \cdot e^{i(\zeta_0(x-x_0)+\nu_0(y-y_0)+\rho)} \end{aligned} \quad (2.7)$$

Центр фільтра розташований $(x = x_0, y = y_0)$, і в точці $(\zeta = \zeta_0, \nu = \nu_0)$ просторових частот, σ і β – масштабні параметри еліптичних гауссіанів уздовж осей x і y , θ –

кут фільтра, ρ – фаза фільтра. Отже, узагальнена функція Габора характеризується шістьма незалежними параметрами: $\zeta_0, \nu_0, \theta, \rho, \sigma, \beta$.

Враховуючи, що подальший аналіз ґрунтується лише на потужності сигналу, фільтр Габора можна спростити: центр зміщують у точку $(x = x_0, y = y_0)$, фазу беруть як $\rho=0$. Перетворення Фур'є для такого фільтра набуває спрощеної форми:

$$\psi(\zeta, \nu, \zeta_0, \nu_0, \theta, \sigma, \beta) = \frac{1}{\sqrt{\pi\sigma\beta}} e^{-\frac{1}{2}[(\zeta-\zeta_0)\cos\theta+(\nu-\nu_0)\sin\theta]^2\sigma^2 + [-(\zeta-\zeta_0)\sin\theta+(\nu-\nu_0)\cos\theta]^2\beta^2} \quad (2.8)$$

де ζ, ν – просторові частоти по осях x і y .

Для зменшення кількості ступенів свободи фільтра параметри σ, β і θ пов'язують між собою, враховуючи фізіологічні особливості зору: частотні смуги ζ_0 і ν_0 рецепторів — від 0,5 до 2,5 октав, з межами близько 1,2–1,5 октави; співвідношення масштабів гаусіана — 1,5–2,0. Відповідно на σ і β накладемо обмеження $\frac{\beta}{\sigma} = 2$ враховуючи фізіологічні особливості людей. Частота модуляції орієнтована вздовж малої осі гауссіана, яка повертається разом зі зміною орієнтації хвилі. Центральна частота пов'язується з кутом обертання

$$\zeta_0 = \omega_0 \cos \theta, \nu_0 = \omega_0 \sin \theta, \quad (2.9)$$

де кругова частота $\omega_0 = \sqrt{\zeta_0^2 + \nu_0^2}$.

Враховуючи обмеження отримуємо:

$$\psi(x, y, \zeta_0, \nu_0, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{1}{8\sigma^2} \left[4\left(x\frac{\zeta_0}{|\omega_0|} + y\frac{\nu_0}{|\omega_0|}\right)^2 + \left(-x\frac{\nu_0}{|\omega_0|} + y\frac{\zeta_0}{|\omega_0|}\right)^2 \right]} \cdot e^{i(\zeta_0 x + \nu_0 y)}, \quad (2.10)$$

Орієнтація фільтра співпадає з головною віссю еліптичної гаусової функції. Частотна смуга на рівні амплітуди 0,5 зазвичай встановлюється в діапазоні від 1 до 1,5 октав уздовж цієї орієнтації. Співвідношення між σ і ω_0 задається наступним виразом:

$$\sigma = \frac{k}{\omega_0}, \quad (2.11)$$

де $k = \sqrt{2 \ln 2} \left(\frac{2^\phi + 1}{2^\phi - 1} \right)$, – ширина смуги частот в октавах. Для октави $\phi = 1$, $\sigma \approx \frac{\pi}{\omega_0}$, для октави $\phi = 1,5$, $\sigma \approx 2,5/\omega_0$.

У результаті накладених обмежень утворюється самоподібне сімейство фільтрів Габора, яке залежить від чотирьох параметрів:

$$\psi(x, y, \omega_0, \theta) = \frac{\omega_0}{\sqrt{2\pi k}} e^{-\frac{\omega_0^2}{8k^2}(4(x\cos\theta + y\sin\theta)^2 + (-x\sin\theta + y\cos\theta)^2)} \cdot e^{i(\omega_0 x \cos\theta + \omega_0 y \sin\theta)}, \quad (2.12)$$

де $\theta = \arctan \frac{\nu_0}{\zeta_0}$, і k стало для вейвлетів Габора з такою ж смугою частот. Отримане сімейство можна перемістити в довільну точку зображення (x_0, y_0) .

Щоб фільтр не реагував на зміни освітлення, його інтеграл має дорівнювати нулю. Синусна частина комплексного фільтра Габора вже має нульове середнє, а косинусна — ні. Відгук на постійний сигнал можна оцінити через Фур'є-перетворення при $\zeta = 0$ і $\nu = 0$,

$$\hat{\psi}(\zeta = 0, \nu = 0; \zeta_0, \nu_0) = \sqrt{8\pi\sigma} e^{-\frac{k^2}{2}}. \quad (2.13)$$

Сімейство допустимих 2D-вейвлетів Габора формується шляхом усунення постійної складової з базового фільтра:

$$\psi(x, y, \omega_0, \theta) = \frac{\omega_0}{\sqrt{2\pi k}} \left[e^{-\frac{\omega_0^2}{8k^2}(4(x\cos\theta + y\sin\theta)^2 + (-x\sin\theta + y\cos\theta)^2)} \right] \cdot \left[e^{i(\omega_0 x \cos\theta + \omega_0 y \sin\theta)} - e^{-\frac{k^2}{2}} \right], \quad (2.14)$$

з результатом перетворення Фур'є:

$$\psi(x, y, \omega_0, \theta) = \frac{\sqrt{8\pi k}}{\omega_0} \left[e^{-\frac{k^2}{2\omega_0^2} [((\zeta - \zeta_0) \cos\theta + (\nu - \nu_0) \sin\theta)^2 + 4(-(\zeta - \zeta_0) \sin\theta + (\nu - \nu_0) \cos\theta)^2]} \right] \times \left[e^{-\frac{k^2}{2\omega_0^2} [(\zeta \cos\theta + \nu \sin\theta)^2 + 4(-\zeta \sin\theta + \nu \cos\theta)^2 + \omega_0^2]} \right], \quad (2.15)$$

де $\zeta\zeta_0 + \nu\nu_0 = 0$ визначає лінію нулів ($\hat{\psi}(\zeta, \nu, \zeta_0, \nu_0) = 0$) на частотній площині.

Сімейства вейвлетів Габора формуються масштабуванням і обертанням базового вейвлета:

$$\psi(x, y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{8}(4x^2 + y^2)} \cdot \left[e^{ikx} - e^{-\frac{k^2}{2}} \right], \quad (2.16)$$

результат перетворення Фур'є, якого:

$$\hat{\psi}(\zeta, \nu) = \sqrt{8\pi} \left\{ e^{-\frac{1}{2}[(\zeta-k)^2+4\nu^2]} - e^{-\frac{1}{2}[\zeta^2+4\nu^2+k^2]} \right\}, \quad (2.17)$$

Повна формула для комплексного вейвлета Габора має такий загальний вигляд: вона поєднує гармонійну функцію з гаусовою амплітудною обвідною, що забезпечує локалізацію як у просторі, так і в частоті:

$$\psi(x, y, \omega_0, \theta) = \frac{\omega_0}{\sqrt{2\pi k}} \left[e^{-\frac{\omega_0^2}{8k^2}(4(x\cos\theta+y\sin\theta)^2+(-x\sin\theta+y\cos\theta)^2)} \right] \left[e^{i(\omega_0 x \cos\theta + \omega_0 y \sin\theta)} - e^{-\frac{k^2}{2}} \right], \quad (2.18)$$

де ω_0 – частота, θ – орієнтація, k – константа ($k \approx \pi$ для полоси частот в одну октаву і $k \approx 2,5$ для полоси частот в 1,5 октави). На рисунку 2.13 наведено графічне зображення одномірного та двовимірного фільтра Габора.

Фільтри Габора забезпечують хорошу локалізацію ознак зображення як у просторі, так і в частоті [16]. Це робить їх ефективними для аналізу текстури райдужної оболонки. На рис. 2.15 та в табл. 2.3, 2.4 наведено приклади фільтрів і їх характеристики. Застосування фільтрів з різними частотами й орієнтаціями дозволяє представити зображення у вигляді локальних фазових відгуків.

Текстурні ознаки формуються шляхом [17,27]:

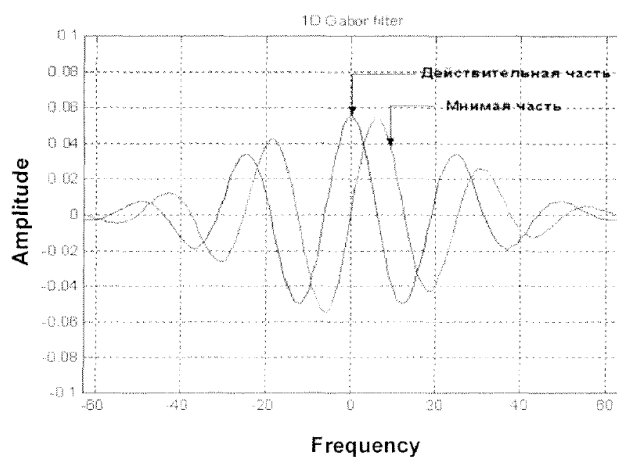
- Згортки зображення з базисними вейвлетами на всіх заданих частотах і орієнтаціях, що дає комплексні відгуки:

$$\blacksquare R(x, y) = I(x, y) * \psi(x, y, \omega_0, \theta). \quad (2.19)$$

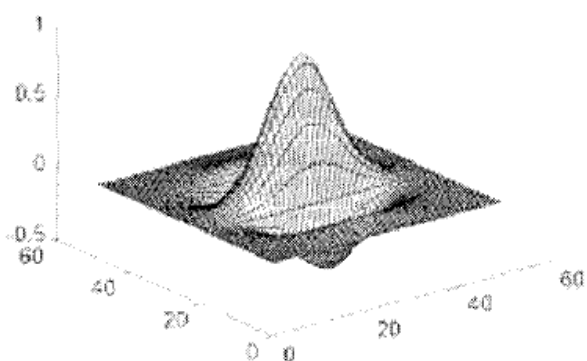
- Амплітуду всіх відгуків зводять до 1, зберігаючи лише фазову складову.:

$$\blacksquare R(x, y) = \frac{R(x, y)}{|R(x, y)|}. \quad (2.20)$$

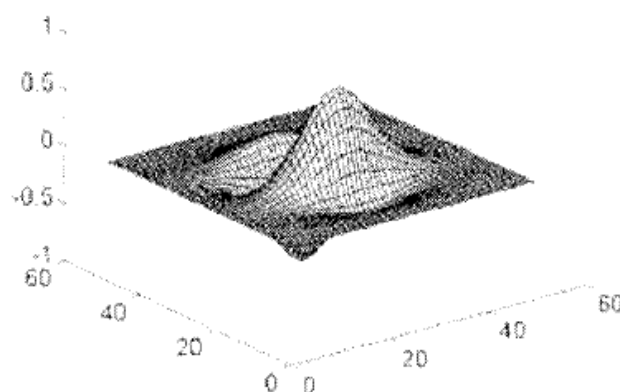
- Фазові значення відгуків усіх пікселів квантуються на чотири рівні з фіксованим кроком $\pi/2$.
- Для кожної ділянки зображення фаза кодується номером квадранта на комплексній площині; операцію повторюють для всіх масштабів фільтрації..



a)



б)



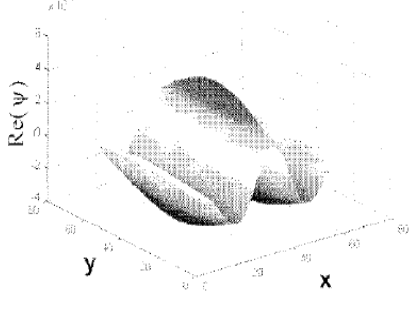
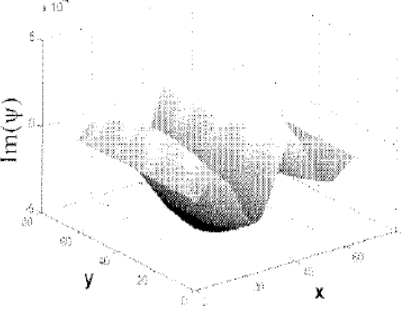
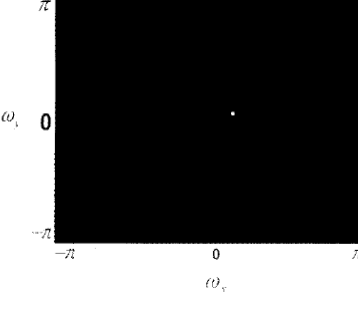
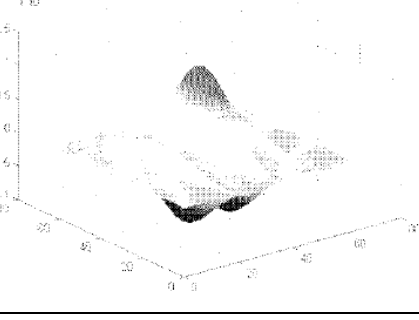
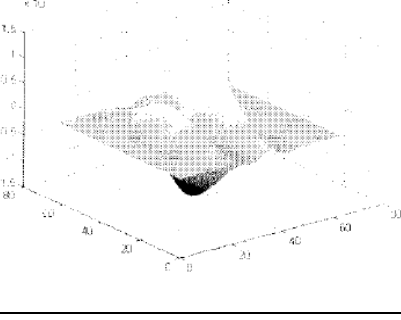
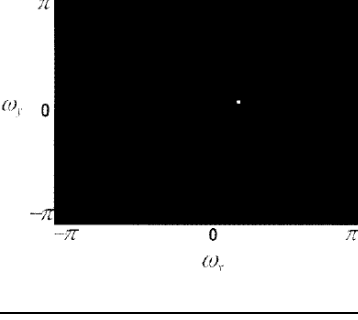
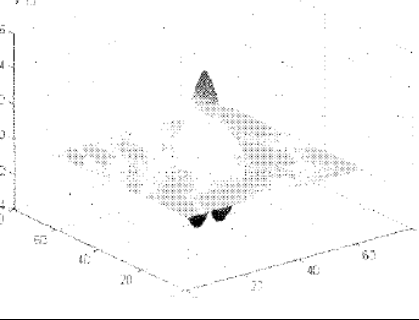
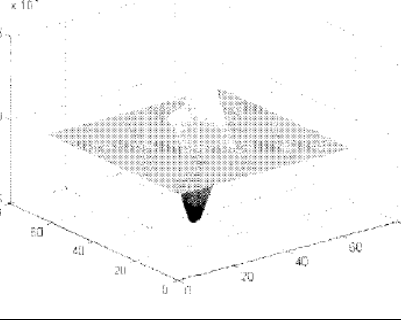
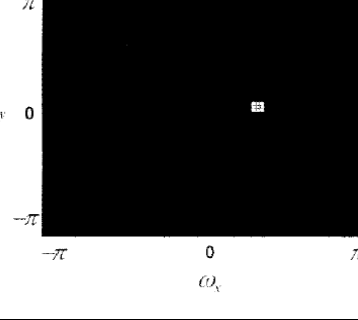
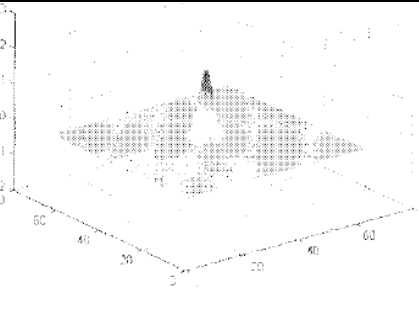
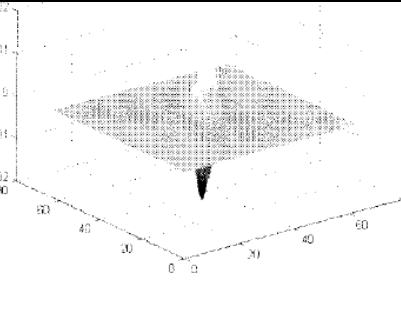
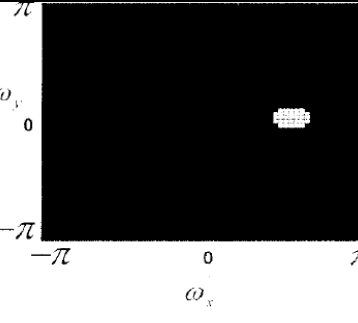
в)

Рис. 2.15. Одновимірний фільтр Габора, дійсна частина, уявна частина (а), дійсна частина двовимірного фільтра Габора (б), уявна частина двовимірного фільтра Габора (в)

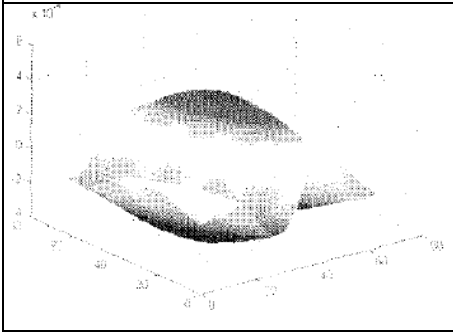
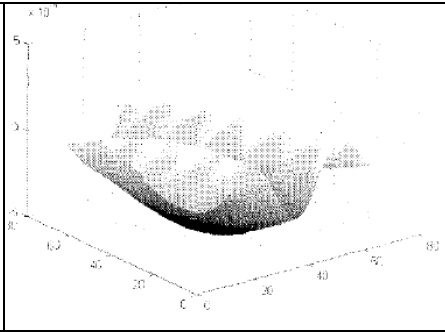
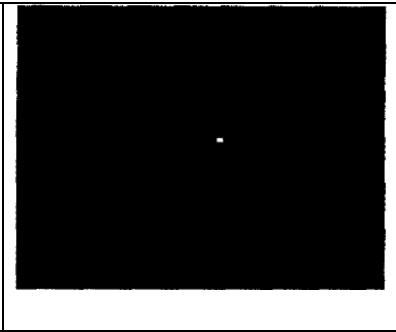
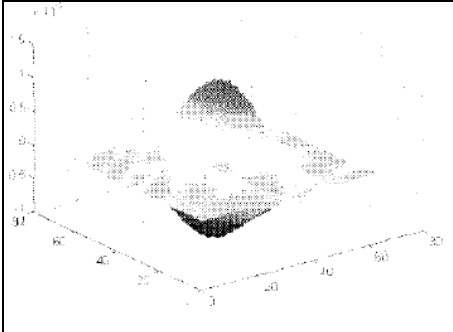
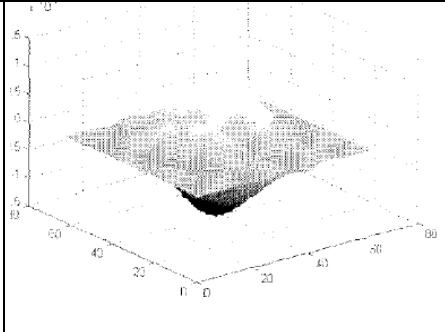

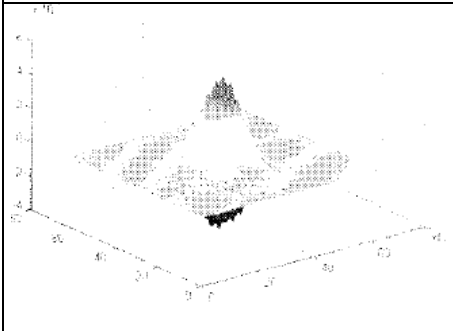
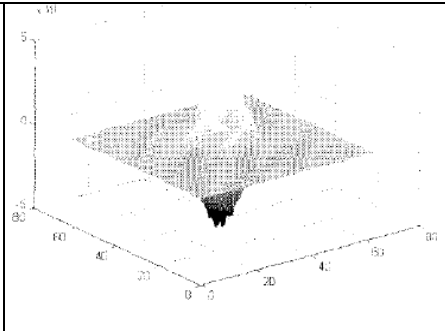
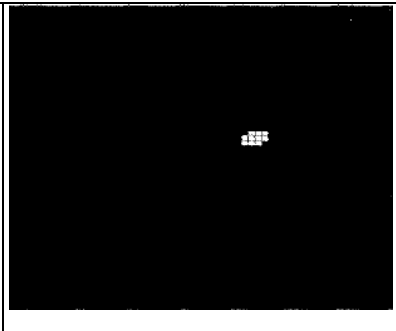
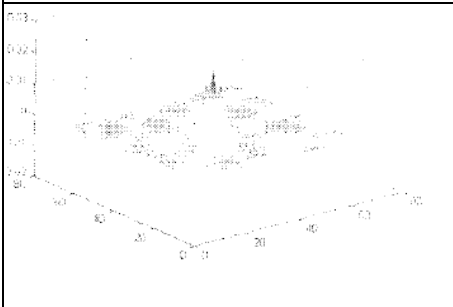
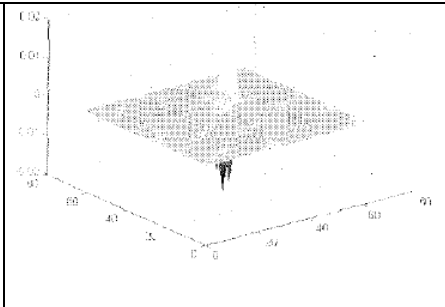
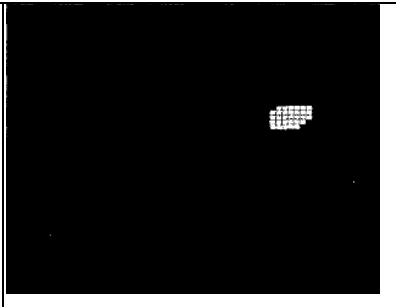
Для кращої ілюстрації представимо графіки двовимірних фільтрів Габора при різних значеннях параметра θ . Слід зазначити, що двовимірний вейвлет Габора має вигляд плоскої гармонічної хвилі, амплітуда якої згасає відповідно до гаусового розподілу. Така структура дозволяє фільтру ефективно виділяти локалізовані просторові частоти в зображенні.

Завдяки гнучкому налаштуванню параметрів частоти, орієнтації та масштабу, фільтри Габора дозволяють адаптуватися до різноманітних текстур і структур зображення. Це робить їх особливо придатними для задач біометричної ідентифікації, зокрема аналізу райдужної оболонки ока.

Графіки двовимірних фільтрів Габора при $\theta = 0$

дійсна частина	комплексна частина	смуга пропускання за рівнем 0,5
$\omega_0 = \pi/16$		
		
$\omega_0 = \pi/8$		
		
$\omega_0 = \pi/4$		
		
$\omega_0 = \pi/2$		
		

Графіки фільтрів Габора при $\theta = \pi/8$

дійсна частина	комплексна частина	смуга пропускання за рівнем 0,5
$\omega_0 = \pi/16$		
		
$\omega_0 = \pi/8$		
		
$\omega_0 = \pi/4$		
		
$\omega_0 = \pi/2$		
		

На рис. 2.16 представлені фази відгуків фільтрів Габора з різними частотами з параметром $\theta = 0$.

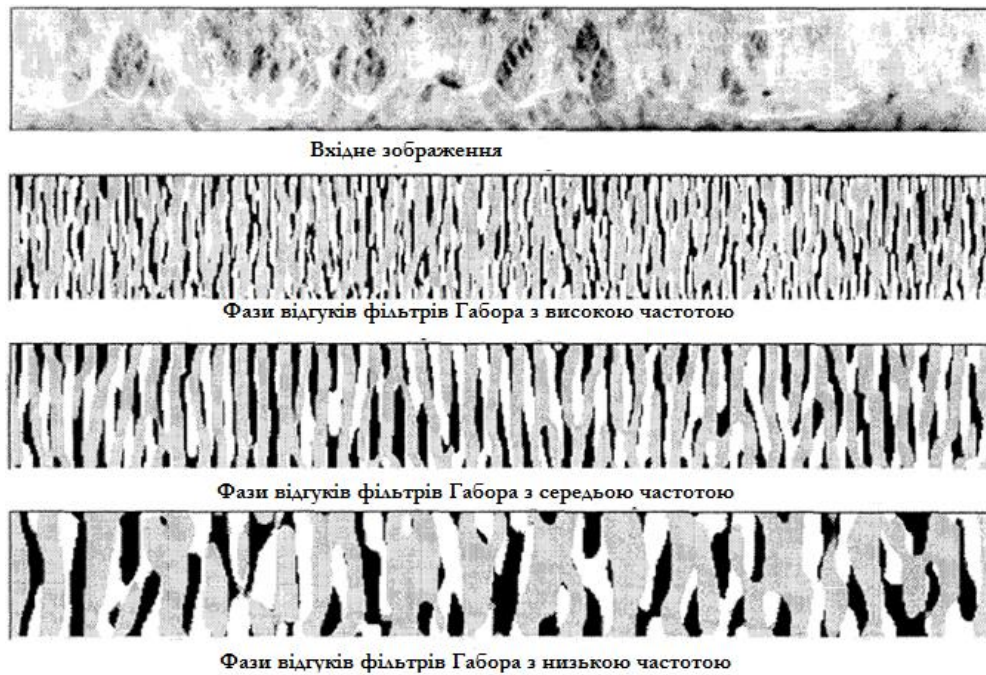


Рис. 2.16. Фази відгуків фільтрів Габора з різними частотами з параметром $\theta = 0$

На рис. 2.17 в наведено зображення РОО, відновлене з фаз вейвлетів з відповідними параметрами

$$\theta = 0, \pi/6, \pi/3, \pi/2, 2\pi/3, 4\pi/6 \text{ і } \omega_0 = \pi/8, \pi/4, \pi/2.$$

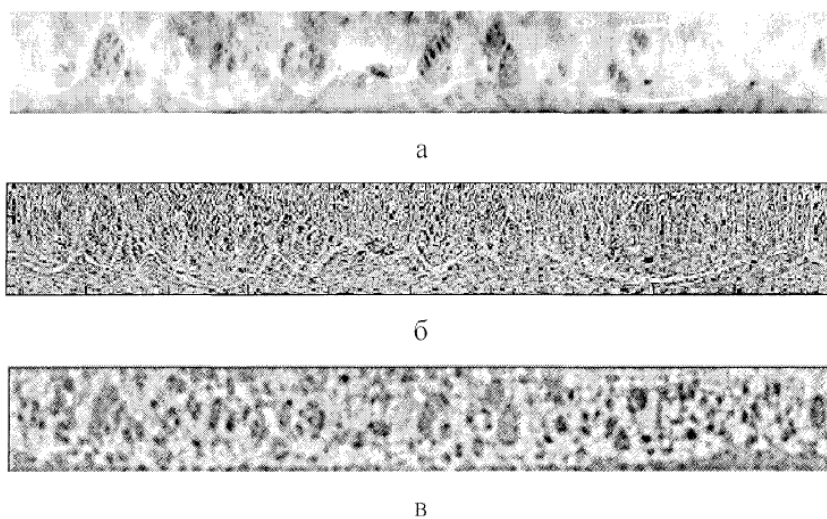


Рис.2.17. Нормалізоване зображення райдужної оболонки (а); результат видалення з спектра зображення амплітудної інформації (б); результат

відновлення зображення райдужної оболонки з уявлення у вигляді фаз вейвлетів
Габора (в)

Відновлення райдужної оболонки виконувалося шляхом підсумовування вейвлетів усіх вибраних частот і напрямків у фазах, визначених на етапі розкладу зображення.

Процес локального квантування фази формалізується через умовні інтегральні вирази, в яких кожен біт коду h має «дійсну» h_{Re} і «комплексну» h_{Im} частину, $h = h_{\text{Re}} + ih_{\text{Im}}$:

$$h_{(\text{Re}, \text{Im})}(i, j) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } \text{Re}, \text{Im} [\psi(i, j)] \geq 0, \\ 0, & \text{якщо } \text{Re}, \text{Im} [\psi(i, j)] < 0, \end{cases} \quad (2.21)$$

де $\psi(x, y) = I(x, y) * \psi(x, y, \omega_0, \theta)$ є згортка фільтра Габора ψ з зображенням I , (i, j) – позиція в якій визначається пара бітів коду.

Процес демодуляції фазового зображення РОО представлений на рис. 2.18 [18]. Далі етап локальної ділянки РОО, що обробляється з використанням перетворення (2.17), в результаті якого формуються комплексні коефіцієнти. Їх дійсна та уявна частини відображаються як координати точок на комплексній площині, а фазовий кут використовується для подальшого кодування.

Кожен фазовий кут поділяється на чотири квадранти, що дозволяє закодувати два біти інформації на точку. Для отримання повного коду райдужної оболонки цей процес виконується для різних масштабів, частот і орієнтацій вейвлетів. Такий підхід забезпечує детальне і стійке кодування текстурної структури райдужки, незалежно від змін умов зйомки чи положення ока.

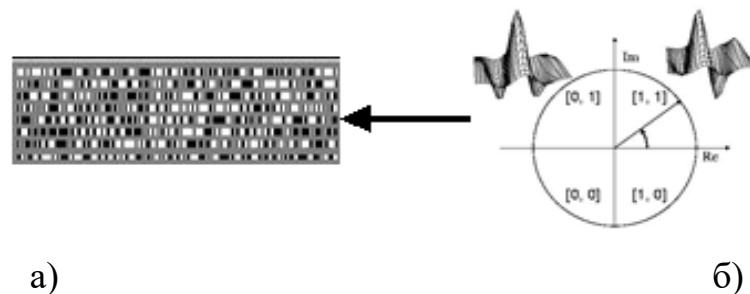


Рис. 2.18. Процес демодуляції фази зображення райдужної оболонки (б), визначення коду райдужки за допомогою вейвлетів Габора (а)

Такий формат подання райдужки дозволяє нейтралізувати вплив нерівномірного освітлення та зберігає важливі локальні текстурні характеристики. Грубе фазове квантування зменшує чутливість до обертання зображення. Оскільки параметри вейвлетів Габора у відкритих джерелах не визначені, у роботі запропоновано метод їх оптимізації на основі статистичного аналізу.

2.6. Метод формування фазових текстурних ознак райдужної оболонки ока на базі DoG-фільтра

Фільтри Габора, попри високу інформативність, характеризуються низькою обчислювальною ефективністю. Альтернативою є фільтр різниці гаусових функцій (DoG — Difference of Gaussians) [26–29], який має значно кращі обчислювальні властивості та допускає реалізацію через рекурсивні алгоритми. У межах цієї роботи запропоновано використання DoG-фільтра як основи для побудови системи ознак райдужної оболонки. Аналітичний вираз фільтра має вигляд:

$$DoG(x, y) = g(x, y, \sigma) - g(x, y, 1.6\sigma), \quad (2.22)$$

$$\text{де } g(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(\frac{-(x^2 + y^2)}{2\sigma^2}\right). \quad (2.23)$$

Фільтр DoG також є смуговим, проте його ключова перевага — можливість використання ефективних рекурсивних методів для обчислення відгуку. Зокрема, згортку з гаусовим фільтром із параметром σ , що лежить в основі DoG-фільтрації, можна реалізувати за допомогою рекурсивного алгоритму, що істотно зменшує обчислювальні витрати порівняно з фільтром Габора [30]:

$$q = \begin{cases} 0,98711 \sigma - 0,96330, & \text{якщо } \sigma \geq 2,5; \\ 3,97156 - 4,14554 \sqrt{1 - 0,26891}, & \text{якщо } 0,5 \leq \sigma \leq 2,5; \end{cases} \quad (2.24)$$

$$b_0 = 1,57825 + 2,44413 q + 1,4281 q^2 + 0,422205 q^3;$$

$$b_0 = 1,57825 + 2,44413 q + 1,4281 q^2 + 0,422205 q^3;$$

$$b_1 = 2,44413 q + 2,8561 q^2 + 1,26661 q^3;$$

$$b_2 = -1,428 q^2 - 1,26661 q^3;$$

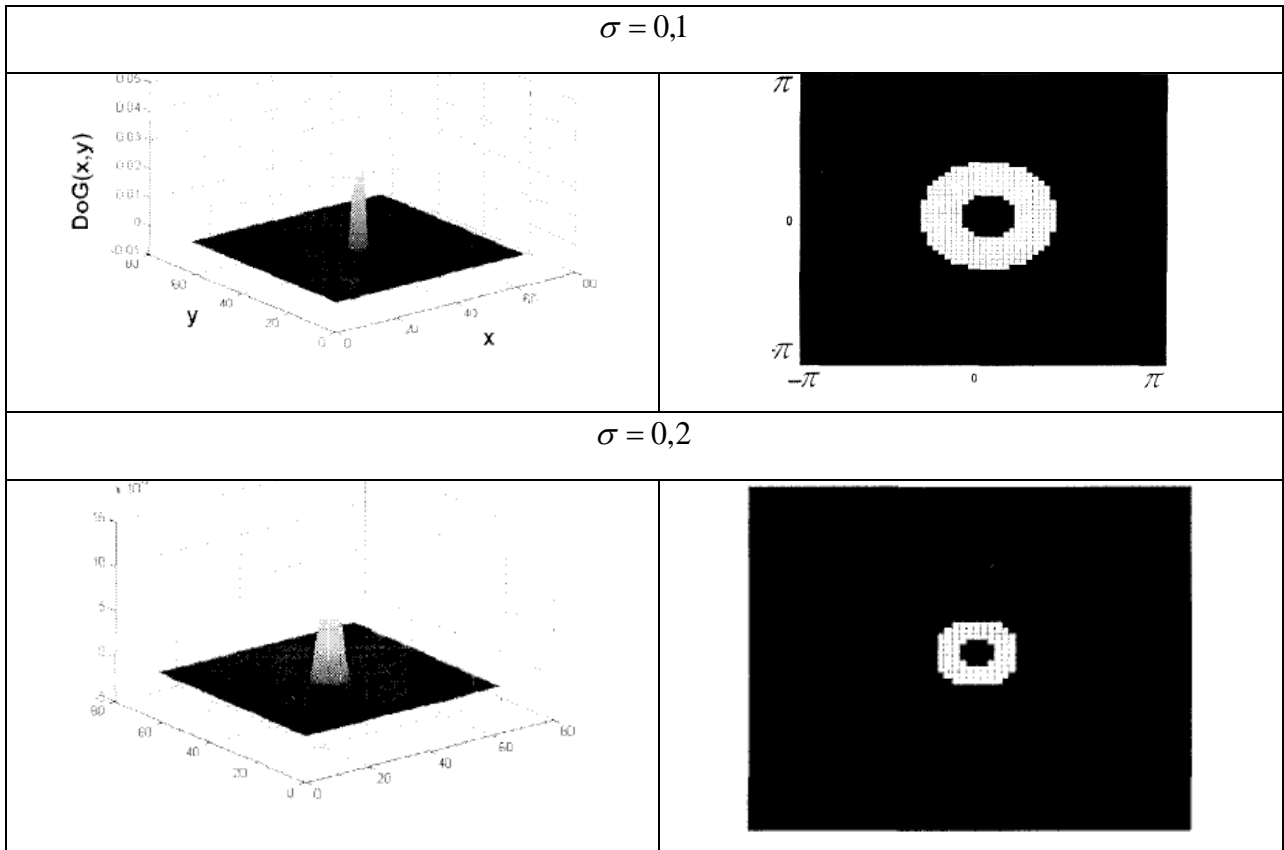
$$b_3 = 0,422205 q^3;$$

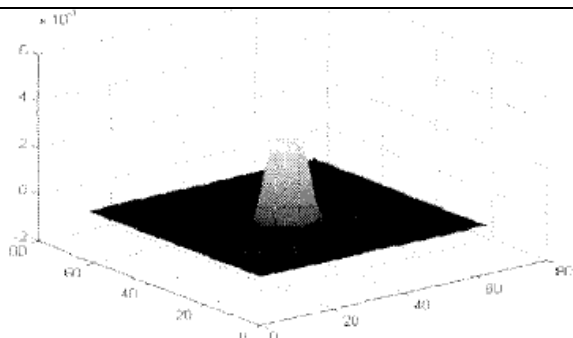
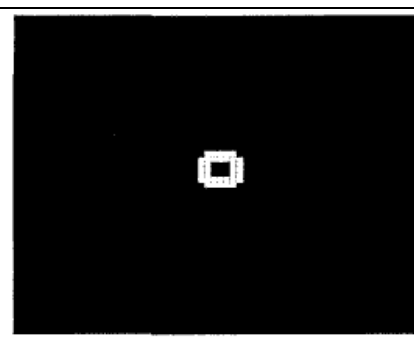
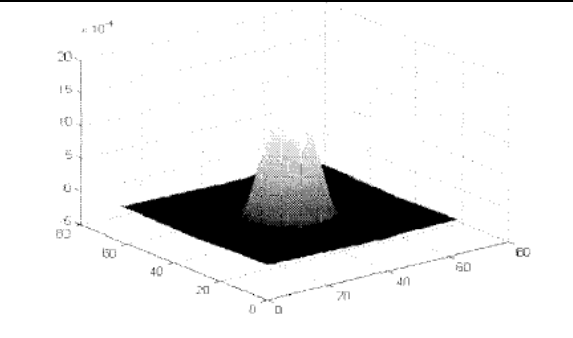
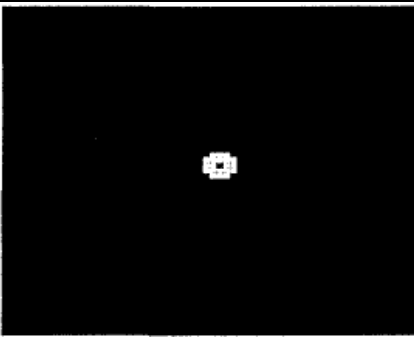
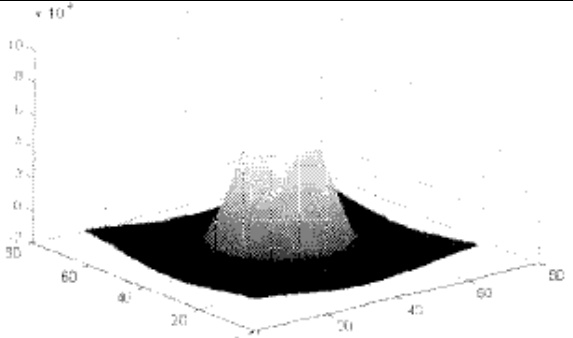
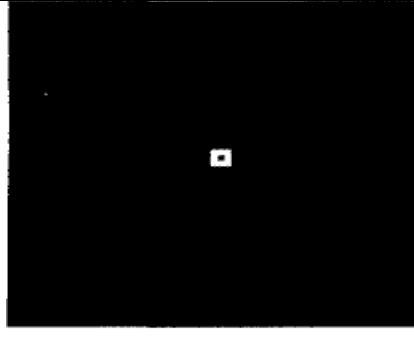

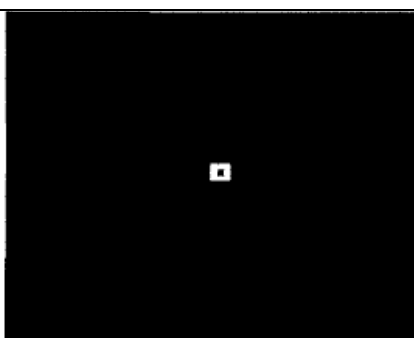
$$B = 1 - \frac{b_1 + b_2 + b_3}{b_0}; \quad (2.25)$$

Проведені статистичні дослідження дали змогу визначити оптимальні параметри DoG-фільтрів. Для ілюстрації наведено графіки фільтрів з пропускнуою смугою на рівні 0,5 для різних значень параметра σ .

Таблиця 2.5

Графіки DoG-фільтрів і смуга пропускання по рівню 0,5 при різних значеннях σ (ширина фільтра в пікселях)



$\sigma = 0,3$	
	
$\sigma = 0,5$	
	
$\sigma = 0,7$	
	
$\sigma = 0,9$	
	

Однією з характерних властивостей DoG-фільтра є зміна знаку його відгуку в зонах різкого перепаду яскравості. Це лежить в основі роботи контурного детектора [40]. В однорідних ділянках зображення значення відгуку близьке до нуля, однак подібні зони рідко трапляються на зображеннях РОО. Структурна інформація досліджуваної області може бути закодована за допомогою знаків відгуків DoG-фільтра, які фіксуються у вузлах ортогональної сітки, як показано на рис. 2.19.:

$$Ir(x, y) = \begin{cases} 1, & D(x, y) \geq 0 \\ 0, & D(x, y) < 0 \end{cases} \quad (2.27)$$

де $D(x, y) = I(x, y) * DoG(x, y, \sigma)$, (x, y) – позиція, що використовується для встановлення значення біта коду райдужної оболонки.

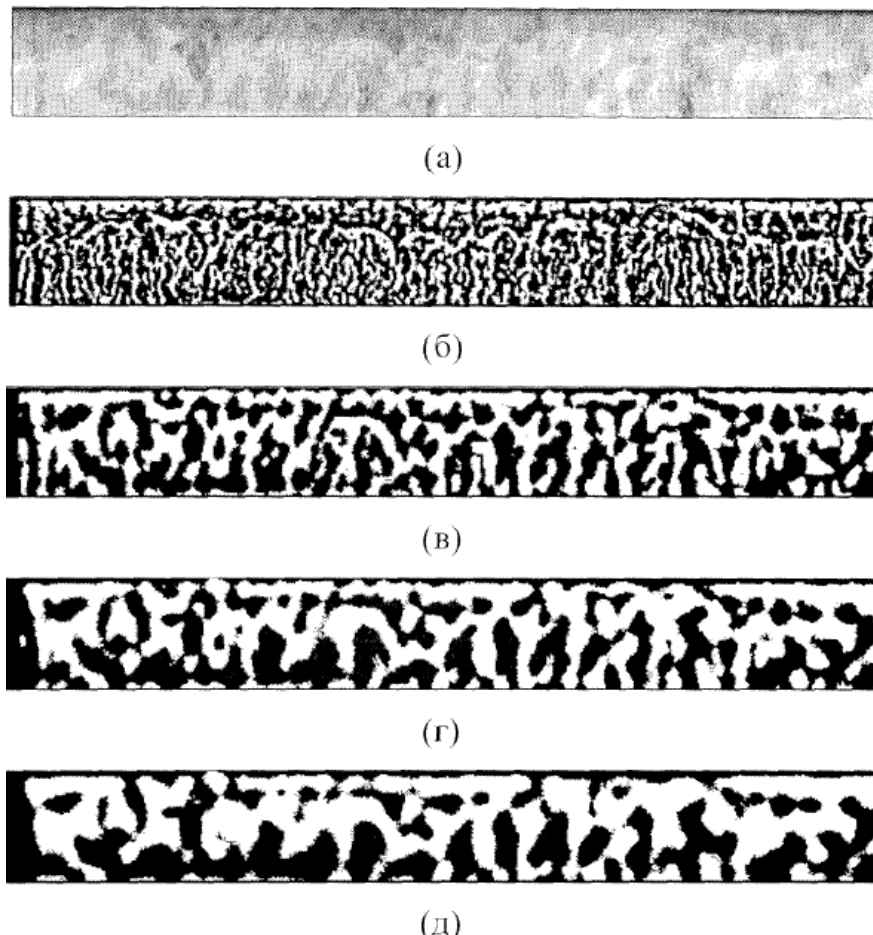


Рис. 2.19. Знаки відгуку DoG-фільтра: нормалізоване зображення райдужної оболонки (а), відгук DoG-фільтра при $\sigma = 0,2$ (б), відгук DoG -фільтра при $\sigma = 0,5$ (в), відгук DoG -фільтра при $\sigma = 0,7$ (г), відгук DoG -фільтра при $\sigma = 0,9$ (д)

Провівши кодування понад 200 зображень РОО зафіксовано, що гістограма розподілу матриці Iris-коду РОО не рівномірна (рис 2.20.)

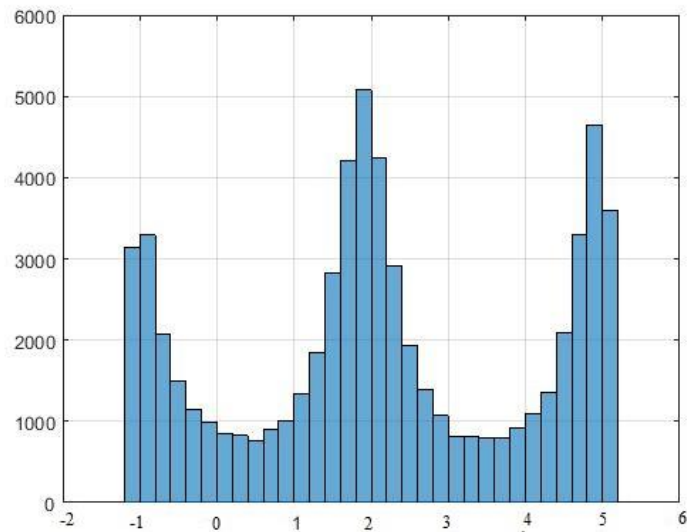


Рис 2.20 Гістограма відгуків РОО після DoG-фільтрації

Даний факт несе за собою явну перевагу кількості одиниць над нулями в бінарному коді РОО, що зменшує його інформативність[21] - тобто ентропія бінарного кода буде значно менше 1, в нашому випадку ентропія не перевищувала 0,6. Необхідно усунути цей недолік.

2.7 Удосконалення DoG-фільтра

Класичний DoG-фільтр був запропонований для отримання АЧХ які наближались до прямокутної форми, тобто мали більш крутий скат в порівнянні з фільтром Гауса і відсутністю бокових пелюсток.

В дисертаційній роботі для кодування РОО будемо застосовувати значення фаз відгуків фільтра. Але ці відгуки повинні мати постійний стрибок для їх відмінності. Виходячи з обробки сигналів ми знаємо, якщо АЧХ проходить через 0 осі частот то фази гармонік отримують постійний стрибок на π . Щоб фази вищих гармонік не стрибали при декількох переходах АЧХ через 0, потрібно щоб АЧХ мала всього один перехід через 0, а потім поступово наближалась по своєму значенню до 0. Таким чином гармоніки фільтрованого зображення РОО будуть

мати значення які знаходяться в межах від 0 до π і від π до 2π . Якщо АЧХ фільтра представити кривою яка отримується різницею двох гаусіанів рис 2.21

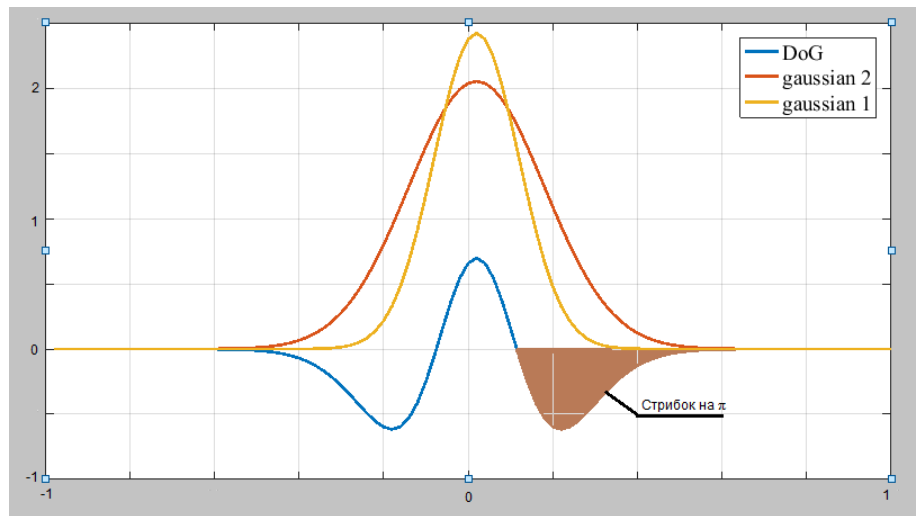


Рис.2.21 АЧХ модифікованого DoG-фільтра

Імпульсну характеристику фільтра отримуємо як двовимірне дискретне перетворення Фур'є

$$\dot{h}(x, y) = \frac{1}{N^2} \sum_{k=1}^{k_{\max}} \sum_{n=1}^{n_{\max}} \{DoG\} e^{+j \frac{2\pi k}{N}}, \quad (2.28)$$

де n, k – довжина маски фільтра в частотній області, маска квадратна $m_{\max} = k_{\max}$, x, y – просторові координати, цілі числа.

АЧХ фільтра описується наступною формулою

$$DoG = [g(n, k\sigma_1) - g(n, k\sigma_2)], \quad (2.29)$$

де $\sigma_2 > \sigma_1$, $\sigma_2 = S\sigma_1$, S - коефіцієнт розширення. $\sigma = \frac{\Delta\omega}{|\hat{\omega}|}$, де $\hat{\omega} = \pm 1$ - нормована частота, $\Delta\omega \leq |\hat{\omega}|$.

Фазовий відгук РОО отримується з виразу

$$\varphi_{lr} = -\arctan \frac{\text{Im} \left[I(x, y) * \dot{h}(x, y) \right]}{\text{Re} \left[I(x, y) * \dot{h}(x, y) \right]}. \quad (2.30)$$

Операція в квадратних дужках – це згортка зображення РОО з імпульсною характеристикою удосконаленого DoG-фільтра.

$$Iris = \begin{cases} 1, & \text{якщо } 0 \leq \varphi_{Ir} < \pi \\ 0, & \text{якщо } \pi \leq \varphi_{Ir} < 2\pi \end{cases} \quad (2.31)$$

Провівши кодування понад 200 зображень РОО зафіксовано, що гістограма розподілу матриці Iris-коду РОО наближується до рівномірної (рис 2.22.)

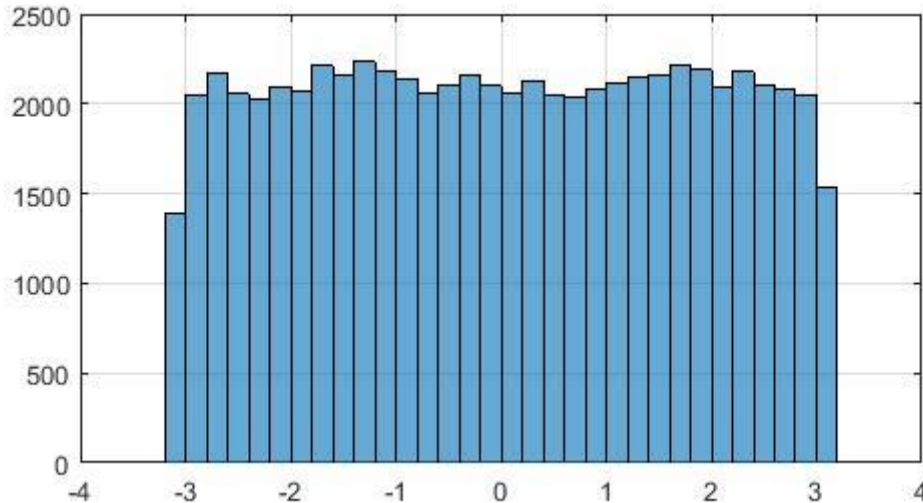


Рис2.22 Гістограма відгуків РОО після модифікованого DoG-фільтра

В результаті обчислення ми отримали значення ентропії $0,99998 \pm 0,00001$.

На рис. 2.23 наведено приклад зображення райдужної оболонки і відповідні їй ознаки, отримані за формулою (2.30, 2.31):

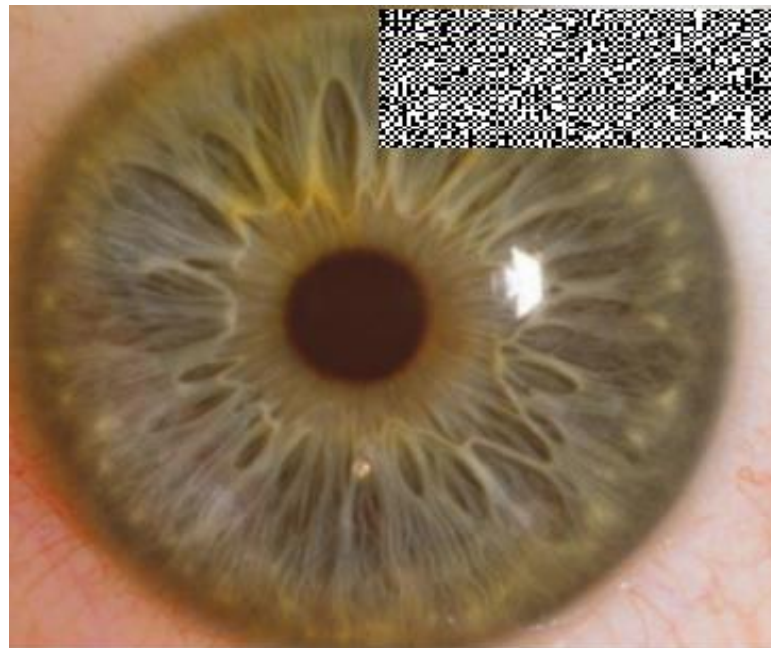


Рис. 2.23. Визначення коду райдужки за допомогою DoG- фільтра

Запропоновані ознаки, аналогічно до ознак, побудованих на фазах вейвлетів Габора, не залежать від змін яскравості чи контрасту зображення, оскільки ґрунтуються винятково на його структурних характеристиках. Водночас вони вирізняються вищою обчислювальною ефективністю, що робить їх привабливими для використання в практичних системах. Питання оптимального вибору параметрів DoG-фільтра, а також оцінка роздільної здатності ознак і їх стійкості до завад будуть детально розглянуті в експериментальному розділі цієї роботи.

2.7. Висновки до другого розділу роботи

Описано ключові підходи та алгоритми, що застосовуються на етапі попередньої обробки зображення райдужної оболонки ока. Цей процес включає чотири основні етапи: локалізацію райдужки, геометричну нормалізацію, корекцію яскравості та зменшення впливу шумів.

1. Існуючі методи локалізації меж райдужної оболонки часто мають обмеження щодо точності та стабільності, що негативно впливає на загальну ефективність біометричних систем.

2. Запропоновано вдосконалений інтегрально-диференціальний алгоритм, який дозволяє визначати межі райдужки з покращеною точністю. Його особливістю є поетапне уточнення області пошуку центра зіниці на основі порогового аналізу, що знижує обчислювальні витрати без втрати якості локалізації.

3. До методів виділення текстурних ознак райдужної оболонки висуваються вимоги: стійкість до змін яскравості, контрасту та положення (повороту в полярній системі координат), а також висока здатність до розрізнення індивідуальних особливостей.

4. Фазове представлення зображення дозволяє зменшити вплив нерівномірного освітлення та забезпечити стабільність розпізнавання незалежно від умов зйомки.

5. Аналіз показує, що локальні фази вейвлетів Габора краще описують структуру зображення порівняно з фазою дискретного перетворення Фур'є. Тому

використання фазових характеристик вейвлетів Габора вважається ефективним підходом до формування ознак.

6. Разом з тим, з обчислювальної точки зору, DoG-фільтр (різниця гауссіан) забезпечує значно кращу продуктивність у порівнянні з Габор-фільтрами, що дозволяє застосовувати його у високошвидкісних системах.

7. Фазові відгуки DoG-фільтра є інформативними для опису локальної текстури, оскільки не залежать від загального рівня яскравості або контрасту зображення. Це робить їх перспективними ознаками при побудові систем ідентифікації за зображенням райдужної оболонки.

8. Усі наведені підходи та фільтри пройшли експериментальну перевірку, що підтверджує їх практичну доцільність для задач біометричного розпізнавання.

Список використаних джерел у другому розділі

1. Daugman J and Downing C (2001), Epigenetic randomness, complexity, and singularity, Proceedings of the Royal Society, B, 268, pp 1737 - 1740.
2. Byung-Gyu Kim, Hong-Seup and Dong-Jo Park, Development of Iris Recognition System for Intelligent Security System, Dept. Electrical Engineering & BSRC, KAIST.
3. J, Asmuth, G. Green, S. Hsu, R. Kolczynski, J, Matey and S. McBride, A machine vision system for iris recognition, Machine Vision and Applications 9, 1-8, 1996.
4. Larry Bliss, User Identification and Verification Iris Recognition, DCS860B - Security, Prof. Bel Raggad, April 15, 2002.
5. ISO/IEC 19794-6:2011 Preview Information technology -- Biometric data interchange formats -- Part 6: Iris image data.
6. Daniel Sieberg, "Iris Recognition at Airports Uses Eye-Catching Technology, July 24, 2000
7. Katie Collins, Iris Identification, October 16, 2000,35 <http://www.nei.nih.gov/>
8. Michael Geruso, Virginia Tech, An Analysis of the Use of Iris Recognition Systems in U.S. Travel Document Applications, July 29, 2002
9. John Daugman, The importance of being random: statistical principles of iris recognition. The Computer Laboratory, University of Cambridge, Cambridge CB3 0FD, UK, 21 December 2001.
10. J. Asmuth, G. Green, S. Hsu, R. Kolczynski, J. Matey and S. McBride, A system for automated iris recognition, Proceedings of the IEEE Workshop on Applications of Computer Vision, 121-128, 1994.
11. Bryan K. Marcia, Phd., Constitutional Classification Via the Eye, March 1
12. Helen Pearson, Iris patterns prove their unique credentials. 8 August 2001, <http://www.nature.com/news/2001/010808/full/news010809-8.html>
13. PureHealth. The I-4 Health Book. [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://purehealth.com/i4book>
14. Gonzalez, R. C., Woods, R. E. Digital Image Processing. 3rd Edition. Pearson Education, 2008. – 954 p. ISBN 978-0-13-168728-8.

15. Iridian Technologies. Офіційний сайт компанії [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.iridiantech.com>
16. John Daugman, Neural Image processing strategies applied in real-time pattern recognition, the computer laboratory, university of Cambridge, Cambridge CB2 3QG, UK, 1997
17. John Daugman, Biometric Decision Landscapes, University of Cambridge, The Computer Laboratory
18. Соловьев В.Д., Соловьев А.В. Компьютерное зрение: теория и практика. — СПб.: БХВ-Петербург, 2015. — 496 с.
19. Якименко О. О. Вища математика для інженерів. — Київ: Каравела, 2008. — 752 с.
20. Паламарчук С. І. Обробка зображень та відео: основи цифрових методів — Чернівці: Рута, 2013. — 275 с.
21. Горбатюк С. М., Козлов В. В. Методи обробки зображень та відеоінформації. — Київ: КНУ, 2011. — 215 с.
22. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. — Москва: Техносфера, 2012. — 1104 с.
23. Klette R., Zamperoni P. Handbook of Image Processing Operators. — Wiley, 1996. — 504 p.
24. Солдатов С. П. Введение в цифровую обработку изображений. — М.: Форум, 2012. — 256 с.
25. Прокопенко В. І., Стахов А. О. Основи цифрової обробки зображень: навчальний посібник. — Харків: ХНУРЕ, 2011. — 216 с.
26. Дуда Р., Харт П., Сторк Д. Распознавание образов и машинное обучение. — М.: Вильямс, 2001. — 832 с.
27. Крылов И. В., Поспелов Д. А. Основы распознавания образов. — М.: Наука, 2003. — 334 с.
28. Назаренко А. И. Теория и методы распознавания образов: Учебное пособие. — М.: Горячая линия – Телеком, 2011. — 272 с.

29. Tai Sing Lee, Image representation using 2D Gabor wavelets, IEEE Transactions of pattern analysis and machine intelligence. Vol., No. 10 October 1996.
30. Thomas P, William E, Dennis F_ Dunnyy, Gabor filter design for multiple texture segmentation. Department of Electrical' Engineering, University of North III Carolina, October 1996, SPIE.
31. Vincent Levesque, Texture Segmentation Using Gabor Filters, Center For Intelligent Machines, McGill University, December 6, 2000
32. Jain A.K. Fundamentals of digital image processing. - Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, USA, 1989. - 569 p.
33. Jensen B. The science and practice of iridology. - 21st Printing, 1995. - 372 p.
34. Karunakar Y. Prodigious Utilization of Genetic Algorithm in Tuning Gabor lter parameters in the Application of Iris Recognition // Int. J. Information and Electronics Engineering. 2011. V.1. N.1. P.5258.
35. Kashima H., Hongo H., Kato K., Yamamoto K. Robust Iris Detection Method of Facial and Eye Movement // Vision Interface Annual Conference, Ottawa, Canada, 2001.
36. Klette R., Rosenfeld A. Digital geometry: Geometric methods for digital picture analysis. - Elseview, 2004. - 656 p.
37. Lee Y., Micheals R.J., Filliben J.J., Phillips P.J. VASIR: An Open-Source Research Platform for Advanced Iris Recognition Technologies // Journal of Research. 2013. - 118.011.
38. Mehrabian H., Hashemi-Tari P. Pupil Boundary Detection for Iris Recognition Using Graph Cuts // Proc. Image and Vision Computing New Zealand. 2007.P.77-82.
39. Daugman J. How iris recognition works // Proc. IEEE Trans. Circ. Syst. Video Technol. 2004. V.14. N.1. P.21-30.

РОЗДІЛ 3

ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ В СИСТЕМІ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ОСОБИСТОСТІ ПО ЗОБРАЖЕННЯ РАЙДУЖНОЇ ОБОЛОНКИ ОКА

3.1 Основні критерії для систем ідентифікації та аутентифікації по райдужній оболонці ока.

Захист будь-якого об'єкта включає кілька рубежів, число яких залежить від рівня режимності об'єкта. При цьому у всіх випадках важливою складовою буде система управління контролю доступом (СКУД) на об'єкті[1].

При реалізації конкретних СКУД використовують різні способи і реалізують їх за допомогою різних пристроїв для ідентифікації і аутентифікації особистості. Будь-яка СКУД призначена для того, щоб автоматично пропускати тих, кому цей вхід дозволений, і не пропускати тих, кому вхід заборонений. Всі її інші функції (збереження матеріальних цінностей, контроль і облік робочого часу і ін.) є результатом основного призначення.

У загальному випадку під СКУД зазвичай розуміють сукупність програмно-технічних і організаційно-методичних засобів, за допомогою яких вирішується завдання контролю і управління приміщенням підприємства і окремими приміщеннями, а також оперативний контроль за пересуванням персоналу і часу його перебування на території підприємства.

Інтерес до систем контролю і управління доступом зростає ще й тому, що наявність такої системи важлива для ефективної роботи підприємства. Контроль не тільки істотно підвищує рівень безпеки, але і дозволяє оперативно реагувати на поведінку персоналу і відвідувачів. Також важливим завданням для багатьох підприємств є необхідність контролювати графік і вести облік робочого часу. Особлива увага приділяється системам, що дозволяє вибудовувати необхідні конфігурації, враховуючи всі особливості підприємства.

Системи контролю і управління доступом являють собою системи, які призначені для автоматизації контрольо-пропускнуго режиму на об'єкті.

Контроль і управління доступом це основна функція системи. За допомогою даної функції проводиться поділ прав доступу співробітників в певні приміщення

Роботу системи контролю та управління доступом можна в спрощеному вигляді описати наступним чином. Кожен співробітник або постійний відвідувач (пасажир в аеропорту) організації отримує ідентифікатор. Ідентифікатор присвоюється в результаті реєстрації осіб за допомогою засобів системи. Паспортні дані, фото (відеозображення) та інші відомості про власника заносяться в персональну електронну картку. Персональна електронна картка власника і код його електронного ключа зв'язуються один з одним і заносяться в спеціально організовані комп'ютерні бази даних.

Біля входу в будівлю або в зоні, що підлягає контролю, встановлюються зчитувачі, які зчитують ідентифікатор їх код і передають цю інформацію в контролер системи.

У системі кожному коду поставлена у відповідність інформація про права власника. На основі зіставлення цієї інформації, система приймає рішення: відкриває або блокує двері (замки, турнікети), переводить рубіж в режим охорони, включає сигнал тривоги і т. д. Всі факти пред'явлення ідентифікатора і пов'язані з ними дії (проходи, тривоги і т. д.) фіксуються і зберігаються в комп'ютері. Інформація про події, викликаних пред'явленням карток, може бути використана далі для отримання звітів по обліку робочого часу, порушень трудової дисципліни та ін.

СКУД, на сьогоднішній день – невід'ємна частина повсякденного життя практично кожної людини. Це простий і дієвий механізм забезпечення безпеки офісів, банків, навчальних закладів, громадських місць (стадіони, метрополітен і т.д.).

Інформаційні системи (ІС) удосконалюються по-особливому, так як підрозділяється на програмну частину платформу і інформаційні бази (ІБ). Платформа забезпечується типовий інтерфейс, стандартні методи взаємодії з зовнішніми технічними пристроями, прийоми формування, систематизації даних, відповідні загальним сформованим призначенням для користувача традицій в

предметній області. Стандартизація (в тому числі і по впровадженню) результатом конкуренції між виробниками. Внаслідок конкуренції розробники періодично вбудовують нові методи обробки даних в загальноприйнятому стилі створюють нові версії- «релізи» (доповнюючи раніше створені розробки). В ІС обліку і управління прийнято виділяти інтегральні (загальні) підсистеми відповідно до вузької спеціалізації, багато в чому визначають умови компонування конфігурації ІБ і, відповідно, її подальшої експлуатації наступні загальні підсистеми.

Існує велика кількість зарекомендованих позитивно на ринку розробником ІС обліку і управління. Всі існуючі на ринку ІС влаштовані в певному сенсі приблизно однаково. Програмна частина платформа конкретно взятої ІС забезпечує на різних підприємствах стандартними інформаційними методами експлуатацію різних ІБ і оновлюється рідко. У той же час, що відображають специфіку типових обліково-аналітичних, управлінських завдань конфігурації ІБ, взаємодія користувача з якими забезпечує платформа, оновлюються часто.

До недавніх пір основними споживачами біометричних методів ідентифікації були всілякі правоохоронні структури і спецслужби. Однак в останні півтора десятка років власники різних ІС активніше стали цікавитися біометричними методами ідентифікації. Міжнародна Біометрична Група (International Biometric Group, IBG) відзначає значне збільшення доходів в індустрії біометрії[2].

Власне біометрична ідентифікація особи виглядає приблизно так як показано на рис. 2.1.

Основною проблемою біометрії є питання її надійності. Оскільки умови сканування кожен раз дещо відрізняються, можна говорити про неточний збіг вимірювання з шаблоном (як це відбувається, наприклад, при порівнянні з еталоном, що вводиться в комп'ютер пароля), а лише про величину ймовірнісної міри правильного ототожнення.

Тому всі біометричні пристрої характеризуються параметрами: FRR «ймовірність невизнання свого» (тобто вірогідність не ідентифікувати зареєстрованого користувача системи) і FAR «вірогідність визнання своїм чужого»

(тобто ймовірність невірної ототожнення стороннього з кимось із легальних). Описані параметри використовуються як показники ефективності біометричних систем, але це не всі параметри біометричних систем також є декілька коефіцієнтів рівня помилок (коефіцієнт EER) або коефіцієнт перехідних помилок (CER) - це коефіцієнти, при яких обидві помилки (помилка прийому і помилка відхилення) еквівалентні. Значення EER може бути з легкістю отримано з кривою ROC, зазначимо, що графік ROC - це візуалізація компромісу між характеристиками FAR і FRR. У загальному випадку алгоритм що порівнює приймає рішення на підставі порога, який визначає, наскільки близько повинен бути вхідний зразок до шаблону, щоб вважати це збігом. EER - це швидкий спосіб порівняти точність приладів з різними кривими ROC. Здебільшого, пристрої з низьким EER найбільш точні. Чим менше EER, тим точнішою буде система.

В основу роботи біометричних систем покладена математична статистика (а саме, перевірка гіпотез), алгоритми якої інтенсивно використовуються в ряді сучасних технічних систем(зв'язок, радіолокація і т.д.)

Для пояснення вводяться ймовірнісні характеристики біометричних систем, по аналогії з радіолокацією, розглянемо дві щільності ймовірності, які характеризують шаблон користувача і шаблон порушника. Припустимо, що ці шаблони можуть бути задані у вигляді нормальних розподілів. Тоді введемо і третю величину P , яка може визначати рішення, що приймаються. В результаті аналізу отриманих біометричних характеристик і шаблонів, що зберігаються в базі системи, приймається рішення про допуск поточного користувача: віднести його до користувачів системи або користувачів порушників, які не допущені до ресурсів системи. У найпростішому випадку рішення приймається при двох взаємно виключаючих умовах:

- G - біометричні характеристики належать користувачу системи;
- B - біометричні характеристики не належать користувачу системи.

При автоматичному прийнятті рішення в системі ці умови невідомі. У процесі аналізу біометричних характеристик поточного користувача і шаблону кожному умові можуть відповідати два види рішень:

- Перше \hat{G} біометрична характеристики відповідає шаблону, який зберігається в базі системи;
- Друге \hat{B} біометрична характеристики не відповідає шаблону, який зберігається в базі системи.

При цьому можливі чотири ситуації суміщення випадкових подій :

- $\hat{G}\hat{G}$ - правильний допуск користувача до ресурсів системи;
- $\hat{B}\hat{G}$ - заборона на допуск користувачеві (користувач сприйнятий системою як порушник, помилка 1-го роду (помилковий відмова, False Rejection Rate, FRR);
- $\hat{G}\hat{B}$ - допуск до ресурсів системи користувача порушника, помилка 2-го роду (помилкове розпізнавання, False Acceptance Rate, FAR);
- $\hat{B}\hat{B}$ - заборона доступу до ресурсів користувачеві порушнику.

Зазначеним ситуаціям відповідають чотири ймовірності суміщення подій, сума яких дорівнює одиниці.

Як правило, кожному помилковому рішення ставлять у відповідність деяку плату - вартість помилки. Для безпомилкових рішень цю вартість можна вважати рівною нулю, тобто $\hat{G}\hat{G} = \hat{B}\hat{B} = 0$. Тоді систему допуску можна характеризувати середньою вартістю (математичним очікуванням вартості) помилкових рішень.

Кращою з порівнюваних систем допуску слід вважати ту систему, яка задовольняє мінімуму вартості втрат.

У зв'язку з тим, що, як правило, відсутня інформація про апріорні ймовірності $P(G), P(B)$, складний і розрахунок ймовірностей суміщення. Тому переходять до умовних ймовірностей, що дозволяє отримати якісні показники досліджуваних систем.

Якісними показниками в умовах аутентифікації користувача системою є умовні ймовірності: правильного допуску до ресурсів $Q = P(\hat{G}G/G)$, і помилкової відмови $\hat{Q} = P(\hat{B}G/G)$.

Тобто для однієї умови G є два взаємовиключаючі рішення \hat{G}, \hat{B} сума умовних ймовірностей яких буде дорівнювати одиниці.

Рівність $P(G) = P(B)$ свідчить про те, що апріорні ймовірності появи користувача і порушника на вході біометричної системи однакові і рівні 0,5. В дійсності $P(G) \gg P(B)$. Більш того, не рівні і вартості помилкових рішень. Природно припустити, що вартість помилкового недопуску зареєстрованому користувачу значно менше вартості, яка характеризує умовну ймовірність помилкового розпізнавання (допуск порушника на об'єкт КІ). Зауважимо, що помилки 1-го роду (помилковий відмова, False Rejection Rate, FRR) мають менш важкі наслідки (вимагають повторної реєстрації користувача), на відміну від помилок 2-го роду (помилкове розпізнавання, False Acceptance Rate, FAR), які призводять до допуску порушника до ресурсів і послуг, наприклад, об'єкта КІ.

Вчені які займаються розв'язанням задачі прийняття рішень в СКУД по РОО розглядають різні способи їх порівняння між собою.

В якості міри схожості бінарних кодів можливо використовувати відстань Левенштейна – міра різниці двох рядків символів, визначається як мінімальна кількість операцій вставка, видалення, заміна символу необхідним для перетворення одного рядка в інший. Недоліком данної міри схожості буде довгий час визначення відстані, залежить від розміру порівнюваних кодів.

Також можливою мірою схожості може бути схожість Джаро-Вінклера – міра схожості двох рядків для вимірювання відстані між двома послідовностями символів. Це мінімальне кількість одно символних перетворень, які необхідні для того, щоб змінити один рядок в інший. Недоліком даної міри схожості також буде довгий час визначення відстані.

В якості міри подібності двох райдужок зручніше всього використовувати нормовану відстань Хеммінга між N-розрядними бінарними кодами ідентифікованої (I) райдужки і зареєстрованими (R) значеннями кодів.

Код райдужки формується після нормалізації зображення РОО, а саме роль модуля нормалізації полягає в перетворенні локалізованої області райдужки особи до прямокутного об'єкту[3]. Процес, часто називають розгортанням райдужки і має такі переваги:

- пояснює варіації розміру зіниці в зв'язку зі зміною зовнішнього освітлення які можуть вплинути на розмір діафрагми;
- гарантує, що райдужки різних індивідів відображаються на однаково, незважаючи на варіації розміру зіниці;
- дозволяє при реєстрації нівелювати повороти голови.

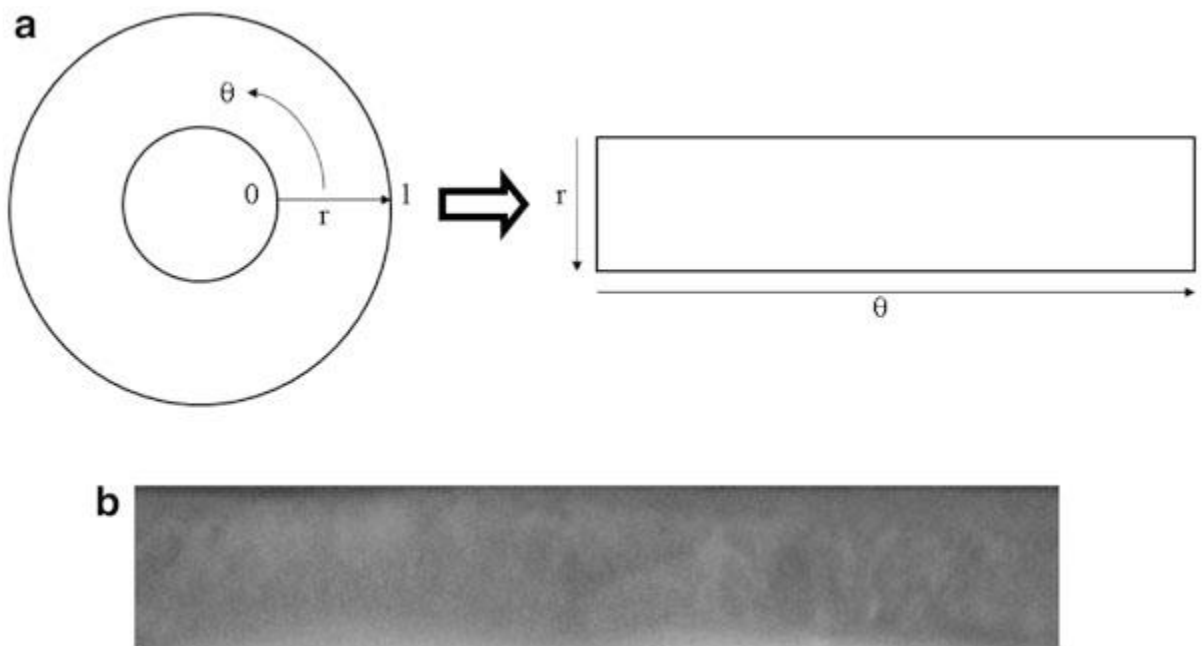


Рис. 3.1 Нормалізація зображення. (а) Процедура нормалізації перетворює координати пікселів з кільцевої області між межами РОО до псевдо-полярних координат. (б) Приклад нормалізованих райдужної оболонки.

Модуль нормалізації, позначимо через $I(x(r, \theta), y(r, \theta)) \longrightarrow I(r, \theta)$, задається наступне перетворення:

$$\begin{aligned} x(r, \theta) &= (1-r)x_p(\theta) + rx_l(\theta) \\ y(r, \theta) &= (1-r)y_p(\theta) + ry_l(\theta), \end{aligned} \tag{3.1}$$

де (x_p, y_p) і (x_l, y_l) відповідають декартовим координатам внутрішньої і зовнішньої межі, відповідно. Рисунок 3.1 визначає процес нормалізації.

Сучасні комерційні системи використовують алгоритми Даугмана, який продемонстрував високу точність на великих наборах даних.

3.2 Методи отримання коду РОО

Якщо кодувати РОО по послідовності рядків, то в результаті інструментальних помилок визначення центра зіниці $x_0 \pm \Delta_1; y_0 \pm \Delta_2$, радіус сегмента РОО $r \pm \Delta_3$, код Iris однієї і тієїж РОО може мати різне значення, що приведе до того, що ймовірність збігу КР одного і тогож зображення буде достатньо низькою для цього пропонується для отримання КР використовувати блоковий підхід до отримання КР[5]. Гістограма розподілу нормованої відстанні Хеммінга при використанні цих двох підходів приведена на рис.3.1.

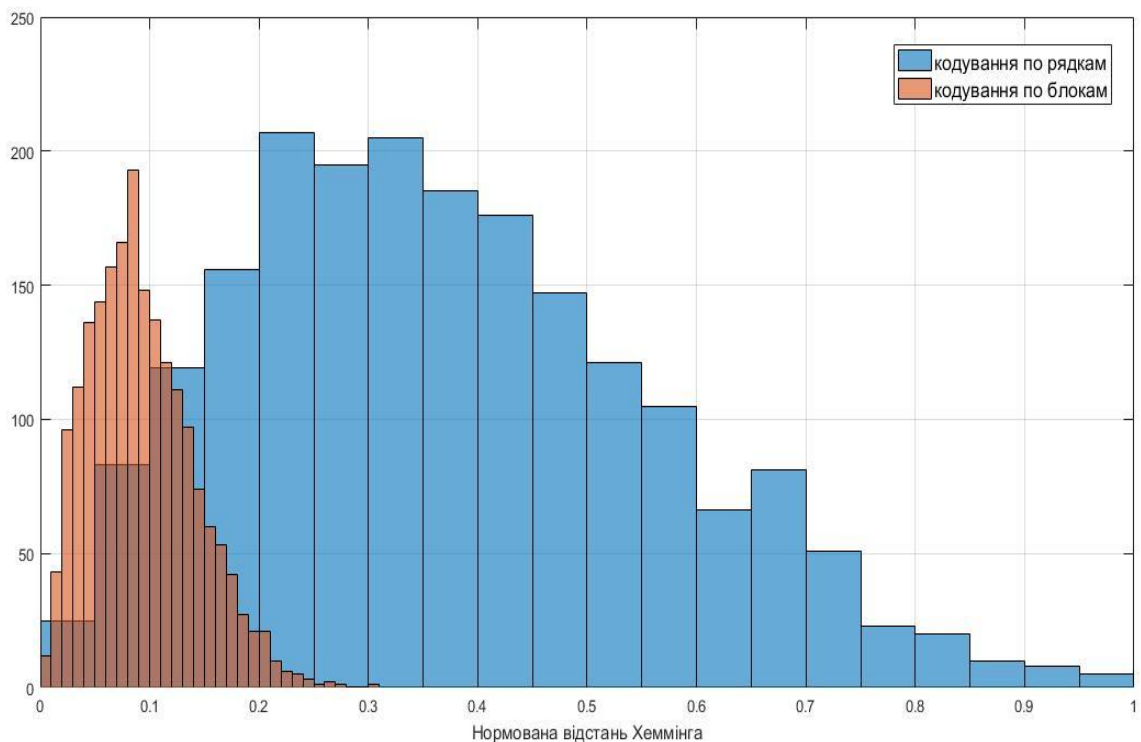


Рис. 3.2 Гістограма розподілу нормованої відстанні Хеммінга

Даугман в своїй роботі довів, що нормована відстань Хемінга при достатньо невеликій кількості випробувань має біноміальну щільність розподілу, яка описується наступним виразом[3]:

$$f(x) = \frac{N!}{m!(N-m)!} p^m q^{(N-m)} \quad 3.2$$

де біноміальний розподіл для N випробувань Бернуллі з вірогідністю результатів p і q (ймовірність 0 і 1 в КР) пророкує, що ймовірність спостереження з частки $x = m/N$ подій серед N випробувань. Ймовірність розподілу є суцільна крива зображена на рис 3.3.

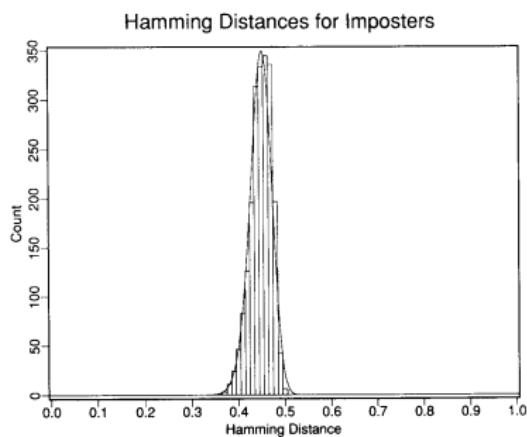


Рис. 3.3 Розподіл відстаней Хеммінга між непов'язаними кодами райдужної оболонки.

3.3 Коди райдужок і їх порівняння

У всіх СКУД необхідно мати чіткий алгоритм прийняття рішень і визначені права доступу для кожного ідентифікатора. У цій роботі для оцінки схожості бінарних кодів райдужки використовується нормована відстань Хеммінга.

Код райдужної оболонки ока формується на основі текстурних ознак, які визначаються у вузлах ортогональної сітки. При використанні фаз відгуку вейвлетів Габора кожен вузол забезпечує два біти інформації, тоді як у випадку з DoG-фільтром — лише один біт. Це дозволяє ефективно закодувати унікальну структуру райдужки у компактній бінарній формі.

У процесі біометричної ідентифікації реалізується два основні етапи:

Реєстрація: для кожного користувача обчислюється та зберігається у базі даних унікальний код райдужки;

Розпізнавання: нове зображення райдужної оболонки обробляється аналогічним чином, і отриманий код порівнюється з усіма записами в базі.

Для порівняння кодів широко застосовується нормована відстань Хеммінга, яка визначає кількість розбіжностей між відповідними бітами двох бінарних послідовностей фіксованої довжини — коду ідентифікованої райдужки I та коду з бази даних R [3, 29]. Чим менша ця відстань, тим вищий ступінь збігу між зображеннями райдужної оболонки.

$$HD(IC_I, IC_R) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N IC_{Ii} \oplus IC_{Ri} \quad (3.1)$$

де IC_I, IC_R — коди райдужок, IC_{Ii}, IC_{Ri} — i -ий біт кода IC_A .

Для ідентичних кодів райдужки (КР) відстань Хеммінга (HD) дорівнює 0, а максимальне значення — 1. При захопленні зображення можливі спотворення, зумовлені зміною освітлення, положення голови та відстані до камери. Більшість таких змін компенсуються за рахунок нормалізації, однак поворот зображення залишається проблемою.

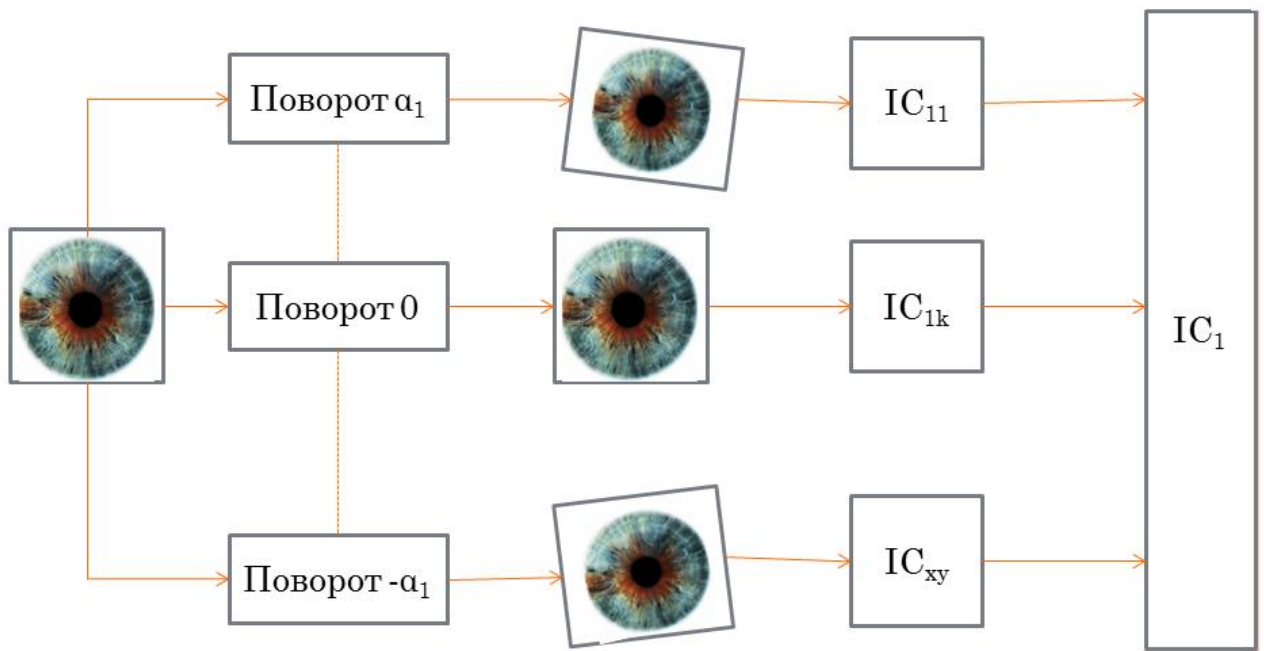
Для підвищення стійкості до поворотів запропоновано методику, яка передбачає збереження в базі даних декількох варіантів зображення райдужки, повернутих на фіксовані кути. Під час ідентифікації вхідне зображення порівнюється з усіма варіантами, і рішення приймається за мінімальною відстанню Хеммінга (рис. 3.4).

$$HD_{\min}(IC_1, IC_2) = \min HD_i(IC_1, IC_2) \quad (3.2)$$

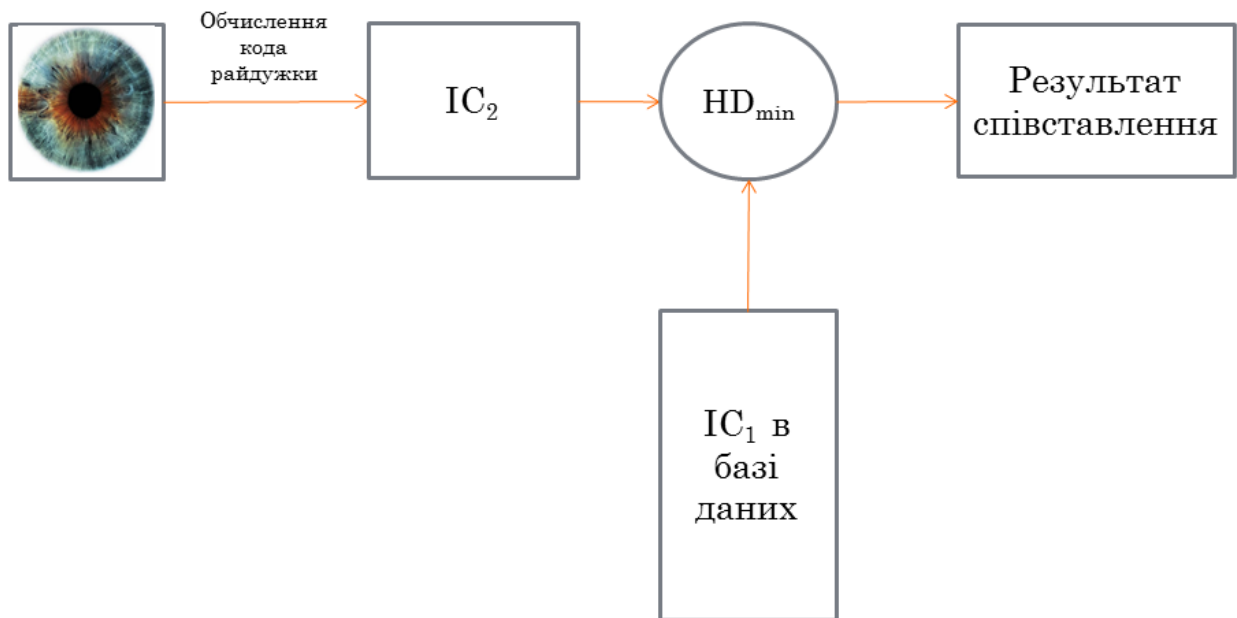
де IC_1 — багатосекційний код в базі даних, i — номер секції, IC_2 — код розпізнаваної райдужки, HD_i — відстань Хеммінга між IC_2 і i -ою секцією IC_1 .

Ключовим параметром запропонованого алгоритму є кут повороту зображення райдужної оболонки. Його значення доцільно визначати на основі

статистичного аналізу, що оцінює, як відстань Хеммінга змінюється при обертанні зображення.



а)



б)

Рис. 3.4. Зіставлення кодів райдужок: створення ідентифікаційної записи (а), зіставлення з еталоном (б)

На рисунку 3.5 показано, як змінюється відстань Хеммінга між кодами райдужки залежно від кута нахилу голови, відповідно до результатів, отриманих у рамках експериментальної системи.

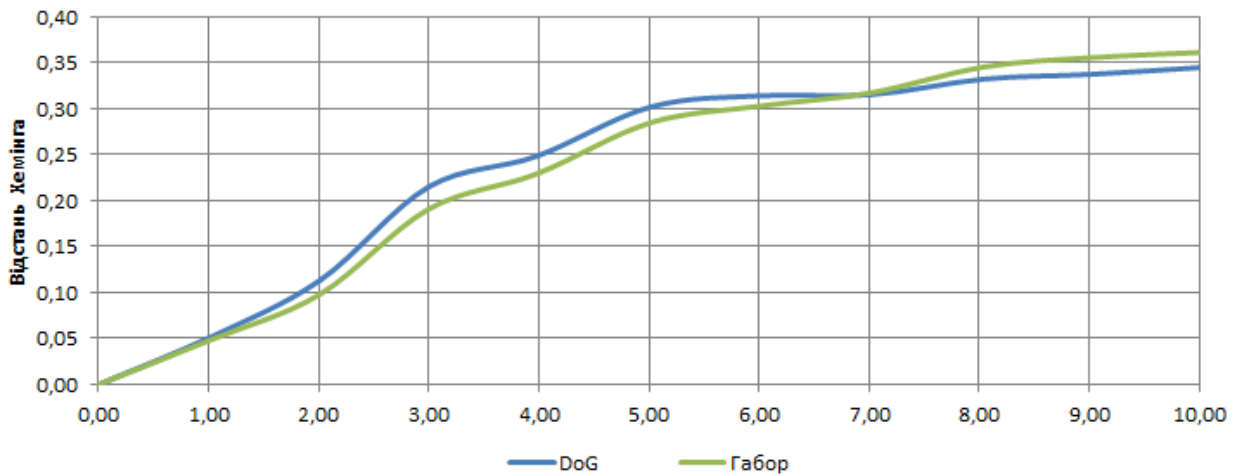


Рис. 3.5 Динаміка зміни відстані Хеммінга в залежності від повороту голови ($\omega_0 = \pi/8, \theta = 0$), і DoG-фільтра ($\sigma = 0,1$). Кут (Angle) показаний в градусах

Якщо вважати біти ознак статистично незалежними, математичне очікування відстані Хеммінга для різних райдужок становить 0,5. Для однакових райдужок без спотворень ця відстань дорівнює нулю. У присутності шумів та викривлень вона зростає, наближаючись до 0,5.

Вибір кутового кроку при формуванні шаблону є компромісним: зменшення кроку підвищує точність за рахунок меншої чутливості до повороту, однак збільшує розмір шаблону і час ідентифікації.

Оптимальний кутовий крок визначається шляхом мінімізації функції, що відображає баланс між ймовірністю помилкової ідентифікації та ефективністю процесу розпізнавання. Вибір цього параметра $\Delta\alpha$ пропонується формалізувати у вигляді оптимізаційної задачі з метою зниження загального ризику прийняття неправильного рішення.

$$G(\Delta\alpha) = c_{AR}P_{AR}(\Delta\alpha) + c_{IA}P_{IA}(\Delta\alpha) + c_{ICC}V_{DB} \frac{2\alpha_{\max}}{\Delta\alpha}, \quad (3.3)$$

де $P_{AR}(\Delta\alpha)$ – Ймовірність помилкового відмовлення в доступі, $P_{IA}(\Delta\alpha)$ – Ймовірність хибного допуску стороннього користувача, c_{AR} – Втрати через

недопуск користувача з правами доступу, c_{IA} – Втрати внаслідок доступу стороннього користувача, c_{ICC} – Вартість виконання одиничного розрахунку відстані Хеммінга, V_{DB} – Число користувачів, що зберігаються в базі даних.

Залежності $P_{AR}(\Delta\alpha)$ і $P_{IA}(\Delta\alpha)$ можна описати таким чином.

Щільність імовірності відстані Хеммінга для кодів райдужок незареєстрованих осіб, згідно з припущенням про статистичну незалежність бітів, залишається сталою. Це означає, що форма розподілу для таких кодів не змінюється незалежно від зовнішніх чинників, таких як поворот або освітлення. Така стабільність дозволяє вважати розподіл імовірності для незареєстрованих райдужок еталонним при аналізі надійності системи ідентифікації, вона залежить від $\Delta\alpha$, тобто ми отримуємо $HD + \Delta HD(\Delta\alpha)$ із зміщенням $\Delta HD(\Delta\alpha)$.

На відміну від цього, для зареєстрованих користувачів щільність імовірності залежить від кута повороту зображення райдужки. Кутове зміщення спричиняє додаткову змінну до відстані Хеммінга (HD), яка модифікує початковий розподіл, зсуваючи його на певне значення. Розподіл цієї зсувної величини визначається графіками чутливості системи до повороту. У підсумку це дозволяє формалізувати нову функцію розподілу та використовувати її для оцінки ймовірностей хибного прийняття (False Accept Rate, FAR) $P_{AR}(\Delta\alpha)$ і хибного відхилення (False Reject Rate, FRR) $P_{IA}(\Delta\alpha)$, що є критично важливими показниками ефективності біометричної системи.

3.4 Прийняття рішень в системі

Рішення приймається за статистичною теорією, як показано на рис. 3.6: ліва крива — для зареєстрованих, права — для порушників. Поріг C однаковий для всіх, і при $HD < C$ вважається, що є збіг; інакше — ні. Таким чином помилкове спрацювання обраховуємо за формулою:

$$P_{Error} = P_{AR} + P_{IA}, \quad (3.4)$$

де $P_{AR} = \int_C^1 P_{Au}(HD_{\min}) dHD_{\min}$ – ймовірність помилкового відмовлення в доступі,
 $P_{IA} = \int_0^C P_{Im}(HD_{\min}) dHD_{\min}$ – ймовірність хибного допуску стороннього користувача, C – порогове значення, P_{Au} – ймовірність того, що на вхід системи надходить легітимне зображення райдужки, P_{Im} – ймовірність того, що на вхід системи надходить не легітимне зображення райдужки, $P_{Au}(HD)$ – ймовірнісна щільність відстані Хеммінга за умови, що райдужка є легітимною, $P_{Im}(HD)$ ймовірнісна щільність відстані Хеммінга за умови, що райдужка є легітимною.

3.4.1 Прийняття рішень при ідентифікації легітимних користувачів

Під час прийняття рішення про збіг кодів райдужки можливі чотири результати: два правильні (доступ надано авторизованому або відмовлено неавторизованому користувачу) та два помилкові (навпаки). На рис. 3.6 показано, як перекриття ймовірностей для співпадаючих і неспівпадаючих кодів призводить до помилок. Якість розпізнавання покращується зі зменшенням перекриття – тобто при більшій відстані між середніми значеннями або меншій дисперсії.

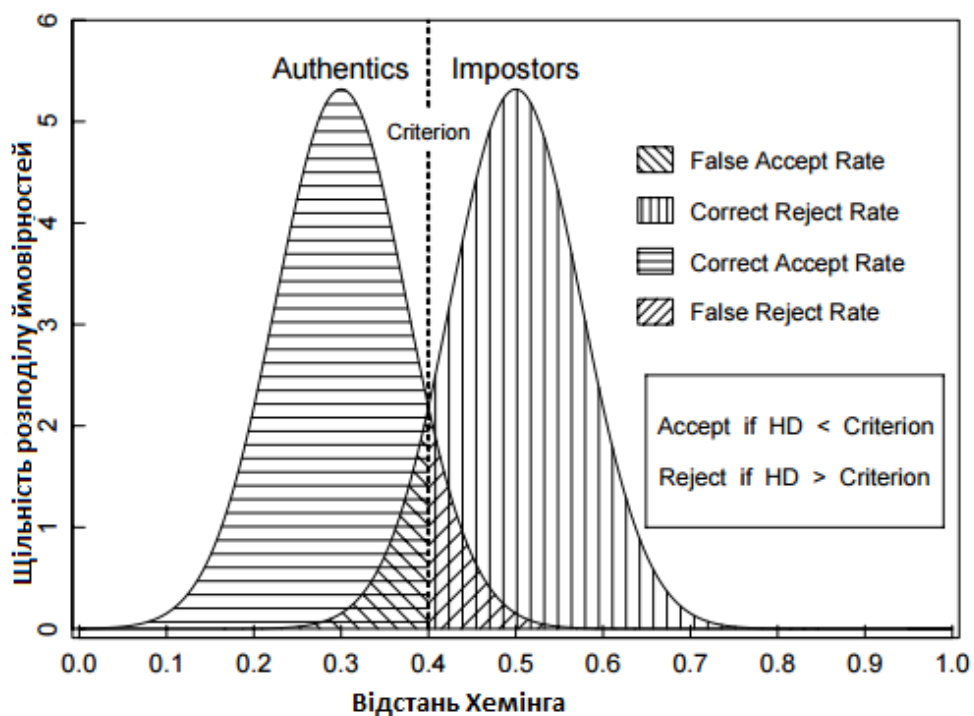


Рис. 3.6. Умовні ймовірнісні розподіли для відстані Хеммінга

Мірою роздільності між двома класами може слугувати критерій d , що надає кількісну оцінку. Тобто μ_1 і μ_2 – мат. сподівання, а ξ_1 і ξ_2 середньоквадратичні відхилення, то:

$$d = \frac{|\mu_1 - \mu_2|}{\sqrt{(\xi_1^2 + \xi_2^2)/2}}. \quad (3.5)$$

Коефіцієнт d слугує мірою оцінки якості ознак: чим вища роздільна здатність ознаки, тим більше значення набуває d .

Підхід до вибору порогового значення ґрунтується на положеннях статистичної теорії прийняття рішень. У працях [3, 7–12] описано три основні критерії вибору порога:

- критерій Байєса;
- мінімаксна стратегія;
- критерій Неймана–Пірсона.

Кожен із цих критеріїв має свої переваги залежно від умов застосування системи ідентифікації. Критерій Байєса є оптимальним у випадку, коли відомі апріорні ймовірності і втрати, пов’язані з кожним типом помилки. Мінімаксна стратегія орієнтована на мінімізацію максимально можливих втрат, що особливо актуально в умовах невизначеності. Критерій Неймана–Пірсона дозволяє контролювати ймовірність помилкового допуску, що критично важливо для систем безпеки. Таким чином, вибір конкретного критерію має ґрунтуватися на задачах, які стоять перед системою, та на припущеннях про характеристики вхідних даних.

Критерій Байєса забезпечує мінімізацію середнього ризику при прийнятті рішення. Його доцільно застосовувати в системах розпізнавання, що працюють у стабільних умовах — за постійного простору ознак, фіксованих описів класів і незмінної матриці втрат. Згідно з цією стратегією, рішення про збіг райдужок приймається тоді, коли виконується наступна умова:

$$c_{IA} P_{Im} P_{Im} [HD_{\min}(IC_1, IC_2)] > c_{AR} P_{Au} P_{Au} [HD_{\min}(IC_1, IC_2)], \quad (3.6)$$

де $p_{lm}[HD_{\min}(IC_1, IC_2)]$ – Ймовірнісна характеристика Хеммінгової відстані між нерівнозначними райдужками, $p_{Au}[HD_{\min}(IC_1, IC_2)]$ – Ймовірнісна характеристика Хеммінгової відстані між рівнозначними райдужками, c_{AR} – Фінансові втрати через хибне блокування правомірного доступу, c_{IA} – Фінансові втрати через хибне блокування неправомірного доступу, P_{Au} – Ймовірність збігу двох райдужних оболонок, P_{Im} – Ймовірність не збігу двох райдужних оболонок.

Для використання критерію Неймана-Пірсона необхідно лише встановити допустиму верхню межу ймовірності доступу незареєстрованого користувача $P_{IA\max}$. Порогове значення C обраховується наступним чином:

C

C визначається таким чином, щоб ця ймовірність не перевищувала заданого рівня.

$$\int_0^d p_{lm}(HD_{\min})dHD_{\min} = P_{IA\max} \quad (3.7)$$

У разі, коли неможливо достовірно оцінити апріорні ймовірності збігу або розбіжності райдужок, застосовується мінімаксий підхід. Цей критерій спрямований на зменшення найбільш можливих втрат, а порогове значення відстані Хеммінга обчислюється шляхом розв'язання спеціального рівняння.

$$c_{AR} \int_C^1 p_{Au}(HD_{\min})dHD_{\min} = c_{IA} \int_0^C p_{lm}(HD_{\min})dHD_{\min}. \quad (3.8)$$

У системах біометричної ідентифікації особистості доцільно застосовувати будь-який з трьох відомих критеріїв — залежно від умов експлуатації. Дослідження показали, що у разі наявності випадкових спотворень розподіли відстаней Хеммінга для автентичних і різних райдужок можуть значно відрізнятись. На рисунку 3.5 зображено полігони частот, які відображають ці розподіли. Для їх побудови вихідне зображення райдужки багаторазово спотворювалося за допомогою моделі випадкових змін, після чого для кожної пари спотворених зображень тієї ж райдужки обчислювалась відстань Хеммінга — це дозволило оцінити розподіл для однієї особи. Далі ці ж зображення порівнювались з райдужками інших людей для побудови розподілу відстаней для сторонніх осіб.

При цьому використовувалася наступна модель спотворень рис. 3.4:

$$I(x, y) = C(S(R(I(x, y)))) + N(x, y) \quad (3.9)$$

де S – перетворення масштабування, R – поворот, $I(x, y)$ – зображення, N – гаусів шум, C – перетворення яскравості і контрасту.

Параметри контрастності та яскравості α, k_x, k_y , задаються випадковими величинами з нормальним розподілом. Як видно з рис. 3.6, розподіли ймовірностей для різних райдужок можуть суттєво відрізнятися через унікальні структурні особливості кожної райдужної оболонки — різну кількість і виразність характерних елементів.

Особливу роль у формуванні розподілу відіграють локальні деталі текстури райдужки, такі як крипти, радіальні борозни, кільця та плями. Їхнє розташування і контрастність варіюються індивідуально, що обумовлює потребу в персоналізованому підході до визначення порогів прийняття рішень. Врахування цих деталей підвищує стійкість системи до випадкових спотворень.

Щоб підвищити точність розпізнавання, доцільно визначати індивідуальний поріг для кожного зразка в базі. Це реалізується під час адаптованої процедури реєстрації: генеруються численні спотворені версії однієї райдужки, які аналізуються, і за результатами моделювання формується графік (аналог рис. 3.3), що відображає розподіли тільки для даного зразка. Визначене таким чином порогове значення зберігається разом із кодом у базі даних і застосовується при подальшій ідентифікації.

Такий підхід дозволяє врахувати не лише загальні статистичні характеристики бази, а й індивідуальні особливості користувача. Це значно знижує ймовірність хибних рішень під час ідентифікації, особливо в умовах зміни освітлення, нахилу голови чи часткового перекриття райдужки повіками або віями. Персоналізація порогів є ключовим елементом для підвищення надійності біометричних систем.

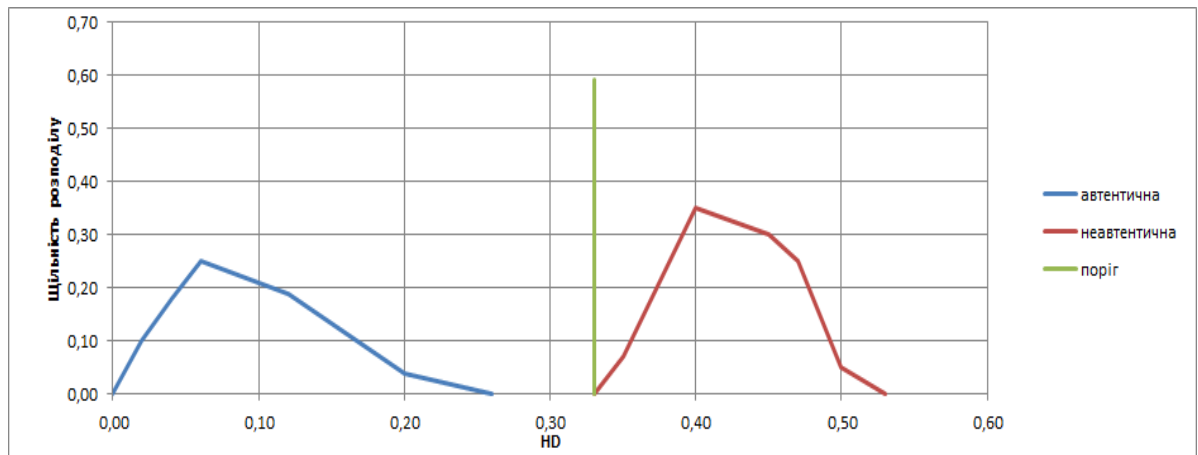
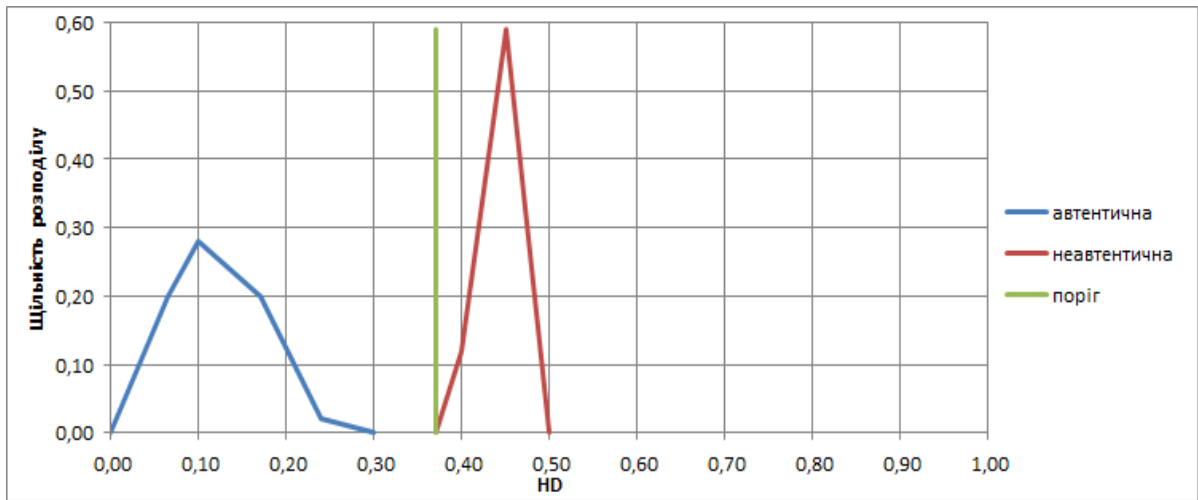
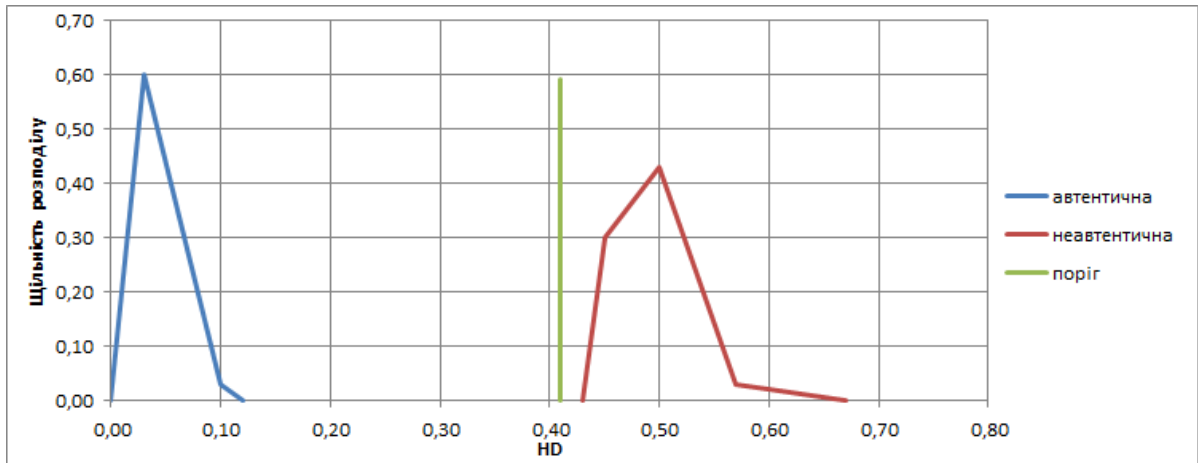


Рис. 3.7 Полігони частот для райдужок, що належать різним людям.

Значення порогів, визначені за критерієм Неймана-Пірсона показані чорної суцільною лінією

Зменшення ймовірності помилок при розпізнаванні райдужки можна досягти шляхом точного налаштування параметрів фільтрів, що використовуються для виділення її ознак. Ці параметри оптимізуються на основі аналізу навчальних даних з метою максимального розділення між зареєстрованими та

незареєстрованими користувачами. Після обчислення оптимальні значення фіксуються та застосовуються як у процесі реєстрації, так і під час ідентифікації, аналогічно до індивідуальних порогів. Такий підхід підвищує точність і надійність системи навіть за умов варіативності вхідних зображень.

3.4.2. Прийняття рішень при аутентифікації користувачів

Процес автентифікації користувача є спрощеною формою біометричної перевірки, яка полягає у зіставленні отриманого зображення райдужної оболонки ока з раніше зареєстрованим шаблоном у базі даних. На основі нового зображення генерується код, після чого обчислюється відстань Хеммінга між цим кодом і збереженим шаблоном. Якщо отримане значення відстані не перевищує заданий поріг, доступ дозволяється — користувач вважається автентичним.

На відміну від задачі ідентифікації, яка вимагає порівняння з усіма записами бази, автентифікація потребує лише одного порівняння, що суттєво знижує обчислювальні витрати та пришвидшує процес. Це робить систему більш ефективною, зокрема при великій кількості зареєстрованих користувачів. У такому контексті доцільним є застосування критерію Байеса, який враховує апіорні ймовірності й мінімізує середній ризик, що особливо важливо для забезпечення високої точності у системах контролю доступу.

3.5. Висновки до третього розділу

В даному розділі розглянуто комплекс питань, що стосуються процесу прийняття рішень під час ідентифікації особи за допомогою РОО.

На основі експериментів встановлено, що результати порівняння райдужних оболонок є чутливими до повороту зображення, який виникає через нахил голови. Для усунення цього впливу запропоновано метод удосконаленої реєстрації: з одного зображення формуються кілька версій, повернутих на задані кути, для яких обчислюються коди. Ці коди зберігаються в базі даних. Кутіві значення визначаються шляхом аналізу зміни відстані Хеммінга в залежності від повороту.

У процедурі ідентифікації система обирає найменше значення з множини отриманих відстаней.

Розглянуто три статистичні критерії для вибору порогу прийняття рішення: байєсівський, мінімаксний та Неймана-Пірсона. Залежно від умов експлуатації системи і її вимог, кожен із них може бути застосований для досягнення оптимального співвідношення між точністю і надійністю.

Статистичні дані, отримані в процесі експериментів, дозволяють удосконалити параметри алгоритмів ідентифікації. Запропоновано використання індивідуального порогу для кожної райдужки, що визначається під час моделювання на етапі реєстрації, а також оптимізація параметрів фільтрів для покращення роздільної здатності системи та зниження кількості помилок під час розпізнавання.

Список використаних джерел в третьому розділі

1. Захарченко М. І., Костюк О. В. Інформаційна безпека та захист інформації в інформаційно-комунікаційних системах. – К.: НАУ, 2015. – 312 с..
2. [https://ru.scribd.com/doc/316791717/Special-Report-Biometrics-and-Border-Security\(13.10.2016\)](https://ru.scribd.com/doc/316791717/Special-Report-Biometrics-and-Border-Security(13.10.2016))
3. Daugman J. High Confidence Visual Recognition of Persons by a Test of Statistical Independence// IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Inteligence, 15(11),: 1148-1161 November, 1993.
4. Jacquin A. // Visual Comm. and Image Processing, vol. SPIE-1360, 1990.
5. Keissarian F.; Daem M.F. Block pattern coding of HVS-based on wavelets for image compression // SPEE volume 4472.
6. Гуртовой А. Л., Петрунин К. С. Цифровая обработка изображений и видео: алгоритмы и технологии. – СПб.: БХВ-Петербург, 2016. – 464 с.
7. Saleh B. E. A., Teich M. C. Fundamentals of Photonics. — Wiley-Interscience, 2nd ed., 2007. — 1200 p.
8. Виноградов А. И., Гречихин Ю. Н. Основы статистической радиотехники. — СПб.: Питер, 2012. — 400 с.
9. Іващенко А. В., Погребняк В. Ф., Карпуша А. С. Основи радіотехніки та радіолокації: підручник. — Київ: Видавництво КНУ імені Тараса Шевченка, 2014. — 432 с.
10. Петров М. В., Гарасименко О. С. Теорія сигналів та процесів. — Харків: ХНУРЕ, 2013. — 280 с.
11. Третяк Є. В. Основи теорії телекомунікаційних систем: навчальний посібник. — Харків: ХНУРЕ, 2014. — 264 с.
12. Степаненко А. В. Теорія сигналів та процесів: навчальний посібник. — Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2013. — 312 с.
13. Flom L., Sar A. Iris recognition system // United States Patent 4641349. Filed February 20, 1985.

14. Фисенко В.Т. Компьютерная обработки и распознавание изображений: учеб. пособие. / В.Т. Фисенко, Т.Ю. Фисенко. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2008.– 192 с
15. Toth B., von Seelen U.C. Liveness Detection for Iris Recognition // Proc. NIST Workshop Biometrics and E-Authentication over Open Networks. 30-31 March 2005, Gaithersburg, MD, USA.
16. Pennebaker W.B., Mitchell J.L., Langdon G.G., Arps R.B., // IBM Journal of research and development, Vol.32, No.6, November 1988, pp. 771-726.
17. Prokhorov V.G. Using Kohonen maps to accelerate fractal image compression // Applied Software, № 2, 2009 — S. 7.
18. Shannon C.E. Prediction and entropy of printed English”. Bell System Technical Journal, 1951, pp.50-64
19. Smith B., Rowe L. // Computer Graphics and applications. September 1993.
20. Suzanne Bunton On-Line Stochastic Processes in Data Compression // University of Washington; 1996
21. Sven Ole Aase "Image subband coding artifacts:analysis and remedies"// The department of electrical and computer engineering of the norwegian institute of technology; March 1993
22. Terry A. Welch. A Technique for High-Performance Data Compression, Computer, 17, N° 6, 1984, pp. 8-19.
23. Trac Duy Tran "Linear phase perfect reconstruction filter banks: theory, structure, design, and application in image compression " // university of Wisconsin — madison 2009
24. Umnyashkin S. V. Mathematical methods and algorithms for digital image compression using orthogonal transformation, Abstract, 2001 — 569 pp.
25. Vaddella, Venkata Rama Prasad; Inampudi, Ramesh Babu. A novel approach for iris recognition using texture features and K-means clustering technique [Электронный ресурс] // Journal of Applied Computer Science & Mathematics. – 2010. – № 9(4). – Suceava. – Режим доступа: http://jacs.usv.ro/getpdf.php?paperid=9_3

26. Vivek K Goyal "Beyond Traditional Transform Coding"// Engineering|Electrical Engineering and Computer Sciences in the graduate division of the university of California, berkeley, 1999.
27. Wallace G.K. // Communication of ACM. Volume 34. Number 4 April 1991.
28. Barnsley, Michael F., Sloan, Alan D., Iterated Systems, Inc. Methods and apparatus for image compression by iterated function system. United States Patent 4941193, July 10, 1990

РОЗДІЛ 4

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ОСОБИСТОСТІ ПО ЗОБРАЖЕННЯ РАЙДУЖНОЇ ОБОЛОНКИ ОКА

4.1. Методика і програмно-апаратне забезпечення проведення експериментального дослідження системи

Програмне забезпечення створено у вигляді двох функціональних модулів, кожен з яких відповідає за окремий етап роботи системи.

Модуль реєстрації реалізує такі операції:

- фіксація зображення райдужної оболонки ока;
- визначення її внутрішніх та зовнішніх меж;
- приведення зображення до уніфікованого формату шляхом нормалізації;
- аналіз текстури райдужки з подальшим формуванням шаблону та його збереженням у базі даних.

Модуль ідентифікації виконує:

- отримання зображення ока користувача;
- локалізацію області райдужки;
- нормалізацію зображення для подальшого аналізу;
- побудову шаблону ознак та його порівняння з еталонними записами в базі даних з метою встановлення відповідності.

Розроблена модель в програмному середовищі matlab.

Система складається з наступних основних модулів:

- модуля обробки зображень;
- модуля аналізу властивостей зображення райдужної оболонки;
- модуля управління базою даних системи ідентифікації;
- модуля ідентифікації;
- модуля верифікації.

Умови проведення експерименту : в базі зберігається 3000 зображень очей різних людей, з яких по 32 зображення відносяться до однієї людини. Таким чином загальна кількість зображень $32 \times 3000 = 96000$ зображень.

Отримуємо код РОО 32 зображень однієї людини без спотворень, де буде враховуватися тільки інструментальна помилка. Отримаємо код РОО з урахуванням спотворень при повороті зображення ока на ± 10 з кроком 2 і урахуванням спотворень по зменшенню яскравості зображення на 80%, таким чином маємо 640 зображень аутентичних РОО.

Загальна кількість зображень аутентичних РОО для експерименту буде складати 672.

Визначимо статистичну характеристику $FAR = 10^{-3}$ яку використовував Дж.Даугман в своїх роботах[1].

За методикою наведеною в звіті професора Дж.Даугмана [1] розрахуємо вірогідність достовірної ідентифікації P_N в залежності від кількості користувачів

$$P_N = (1 - FAR)^N \quad (4.1)$$

де N - кількість зареєстрованих користувачів в базі користувачів в базі.

Взяли 672 зображення користувачів і із виразу (4.1) отримуємо $P_N = 0,9934$. Таким чином з 672 експериментів ми повинні отримати 667 позитивних рішень.

4.2. Вибір параметрів фільтрів

Вибір параметрів фільтрів проводився таким чином, щоб досягти найкращої розділяє здатності ознак d . Для цього було взято 672 зображень райдужок. З кожного зображення отримані 32 спотворених зображень. При цьому використовувалася модель спотворень, описана в п. 2.5 цієї роботи.

У даному розділі представлено результати оцінювання роздільної здатності ознак (показника d), отриманих на основі фазової відповіді вейвлетів Габора за різних параметрів фільтрації. Як видно з рис. 4.1, максимальне значення d для ознак, побудованих за допомогою фільтрів Габора, досягається при структурі коду розміром 56×360 блоків на певній частоті зрізу $\omega_0 = \frac{\pi}{32}$. Для порівняння,

оптимальна роздільна здатність при використанні модифікованого DoG-фільтра також спостерігається при розмірі коду 56×360 та значенні $\sigma = 0,1$.

На рис. 4.2 та 4.3 подано полігони частот нормованих відстаней Хеммінга при зміні параметрів фільтрів Габора, зокрема їх орієнтації. Експериментальні результати демонструють, що найкращу роздільну здатність забезпечує орієнтація $\theta = 0$.

Додатково, на рис. 4.4 наведено полігони частот відстаней Хеммінга для кодів, сформованих із використанням різних типів фільтрів. Слід підкреслити, що ці результати отримано виключно для зображень райдужної оболонки однієї особи. Синя крива відображає результати попарного порівняння спотворених варіантів однієї райдужки, тоді як червона — порівняння цих самих варіантів із зображеннями райдужок інших осіб. Аналіз графіків засвідчує високу індивідуальну роздільність ознак для конкретного користувача.

4.3 Оцінка інформативності кода райдужки в залежності від параметрів фільтра

Оцінимо інформативність коду POO після фільтрації модифікованим DoG-фільтром де в якості міри інформативності приймемо ентропію бінарного коду.

Параметр який впливає на якість фільтрації модифікованим DoG-фільтром, це значення B в виразі (2.29). Яке може приймати значення від 10^{-3} до 0,99. В результаті кодування понад 500 зображень POO були отримані результати які приведені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1

Інформативність кода Irish

B	P_1	P_0	H
0,1	0,4974	0,5026	0,99998
0,2	0,4831	0,5169	0,999976
0,4	0,4787	0,5213	0,999691
0,55	0,5009	0,4991	0,9993

Ймовірність появи 1 і 0 в кодi позначаємо як P_1, P_0 , а ентропію H .

В зв'язку з тим що максимальне значення ентропії двійового коду наближається до 1, обираємо параметр $B=0,1$ в характеристики модифікованого DoG-фільтрі, для подальшого проведення експерименту.

4.4. Вибір розрядності кода РОО

Так як зараз населення землі 7.3×10^9 людей, то ймовірність співпадіння РОО буде $1,369 \times 10^{-10}$. Для впевненості, що код райдужки не буде повторюватися його розрядність повинна бути більша як 33 розряди. Тоді використовуємо, те що сучасні процесори мають 64 розряди і для виключення помилки переповнення розрядної сітки будемо використовувати 56 розрядів в одному стовпчику коду РОО, кількість стовпців буде відповідати кутовому дозволу 1° , тобто 360 стовпців. Загальна вірогідність повторення коду РОО буде визначатися як умовна ймовірність 56-ти розрядного кода з можливістю повторення в одному із 360 стовпчиків $P(2^{-56}|360)=4,996 \times 10^{-15}$.

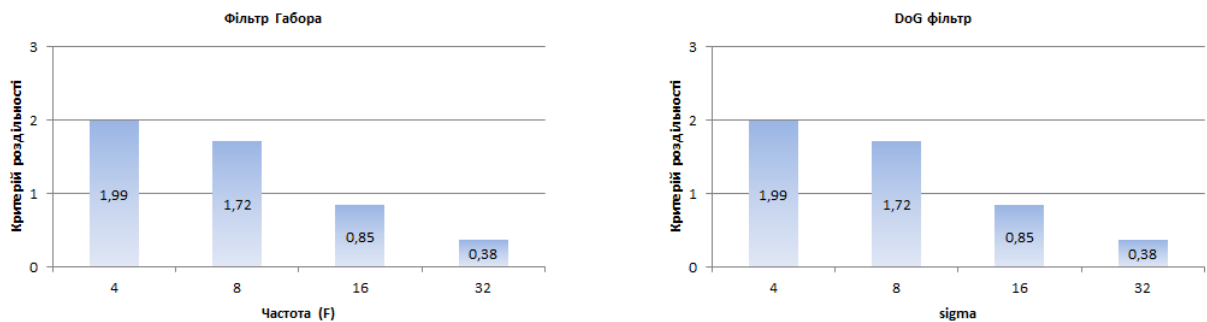
4.5. Результати експериментальних досліджень

У процесі експериментальних досліджень було проаналізовано середню чутливість ознак райдужної оболонки ока до різних типів перешкод. Зокрема, вивчено вплив повороту зображення, який імітує нахил голови під час зйомки. Результати свідчать, що на низьких та середніх частотах різниця між типами фільтрів у плані чутливості є незначною. Проте на високих частотах фільтри Габора демонструють нижчу чутливість до повороту. Водночас подальші експерименти показали, що використання високочастотних компонентів є малоефективним у задачах ідентифікації.

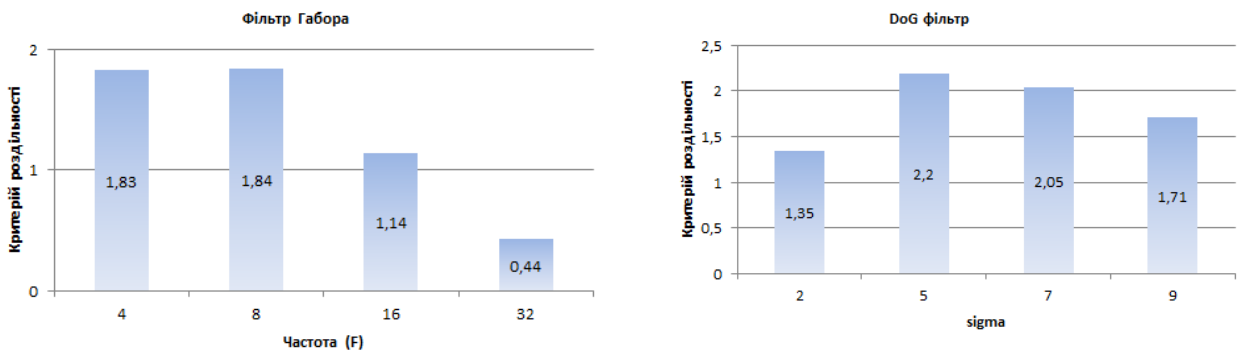
Також було досліджено стійкість до адитивного гаусового шуму при близьких параметрах фільтрів. За всіма дослідженими частотами фільтри Габора забезпечують вищу толерантність до шуму порівняно з іншими підходами. Однак на середніх частотах, які є оптимальними для побудови кодів райдужки, вплив шуму з реалістичними параметрами (середньоквадратичне відхилення у межах 1–3) є мінімальним і не суттєво впливає на результати ідентифікації.

Додатково, на основі отриманих даних можна зробити висновок, що оптимальні результати досягаються за умов використання фільтрів із середньочастотними характеристиками, які забезпечують компроміс між стійкістю до спотворень і збереженням інформативних ознак. Це дозволяє підвищити надійність систем біометричної ідентифікації навіть за наявності типових перешкод, таких як шум чи зміна положення голови користувача.

Розмір коду 56x360



Розмір коду 48x360



Розмір коду 32x360

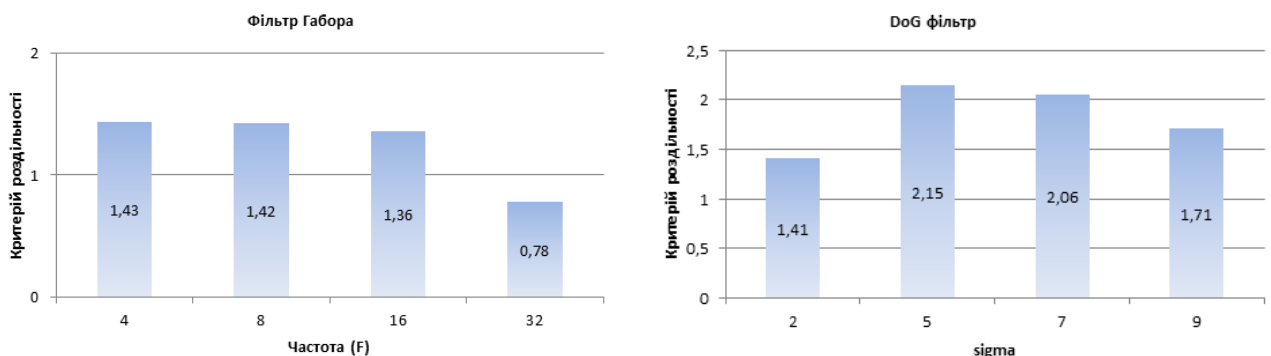
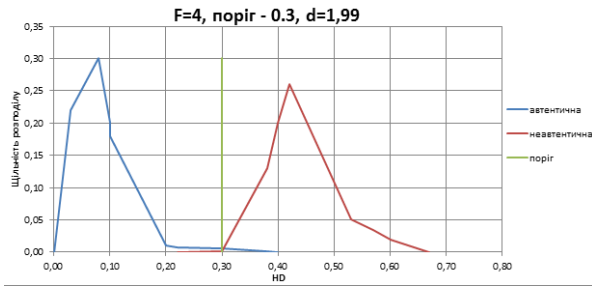


Рис. 4.1. Критерій розділяючої здатності систем ознак при різних значеннях частоти фільтрів Габора $\omega_0 = \frac{\pi}{32}$, значеннях $\sigma=0,1$ для DoG-фільтра і різній кількості блоків коду

Ознаки на основі фільтра Габора



Ознаки на основі DoG фільтра

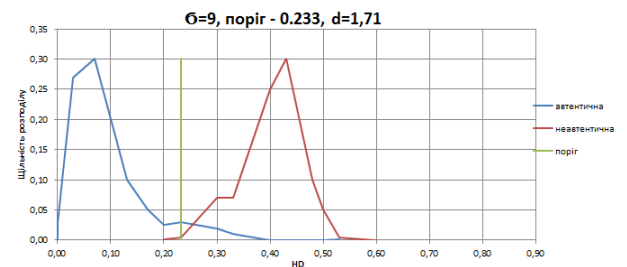
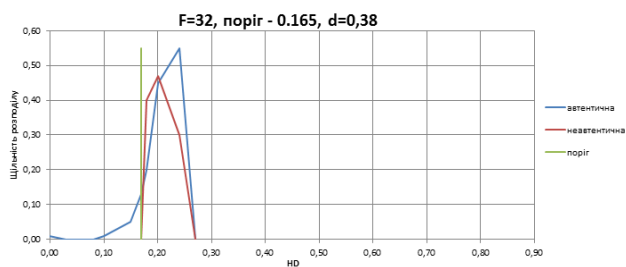
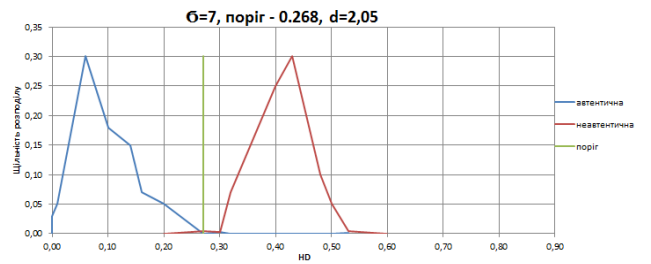
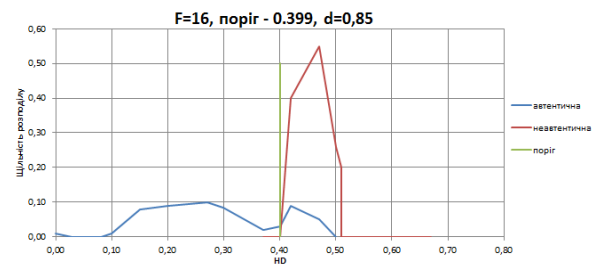
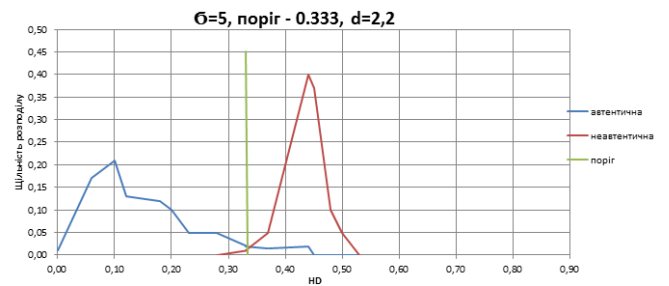
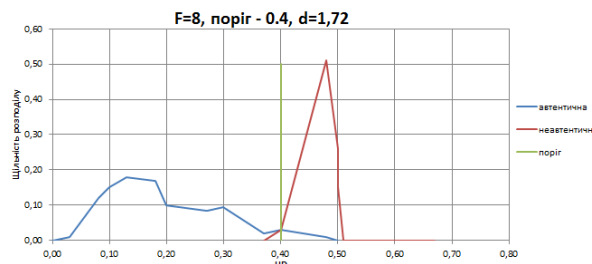
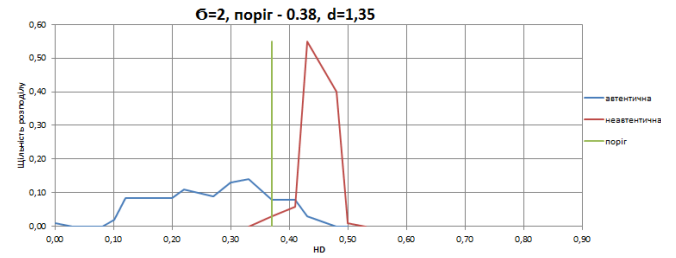


Рис. 4.2. Полігони частот відстаней Хеммінга для різних фільтрів

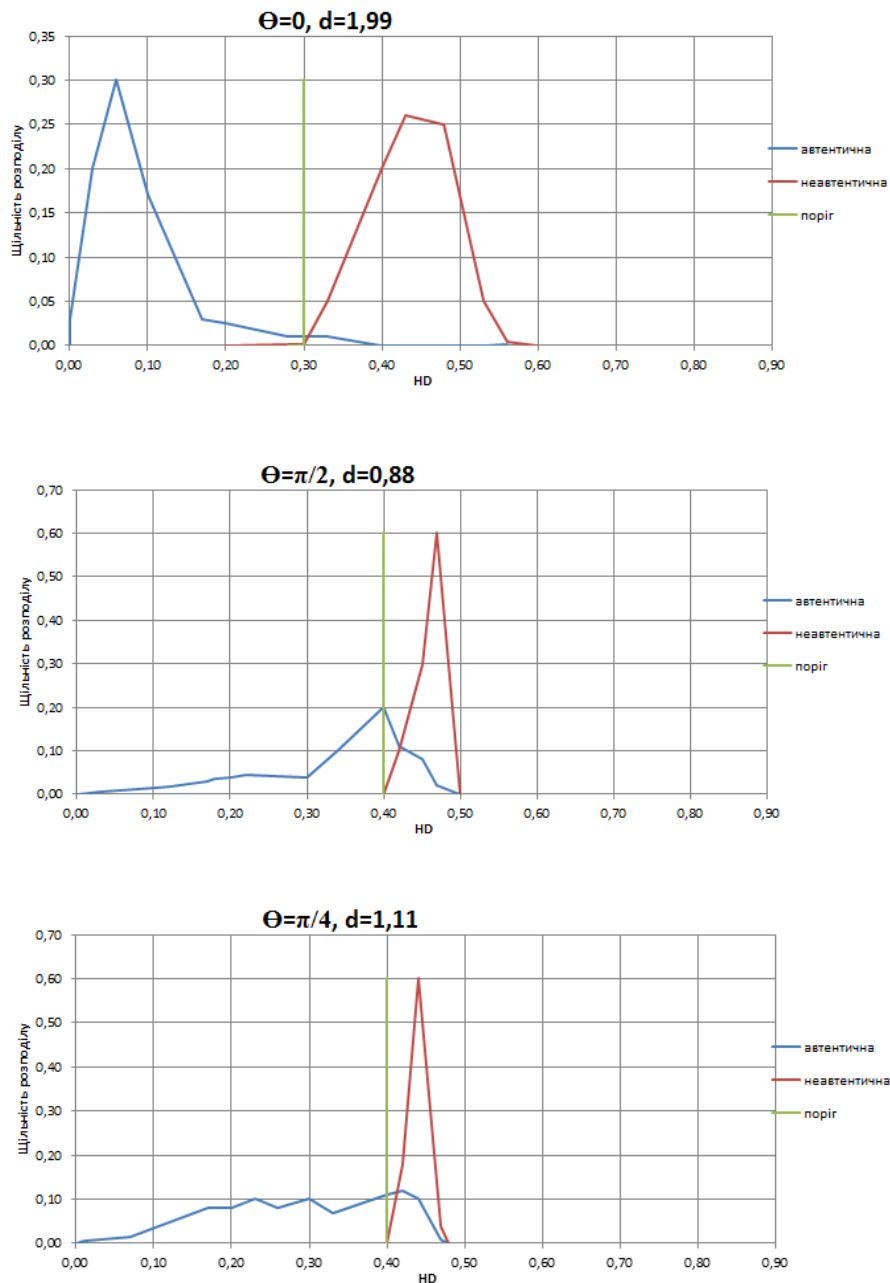


Рис. 4.3. Полігони частот відстаней Хеммінга для фільтрів Габора мають різну орієнтацію

Експерименти показали, що система ідентифікації майже не чутлива до лінійних змін яскравості та контрасту зображення як при використанні фільтрів Габора, так і DoG-фільтрів.

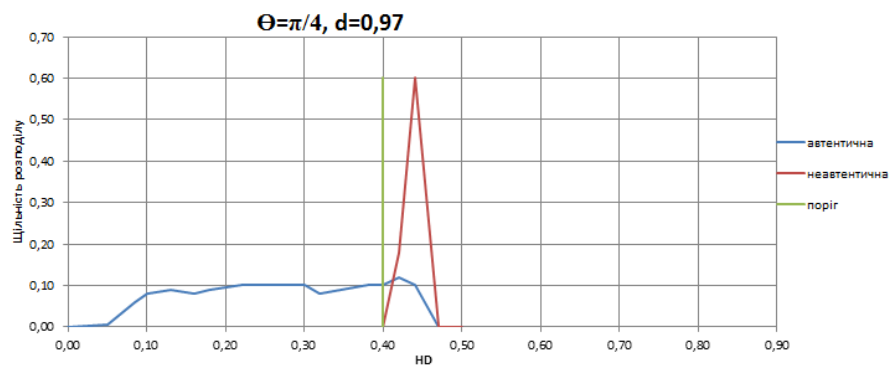
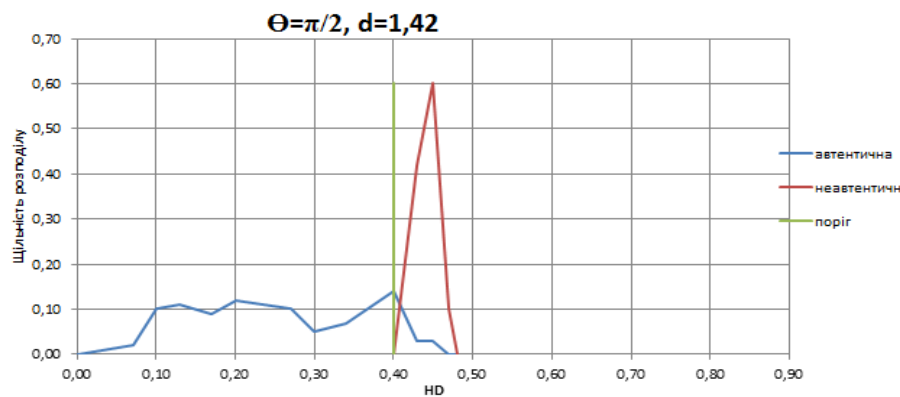
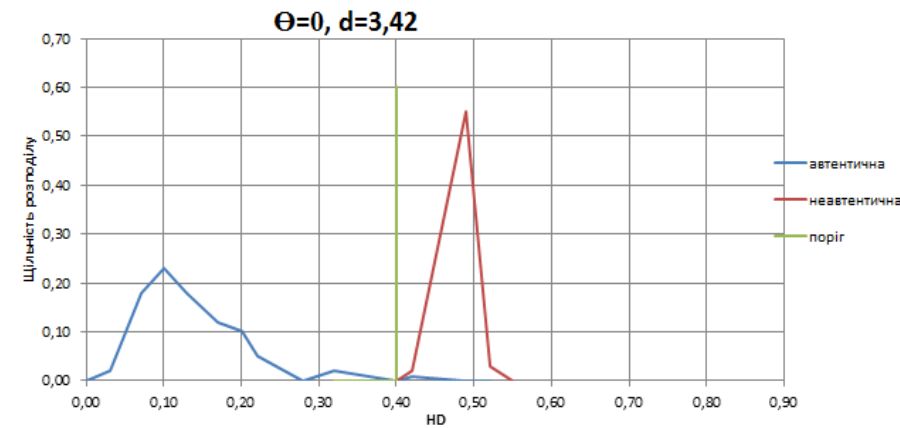


Рис. 4.4. Полігони частот відстаней Хеммінга для фільтрів Габора мають різну орієнтацію, побудовані для зображень райдужної оболонки однієї людини

4.6. Верифікація отриманих результатів

Для оцінки надійності визначення роздільної здатності системи ознак, використаної у даному дослідженні, було проаналізовано достовірність статистичних параметрів, що входять до складу цієї формули. Йдеться про

математичні сподівання та середньоквадратичні відхилення нормалізованих відстаней Хеммінга, обчислені окремо для пар однакових і різних райдужних оболонок.

У роботі [12] наведено підхід до оцінювання достовірності статистичних оцінок, зокрема для дисперсії та середнього значення. Відповідно до цього підходу, оцінка математичного сподівання є нормально розподіленою випадковою величиною з параметрами, що залежать від вибіркового середнього та вибіркової дисперсії. Це дозволяє побудувати довірчі інтервали для визначення точності розрахунку критерію роздільності та робить можливим кількісне оцінювання впевненості у отриманих результатах.

$$M(\tilde{\mu}) \approx \tilde{\mu}; D(\tilde{\mu}) \approx \frac{\tilde{\sigma}^2}{n}, \quad (4.1)$$

де n – кількість реалізації.

Оцінка дисперсії $\tilde{\sigma}^2$ за нормальним законом:

$$M(\tilde{\sigma}) \approx \tilde{\sigma}; D(\tilde{\sigma}^2) \approx \frac{2}{n-1} \tilde{\sigma}^4. \quad (4.2)$$

У кожному експерименті виконано 672 порівняння ідентичних та 672 порівняння різних райдужок. Цього достатньо, щоб знехтувати похибкою оцінок математичного очікування та дисперсії відстані Хеммінга. Для ознак, отриманих за допомогою DoG-фільтра, абсолютна похибка математичного очікування склала $\approx 10^{-4}$, а дисперсії — $\approx 10^{-7}$, що є несуттєвим при точності до другого знака після коми. Отже, значення критерію d у такому форматі можна вважати достовірними. Аналогічний висновок справедливий і для інших експериментів.

Провівши експеримент порівняння швидкодії роботи інтегрально – диференціальний методу і удосконаленого методу, можемо констатувати той факт що удосконалений метод в 13,5 раз швидше виділяє межі.(рис 4.6), зауважимо що порівняння проводилося в середовищі Matlab 2016, на Fujitsu lifebook sh531 RAM 4 Gb.

Додатково, удосконалений метод не лише пришвидшує процес, а й демонструє стабільні результати навіть за умов змін освітлення та незначних

шумів у зображенні. Це робить його придатним для використання в системах біометричної ідентифікації в реальному часі, де обмеженість обчислювальних ресурсів є критичним фактором.

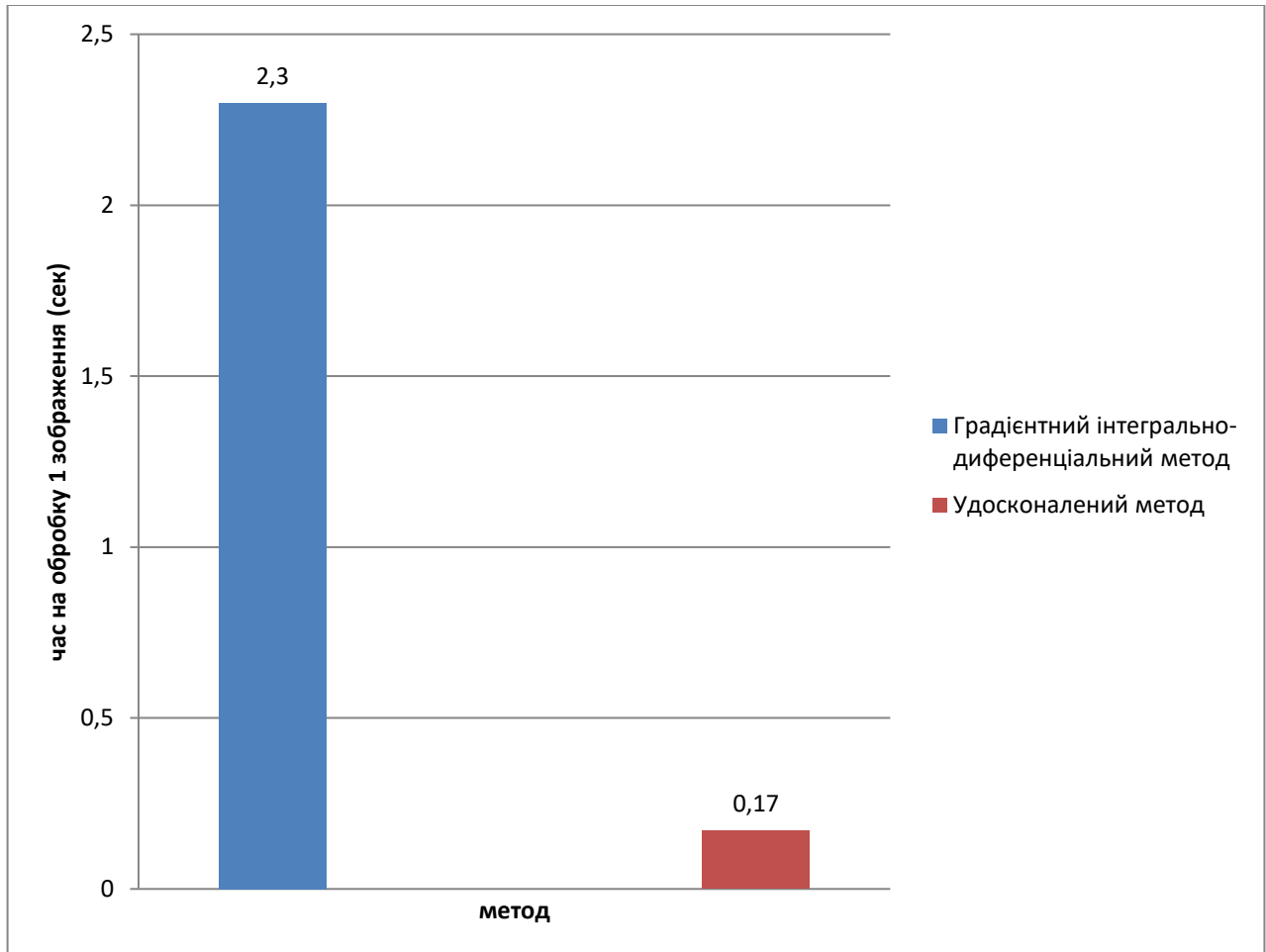


Рис 4.5 Порівняння швидкодії інтегрально – диференціального методу і удосконаленого методу

Використання DoG-фільтра в запропонованому методі не тільки дає змогу чітко бінаризувати зображення POO за допомогою АЧХ-апроксимації даного фільтра, а і дає вигреш в часі. Провівши експериментальне порівняння швидкодії фільтра Габора і АЧХ-апроксимації DoG-фільтра можемо констатувати, що використання запропонованого фільтра дає вигреш в часі трішки більше ніж 20 разів, ілюстрація даного факту приведена на рис 4.6, зазначимо що порівняння проводилося в середовищі Matlab 2016, на Fujitsu lifebook sh531 RAM 4 Gb.

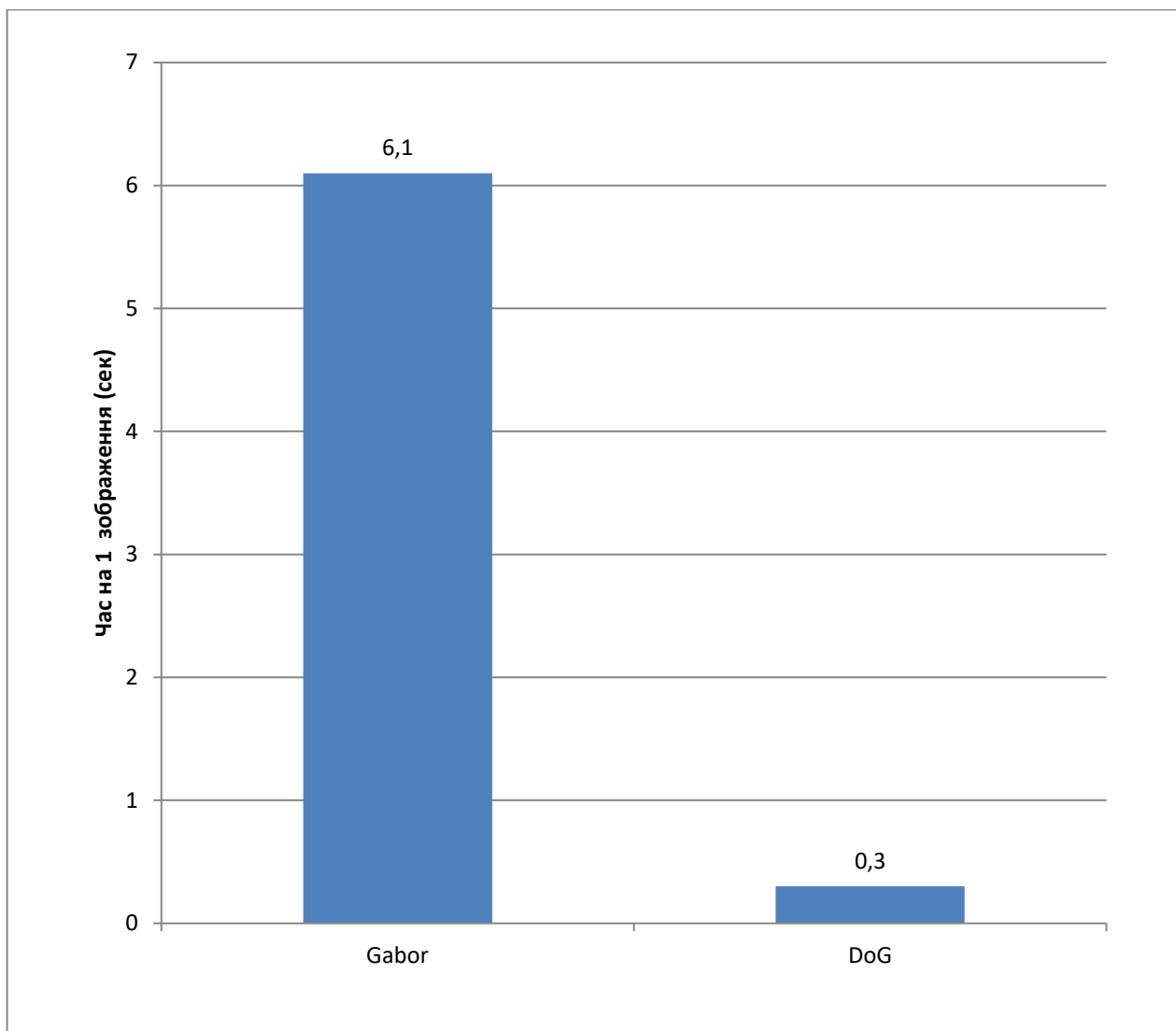


Рис. 4.6 Порівняння швидкодії фільтрів

Так як уже згадувалося вище в ході виконання даної роботи вдалося зменшити об'єм БД еталонів (рис 4.7), такого результату вдалося досягти завдяки реалізації методу ідентифікації без еталонного зображення.

В таблиці 4.2(а) приведено порівняння об'єму БД еталонів згідно міжнародного стандарту ISO/IEC 19794-6:2011 і об'єму БД еталонів, якщо використовувати підхід який пропонується в даній роботі, тобто з використанням DoG-фільтра і запису КР і порогу в БД і не зберігати еталонне зображення РОО, тобто використання запропонованого підходу зменшить об'єм БД в 25 раз, даний факт несе за собою і зменшення матеріальних витрат на дороге обладнання для зберігання інформації (зображень РОО) і зменшення часу пошуку по самій БД.

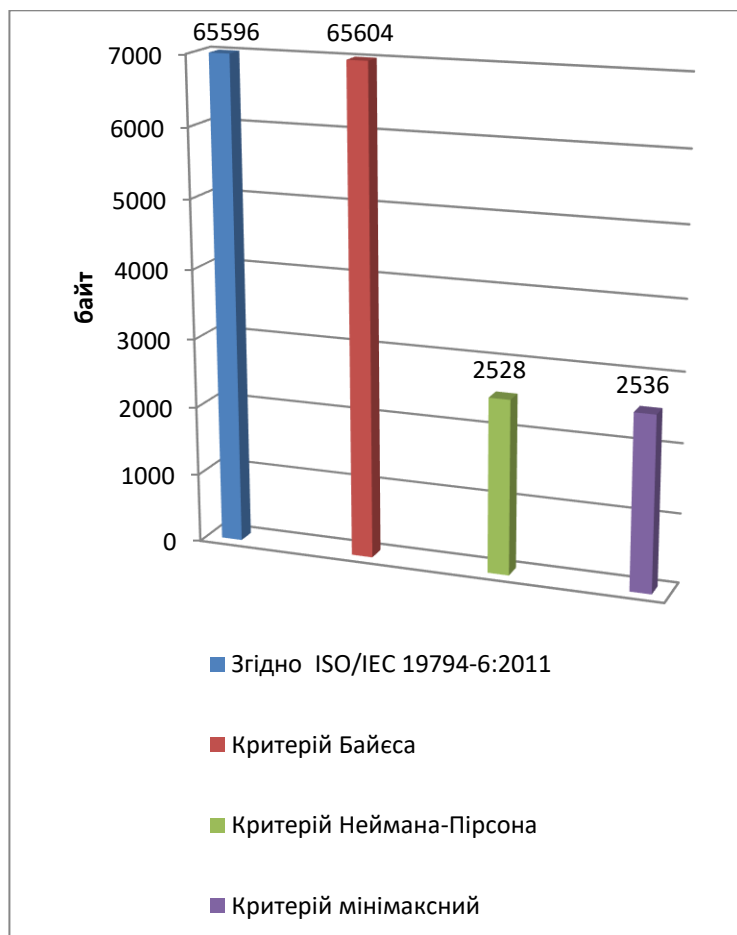


Рис 4.7 Порівняння об'єму БД згідно ISO/IEC 19794-6:2011 і при використанні статистичних критеріїв

Таблиця 4.2(а)

Залежність обсягу бази даних від статистичного критерію

Об'єм бази даних на одного користувача				
Згідно ISO/IEC 19794-6:2011		65596 байт		Зменшення об'єму
Критерій	Байєса	65604 байт	немає	
	Неймана-Пірсона	2528 байт	В 25 раз	
	Мінімаксний	2536 байт	В 25 раз	

Також був проведений експеримент для оцінки якості роботи запропонованого методу, результати приведені в таблиці 4.2(б).

Детальний опис розрахунку наведений у технічному звіті Дж.Даугмана за 2010р.[15].

Таблиця 4.2(б)

Результат експериментальних досліджень
 $FAR=10^{-3}, P_N=0,9934, N=672$

Параметр	Метод Дж.Даугмана	Запропонований метод
FRR	0,008±0,0014	0,008±0,0014
FAR	0,0012	0,0012
Вимір'яне P_N	0,99553±0,006	0,99702±0,0446

Отже, можна зробити висновок, що запропонований метод і існуючий метод Дж.Даугмана по якісним показникам майже однакові.

4.7. Висновки до четвертого розділу

У результаті експериментальних досліджень, проведених у рамках даної роботи, було отримано такі ключові висновки:

Для фільтрів Габора з фіксованими параметрами оптимальною виявилася конфігурація з розміром коду 56×360 блоків. У цьому випадку критерій роздільності ознак досяг значення $d = 1.99$, що свідчить про прийнятну ефективність ознак.

Під час експериментів з модифікованими DoG-фільтрами було встановлено, що найкращий результат досягається при параметрі $\sigma = 0.1$ і такій же розмірності коду (56×360 блоків). Відповідне значення критерію якості становило $d = 2.20$, що вказує на вищу роздільну здатність.

Порівняльний аналіз показав, що ознаки, сформовані з використанням DoG-фільтра, забезпечують кращу сегментацію класів, ніж ті, що побудовані на основі фільтрів Габора.

Щодо стійкості до повороту зображення, нормалізована відстань Хеммінга для кодів, отриманих за допомогою DoG-фільтра, виявилась подібною до чутливості кодів, побудованих з використанням фільтрів Габора.

Аналіз впливу адитивного гаусового шуму показав, що коди на основі DoG-фільтра дещо більш чутливі до завад у порівнянні з кодами на основі Габора. Проте, при характерних рівнях шуму, які спостерігаються в реальних умовах, цей вплив є незначним і не погіршує результати ідентифікації.

Обидва підходи — як на основі DoG-фільтра, так і фільтрів Габора — демонструють високу стійкість до лінійних змін яскравості та контрасту зображення, що є важливою властивістю для практичного застосування в біометричних системах. В експериментальній частині роботи були отримані наступні результати:

Список використаних джерел у четвертому розділі

1. Daugman J.G. Biometric decision landscapes Technical Report, Number 482, Computer Laboratory, UCAM-CL-TR-482, ISSN 1476-2986
2. Daugman J.G. Two-dimensional spectral analysis of cortical receptive field profiles. // Vision research, vol. 20, no. 10, pp. 847-856, 1980.
3. Daugman J.G. Uncertainly relation for resolution in space, spatial frequency, and orientation optimized by two-dimensional visual cortical filters. // J. Opt. Soc. Am. A, vol. 2, no. 7, pp. 1160-1169, 1985.
4. Image Processing Toolbox, Users Guide, Version 4 [2003], The MathWorks, Inc., Natick, MA.
5. Daugman J. High condence personal identification by rapid video analysis of iris texture // Proc. IEEE Internat. Carnahan conf. on security technology, 1992. P. 50-60.
6. Daugman J. High condence visual recognition of persons by a test of statistical independence // IEEE TPAMI. 1993. V.15. N.11. P.11481161.
7. Daugman J. How iris recognition works // Proc. IEEE Trans. Circ. Syst. Video Technol. 2004. V.14. N.1. P.21-30.
8. Daugman J., Malhas I. Iris recognition border crossing system in UAE // Biometrics. 2004. V.44. N.2. P.49-53.
9. Daugman J. New methods in iris recognition // IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics. Part B: Cybernetics. 2007. V.37. P.1167-1175.
10. Iridian Technologies, Panasonic Authenticam Iris Recognition Camera, September 20, 2001
11. Web-enabled image processing operators. <http://matlabserver.cs.rug.nl/> [электронный ресурс]. URL: [http://matlabserver.cs.rug.nl/edgedetectionweb /web/edgedetection_params.html](http://matlabserver.cs.rug.nl/edgedetectionweb/web/edgedetection_params.html).(13.10.2016)
12. Вентцель В.С., Овчаров Л.А. Теория вероятностей и ее инженерные приложения. - М.: Наука. Гл. ред. Физ.-мат. Лит. – 1988
13. Ihamsi M., Rasouli A. An Innovative Trapezium Normalization for Iris Recognition Systems // Proc. Int. Conf. Computer and Software Modeling. 2011. V.14. P.118-122.

14. IEEE transactions on circuits and systems for video technology, vol. 14, no. 1, January 2004
15. Daugman J (2000) "Biometric decision landscapes." Technical Report No. TR482, University of Cambridge Computer Laboratory.
16. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. – М.: Техносфера, 2005г. – 1070с.
17. <http://www.cg.info.hiroshima-cu.ac.jp/~miyazaki/knowledge/teche01.html>
18. http://software.intel.com/sites/products/documentation/hpc/ipp/ippi/ippi_ch6/ch6_color_models.html
19. Anuj B., Rashid A. Image compression using modified fast Haar wavelet transform // World Applied Sciences Journal. – 2009. – V. 7. – № 5. – P. 647–653.
20. Капелюшний А.О., Красношарпа Б.І. Вейвлет-аналіз сигналів та зображень: теорія і застосування. – Київ: КНУ, 2012. – 120 с.
21. Чорний В.С., Степаненко О.І. Цифрова обробка сигналів із застосуванням вейвлет-перетворення. — Львів: Видавництво ЛНУ, 2010. — 92 с.
22. Unser, M., Aldroubi, A., & Laine, A. F. Wavelets in Medical Imaging: Signal Processing and Beyond. // Proceedings of the IEEE, 84(4), 1996, pp. 626–638.
23. Senthilkumaran N. A. Study on Edge Detection Methods for Image Segmentation // N. Senthilkumaran, R. Rajesh // Proceedings of the International Conference on Mathematics and Computer Science (ICMCS-2009). – 2009. – Vol. 1. – P. 255–259.
24. Huang C.P. An Integrated Edge Detection Method Using Mathematical Morphology / C.P. Huang, R.Z. Wang // Pattern Recognition and Image Analysis. – 2006. – Vol. 16. – No. 3. –P. 406–412.
25. Dayan P. Theoretical Neuroscience: Computational and Mathematica Modeling of Neural Systems / P. Dayan, L.F. Abbot. – Cambridge: MIT Press, 2001. – 576 p.
26. Петренко О.В. Цифрова обробка зображень. Теорія та практика. — К.: НАУ, 2015. — 212 с.
27. Shi, J., & Malik, J. Normalized cuts and image segmentation // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, Vol. 22, No. 8, pp. 888–905. Bowyer K.W., Hollingsworth K., Flynn P.J. A Survey of Iris Biometrics Research: 2008-2010, in

Handbook of Iris Recognition, Mark Burge and Kevin W. Bowyer, editors, Springer, 2012.

28. Boyd M., Carmaciu D., Giannaros F., et al. MSc Computing Science Group Project Iris Recognition. Imperial College, London. 2010.

29. Jain A. K. Fundamentals of Digital Image Processing. – Reprint ed. – Boston: Pearson, 2015. – 572 p. – ISBN 978-0133361650.

30. Кучер В.П., Циганок І.Г. Дистанційне зондування Землі: Основи, методи та застосування. — К.: Наукова думка, 2012. — 456 с. ISBN 978-966-00-1221-5.

31. Ballard, D. H. "Generalizing the Hough Transform to Detect Arbitrary Shapes." Pattern Recognition, 13(2), 1981, pp. 111–122. DOI: 10.1016/0031-3203(81)90009-1

32. Xu, L., Oja, E., & Kultanen, P. "A New Curve Detection Method: Randomized Hough Transform (RHT)." Pattern Recognition Letters, 11(5), 1990, pp. 331–338.

33. Steger, C. "An Unbiased Detector of Curvilinear Structures." IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 20(2), 1998, pp. 113–125.

34. Yuen, H. K., Princen, J., Illingworth, J., & Kittler, J. "Comparative Study of Hough Transform Methods for Circle Finding." Image and Vision Computing, 8(1), 1990, pp. 71–77.

35. Pitas, I. Digital Image Processing Algorithms and Applications. Wiley. — 2000, 408 p. ISBN: 978-0471377399

36. Abhyankar A., Hornak L.A., Schuckers S. Biorthogonal wavelets based Iris Recognition // Proc. SPIE Conf. Biometric Technology for Human Identification. 2005. V.5779.

37. Abiyev R.H., Altunkaya K. Neural Network Based Biometric Personal Identification // Lecture Notes in Computer Science Volume 4669, 2007, pp 554-563

38. Canny J. A computational approach to edge detection // IEEE TPAMI. 1986.V.8. N.6. P.679-698.

39. Chen Y., Adjouadi M., Han C., Wang J., Barreto A., Rische N., Andrian J. A highly accurate and computationally efficient approach for unconstrained iris segmentation // Image and Vision Computing. 2010. V.28. P.261-269.

40. Czajka A., Piech K. Secure Biometric Verification Station Based on Iris Recognition // J. Telecommunications and Information Technology. 2012. N.3. P.40-49.
41. Czajka A., Pacut A. Iris Recognition System Based on Zak-Gabor Wavelet Packets // J. Telecommunications and Information Technology. 2010. N.4.P.10-18.
42. Fenker S.P., Ortiz E., Bowyer K.W. Template Aging Phenomenon in Iris Recognition // Access, IEEE, V.1, Biometrics Compendium. 2013. P.266274.
43. Feddaoui N., Mahersia H., Hamrouni K. Improving Iris Recognition Performance Using Quality Measures // Advanced Biometric Technologies: Chapter 12. Edited by Girija Chetty and Jucheng Yang. 2011. 382 p.
44. Fernandez C., Perez D., Segura C., Hernando J. A Novel Method for Low-constrained Iris Boundary Localization // Proc. 5th IAPR Int. Conf. Biometrics. 2012. P.291-296.
45. Galbally J., Ortiz-Lopez J., Fierrez J., Ortega-Garcia J. Iris liveness detection based on quality related features // Proc. 5th IAPR Int. Conf. Biometrics, March 29 2012-April 1, 2012. P.271.
46. Guang-zhu X., Zai-feng Z., Yi-de M. A novel and efficient method for iris automatic location // J. China University of Mining and Technology. 2007. V.17. P.441-446.

ВИСНОВКИ

Результатом виконаної роботи є розв'язання актуальної наукової задачі розробки й дослідження методів обробки даних (зокрема, процедур попередньої обробки) для систем ідентифікації та аутентифікації користувачів на основі біометричних характеристик людського ока, які використовуються на об'єктах критичної інфраструктури.

У процесі виконання дисертації отримані такі вагомі результати:

1. На основі проведеного аналізу сучасних підходів, методів і систем біометричної ідентифікації користувачів обрано один з найбільш надійних методів ідентифікації та аутентифікації, а саме ідентифікація по райдужній оболонці ока, який по сукупності якостей має вагомі переваги перед іншими, а також має великі перспективи застосування в СКУД.

2. Удосконалено інтегрально–диференціальний метод локалізації зображення райдужної оболонки ока, який за рахунок удосконаленого алгоритму локалізації ока на зображенні, дозволяє зменшити область пошуку меж райдужної оболонки та знизити обчислювальні витрати при збереженні високої точності методу та підвищує швидкодію в 13,5 раз.

3. На основі запропонованого алгоритмічного рішення розроблено метод кодування РОО при застосуванні модифікованого DoG–фільтра, що дало можливість підвищити швидкодію в 20 разів для попередньої обробки зображень РОО завдяки отриманню однозначного бінарного кода, що в свою чергу дало можливість зменшити об'єм БД в 25 разів.

4. Розроблено метод прийняття рішень для систем біометричної ідентифікації і аутентифікації з використанням статистичного критерію Неймана–Пірсона на основі КР без еталонного зображення РОО з використанням нормованої відстані Хеммінга.

5. У роботі запропонована система ідентифікації та аутентифікації користувача без еталонного зображення райдужки (складається з двох програмних модулів), за допомогою застосування бінарного коду райдужки (фазові відгуки

DoG-фільтра) і нормованої відстані Хеммінга з використанням статистичного критерію Неймана-Пірсона, що дало змогу зменшити об'єм бази даних систем контролю і управління доступом, що в свою чергу зменшує час доступу до неї.

Розроблені програмні засоби і проведено експериментальне дослідження програмних модулів з ціллю оцінки швидкодії та оцінки об'єму БД СКУД, що підтвердило придатність розроблених методів для захисту таких процедур та об'єктів критичної інфраструктури, як захист входу в комп'ютерну систему; прикордонний контроль; контроль доступу; протидія тероризму; Інтернет-безпека тощо.

Додаток А. Лістинги (коди) програмних модулів

```
% Виділення меж РОО і фільтрація і кодування
clear all; clc;
sigma=0.1;
[filename,PathName] = uigetfile('*.','Select the file
iris');file=fullfile(PathName,filename);
RGB=imread(file); s=size(size(RGB));

% дізнаємося палітру зображення
if s(1,2)==3 I=rgb2gray(RGB);
else I=RGB;
end

figure; imshow(I);
[n,m]=size(I);
% [X, Y] = meshgrid(1:m,1:n);
% figure;mesh(X, Y, I); colormap(gray);
% clock
% размытие изображения
len = 20; % порядок фільтра
band = 0.000025; % полоса пропускання діапазон от 0 до 1
b=fir1(len,band); h=ftrans2(b); I=im2double(I);
If=filter2(h,I); figure; imshow(If);
tic; disp(' ');
for r=1:n
    for c=uint16(m/2):-1:3
        dI(r,c)=((-3*If(r,c)+4*If(r,c-1)-If(r,c-2))/2);
        if dI(r,c)<0 diI(r,c)=0; %dI(r,c)-55;
        else diI(r,c)=dI(r,c);
        end
    end
end
for r=1:n
    for c=uint16((m/2)-1):m-2
        dI(r,c)=((-3*If(r,c)+4*If(r,c+1)-If(r,c+2))/2);
        if dI(r,c)<0 diI(r,c)=0; %dI(r,c)-55;
        else diI(r,c)=dI(r,c);
        end
    end
end
end
% toc; disp(' ');
diI=(diI./max(max(diI))).*25;
toc; disp(' ');
```

```

level = graythresh(diI); diI1 =
255*uint8(im2bw(diI,level));
% figure; imshow(diI);
figure; imshow(diI1);
% отримання області РОО і виділення меж РОО
[x,y] = ginput(3); x=fix(x); y=fix(y);

dx1=x(2)-x(1); dy1=y(2)-y(1); r1=fix(sqrt(dx1^2+dy1^2));
dx2=x(3)-x(1); dy2=y(3)-y(1); r2=fix(sqrt(dx2^2+dy2^2));
% r2=r1+56;
f=1:360; z1=x(1)+y(1)*j+r1*exp(j*f*pi/180);
z2=x(1)+y(1)*j+r2*exp(j*f*pi/180);
figure; imshow(I);
hold on; hPlot=plot(z1); set( hPlot, 'LineWidth', 3);
set(hPlot,'Color','blue');
hold on; hPlot=plot(z2); set( hPlot, 'LineWidth', 3);
set(hPlot,'Color','blue');
% перетворення РОО із полярної системи в декартову
dr=1;
for r=r2:-1:r1
    [X, Y] = pol2cart(0:pi/180:2*pi,r);
    X=X+x(1); Y=Y+y(1); X=fix(X); Y=fix(Y);
    for y1=1:361
        Z(dr,y1)=I(Y(y1),X(y1));
    end
    dr=dr+1;
end
figure; imshow(Z);
% фільтрація DoG фільтром і бінарне кодування РОО
d=1; k=1.6; delta=0.25; % delta=0.25 - маска 9x9;
delta=0.45 - маска 5x5
sigma1=k*sigma;
X2= -d:delta:d; Y2= -d:delta:d;
[X2, Y2] = meshgrid(-d:delta:d, -d:delta:d);
Z2=exp(-(X2.^2+Y2.^2)/(2*sigma^2))*1/(2.506*sigma);
Z3=exp(-(X2.^2+Y2.^2)/(2*sigma1^2))*1/(2.506*sigma1);
Z4=Z2-Z3; fZ=fft2(Z4);
figure;subplot(1,2,1);mesh(X2, Y2, Z4); title('Амплитудно-
частотна характеристика');
subplot(1,2,2); mesh(X2,
Y2,abs(fftshift(fZ)));title('Імпульсна характеристика');
DoG=conv2(Z,fZ); fiDoG=angle(DoG); [n,m]=size(fiDoG);
for a=1:n
    for b=1:m
        if fiDoG(a,b)<0

```

```

        fi(a,b)=1;
    else
        fi(a,b)=0;
    end
end
end

[n,m]=size(fi); %fi=fi(1:56,1:360);
kol_1=0; kol_0=0; vsego=n*m; %vsego=56*360;
for a=1:n
    for b=1:m
        if fi(a,b)==1
            kol_1=kol_1+1;
        else
            kol_0=kol_0+1;
        end
    end
end
end
p1=kol_1/vsego; p0=kol_0/vsego;
format long; H=(-p1*log2(p1))+(-p0*log2(p0));
figure; imshow(fi);

```

```

function varargout = GaborFilterDesign
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',       mfilename, ...
                  'gui_Singleton',   gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn',  @GaborFilterDesignn_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn',  @GaborFilterDesignn_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn',   [] , ...
                  'gui_Callback',    []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end
if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State,
varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
% End initialization code - DO NOT EDIT
% --- Executes just before GaborFilterDesignn is made
visible.
function GaborFilterDesignn_OpeningFcn(hObject, eventdata,
handles, varargin)
% This function has no output args, see OutputFcn.
% hObject    handle to figure
% handles    structure with handles and user data (see
GUIDATA)
% varargin   command line arguments to GaborFilterDesignn
(see VARARGIN)
% Choose default command line output for GaborFilterDesignn
handles.output = hObject;
% Update handles structure
guidata(hObject, handles);
% This sets up the initial plot - only do when we are
invisible
% so window can get raised using GaborFilterDesignn.
if strcmp(get(hObject,'Visible'),'off')
    imagesc(peaks(200));
    text(100,20,'Gabor filter visual
GUI','FontSize',28,'FontName','Castellar','HorizontalAlignm
ent','center','FontWeight','Bold');

```

```

    Str_array={'1) Define the filter, by changing the
Mother Gabor parameters' or, by loading a previoly saved
filter', ' (you can view your filter in both time and
frequency domains)', ...
    '2) Load an image', '3) Finally, apply the
filter', '4) Using the "Show" and "Filtered Image" ', ...
    ' button combination you can see the resulting
image... '};
    text(10,80,Str_array,'FontSize',20,'FontName','Kartika');
    text(20,180,'\copyright olay
S.', 'FontSize',14,'HorizontalAlignment','center');
end
% UIWAIT makes GaborFilterDesignn wait for user response
(see UIRESUME)
% uiwait(handles.GaborFiltGUI);
% --- Outputs from this function are returned to the
command line.
function varargout = GaborFilterDesignn_OutputFcn(hObject,
eventdata, handles)
% varargout cell array for returning output args (see
VARARGOUT);
% hObject handle to figure
% handles structure with handles and user data (see
GUIDATA)
% Get default command line output from handles structure
varargout{1} = handles.output;
% -----
-----function FileMenu_Callback(hObject, eventdata,
handles)
% hObject handle to FileMenu (see GCBO)
% handles structure with handles and user data (see
GUIDATA)
% -----
-----
function OpenMenuItem_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to OpenMenuItem (see GCBO)
% handles structure with handles and user data (see
GUIDATA)
file = uigetfile('*.fig');
if ~isequal(file, 0)
    open(file);
end
% -----
-----function PrintMenuItem_Callback(hObject,
eventdata, handles)

```

```

% hObject      handle to PrintMenuItem (see GCBO)
% handles      structure with handles and user data (see
GUIDATA)
printdlg(handles.GaborFiltGUI)
% -----
-----
function CloseMenuItem_Callback(hObject, eventdata,
handles)
% hObject      handle to CloseMenuItem (see GCBO)

% handles      structure with handles and user data (see
GUIDATA)
selection = questdlg(['Close '
get(handles.GaborFiltGUI, 'Name') '?'], ...
                    ['Close '
get(handles.GaborFiltGUI, 'Name') '...'], ...
                    'Yes', 'No', 'Yes');
if strcmp(selection, 'No')
    return;
end
delete(handles.GaborFiltGUI)
% --- Executes on selection change in Graph_type_popup.
function Graph_type_popup_Callback(hObject, eventdata,
handles)
% hObject      handle to Graph_type_popup (see GCBO)

% handles      structure with handles and user data (see
GUIDATA)

% Hints: contents = get(hObject, 'String') returns
Graph_type_popup contents as cell array
%           contents{get(hObject, 'Value')} returns selected
item from Graph_type_popup

n=get(handles.N_edit, 'Value') ;
x=linspace(get(handles.X_min_edit, 'Value'), get(handles.X_ma
x_edit, 'Value'), n);
y=linspace(get(handles.Y_min_edit, 'Value'), get(handles.Y_ma
x_edit, 'Value'), n);
G=real(handles.FilterData);
%real(get(hObject, 'UserData'));
if (get(handles.Frequency_radiobutton, 'Value'))
    G=abs(fftshift(fft2(G)));
end

```

```

if (get(handles.Hold_on_checkbox,'Value'))
    hold on;
else
    hold off;
end

switch (get(handles.Graph_type_popup,'Value'))
    case (1)
        imagesc(x,y,G);
    case (2)
        mesh(x,y,G);
    case (3)
        surf(x,y,G);
end
% --- Executes during object creation, after setting all
properties.
function Graph_type_popup_CreateFcn(hObject, eventdata,
handles)
% hObject    handle to Graph_type_popup (see GCBO)
% handles    empty - handles not created until after all
CreateFcns called
% Hint: popupmenu controls usually have a white background
on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
set(hObject, 'String', {'imagesc', 'mesh', 'surf'});
function N_edit_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to N_edit (see GCBO)
% handles    structure with handles and user data (see
GUIDATA)
% Hints: get(hObject,'String') returns contents of N_edit
as text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents
of N_edit as a double

parameter_changed(hObject)
% --- Executes during object creation, after setting all
properties.
function N_edit_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to N_edit (see GCBO)

```

```

% handles      empty - handles not created until after all
CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on
Windows.
%          See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
function X_min_edit_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to X_min_edit (see GCBO)
% handles      structure with handles and user data (see
GUIDATA)
% Hints: get(hObject,'String') returns contents of
X_min_edit as text
%          str2double(get(hObject,'String')) returns contents
of X_min_edit as a double
parameter_changed(hObject)
% --- Executes during object creation, after setting all
properties.
function X_min_edit_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to X_min_edit (see GCBO)
% handles      empty - handles not created until after all
CreateFcns called
% Hint: edit controls usually have a white background on
Windows.
%          See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
function X_max_edit_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to X_max_edit (see GCBO)
% handles      structure with handles and user data (see
GUIDATA)
% Hints: get(hObject,'String') returns contents of
X_max_edit as text
%          str2double(get(hObject,'String')) returns contents
of X_max_edit as a double
parameter_changed(hObject)
% --- Executes during object creation, after setting all
properties.
function X_max_edit_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to X_max_edit (see GCBO)

```

```

% handles      empty - handles not created until after all
CreateFcns called
% Hint: edit controls usually have a white background on
Windows.
%          See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
function Y_min_edit_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to Y_min_edit (see GCBO)
% handles      structure with handles and user data (see
GUIDATA)
% Hints: get(hObject,'String') returns contents of
Y_min_edit as text
%          str2double(get(hObject,'String')) returns contents
of Y_min_edit as a double
parameter_changed(hObject)
% --- Executes during object creation, after setting all
properties.
function Y_min_edit_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to Y_min_edit (see GCBO)
% handles      empty - handles not created until after all
CreateFcns called
% Hint: edit controls usually have a white background on
Windows.
%          See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
function Y_max_edit_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to Y_max_edit (see GCBO)
% handles      structure with handles and user data (see
GUIDATA)
% Hints: get(hObject,'String') returns contents of
Y_max_edit as text
%          str2double(get(hObject,'String')) returns contents
of Y_max_edit as a double
parameter_changed(hObject)
% --- Executes during object creation, after setting all
properties.
function Y_max_edit_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to Y_max_edit (see GCBO)

```

```

% handles      empty - handles not created until after all
CreateFcns called
% Hint: edit controls usually have a white background on
Windows.
%          See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
function Frequency_edit_Callback(hObject, eventdata,
handles)
% hObject      handle to Frequency_edit (see GCBO)
% handles      structure with handles and user data (see
GUIDATA)
% Hints: get(hObject,'String') returns contents of
Frequency_edit as text
%          str2double(get(hObject,'String')) returns contents
of Frequency_edit as a double
parameter_changed(hObject)
% --- Executes during object creation, after setting all
properties.
function Frequency_edit_CreateFcn(hObject, eventdata,
handles)
% hObject      handle to Frequency_edit (see GCBO)
% handles      empty - handles not created until after all
CreateFcns called
% Hint: edit controls usually have a white background on
Windows.
%          See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
function Rotation_Angle_edit_Callback(hObject, eventdata,
handles)
% hObject      handle to Rotation_Angle_edit (see GCBO)
% handles      structure with handles and user data (see
GUIDATA)
% Hints: get(hObject,'String') returns contents of
Rotation_Angle_edit as text
%          str2double(get(hObject,'String')) returns contents
of Rotation_Angle_edit as a double
parameter_changed(hObject)

```

```

% --- Executes during object creation, after setting all
properties.
function Rotation_Angle_edit_CreateFcn(hObject, eventdata,
handles)
% hObject      handle to Rotation_Angle_edit (see GCBO)

% handles      empty - handles not created until after all
CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on
Windows.
%           See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
function Sigma_x_edit_Callback(hObject, eventdata,
handles)
% hObject      handle to Sigma_x_edit (see GCBO)

% handles      structure with handles and user data (see
GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of
Sigma_x_edit as text
%           str2double(get(hObject,'String')) returns contents
of Sigma_x_edit as a double

parameter_changed(hObject)

% --- Executes during object creation, after setting all
properties.
function Sigma_x_edit_CreateFcn(hObject, eventdata,
handles)
% hObject      handle to Sigma_x_edit (see GCBO)

% handles      empty - handles not created until after all
CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on
Windows.
%           See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))

```

```

        set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
function Sigma_y_edit_Callback(hObject, eventdata,
handles)
% hObject      handle to Sigma_y_edit (see GCBO)

% handles      structure with handles and user data (see
GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of
Sigma_y_edit as text
%           str2double(get(hObject,'String')) returns contents
of Sigma_y_edit as a double

parameter_changed(hObject)

% --- Executes during object creation, after setting all
properties.
function Sigma_y_edit_CreateFcn(hObject, eventdata,
handles)
% hObject      handle to Sigma_y_edit (see GCBO)

% handles      empty - handles not created until after all
CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on
Windows.
%           See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes during object creation, after setting all
properties.
function axes1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to axes1 (see GCBO)

% handles      empty - handles not created until after all
CreateFcns called

% Hint: place code in OpeningFcn to populate axes1
set(hObject,'FontSize',1e-3);

```

```

function Phase_shift_edit_Callback(hObject, eventdata,
handles)
% hObject      handle to Phase_shift_edit (see GCBO)

% handles      structure with handles and user data (see
GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of
Phase_shift_edit as text
%      str2double(get(hObject,'String')) returns contents
of Phase_shift_edit as a double
parameter_changed(hObject)

% --- Executes during object creation, after setting all
properties.
function Phase_shift_edit_CreateFcn(hObject, eventdata,
handles)
% hObject      handle to Phase_shift_edit (see GCBO)

% handles      empty - handles not created until after all
CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on
Windows.
%      See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes on button press in Time_radiobutton.
function Time_radiobutton_Callback(hObject, eventdata,
handles)
% hObject      handle to Time_radiobutton (see GCBO)

% handles      structure with handles and user data (see
GUIDATA)

% Hint: get(hObject,'Value') returns toggle state of
Time_radiobutton
eventdata='datachanged';
Graph_type_popup_Callback(handles.Graph_type_popup,
eventdata, handles)

```

```

% --- Executes on button press in Frequency_radiobutton.
function Frequency_radiobutton_Callback(hObject, eventdata,
handles)
% hObject      handle to Frequency_radiobutton (see GCBO)

% handles      structure with handles and user data (see
GUIDATA)
% Hint: get(hObject,'Value') returns toggle state of
Frequency_radiobutton
eventdata='datachanged';
Graph_type_popup_Callback(handles.Graph_type_popup,
eventdata, handles)
function parameter_changed(hObject)
set(hObject,'Value',str2double(get(hObject,'String'))); %
"edit" object value, is the numeric value of the string.
handles=guidata(hObject);

n=get(handles.N_edit,'Value') ;
Sigma_x=get(handles.Sigma_x_edit,'Value') ;
Sigma_y=get(handles.Sigma_y_edit,'Value') ;
x=linspace(get(handles.X_min_edit,'Value'),get(handles.X_max_
edit,'Value'),n);
y=linspace(get(handles.Y_min_edit,'Value'),get(handles.Y_max_
edit,'Value'),n);
% set(handles.axes1,'XLim',[x(1), x(end)]);
% set(handles.axes1,'YLim',[y(1), y(end)]);
axis([x(1), x(end), y(1), y(end)]);

F=get(handles.Frequency_edit,'Value') ; % modulation freq

Theta= get(handles.Rotation_Angle_edit,'Value')*pi/180;

Phase_shift=get(handles.Phase_shift_edit,'Value');
% [x_rot,y_rot]=my_rotate(x,y,Theta);
[X,Y]=meshgrid(x,y);
X_rot=X*cos(Theta)+Y*sin(Theta);
Y_rot=-X*sin(Theta)+Y*cos(Theta);
GaussianMat=1/(2*pi*Sigma_x*Sigma_y)*exp((-
((X_rot)/Sigma_x).^2-((Y_rot)/Sigma_y).^2)/2);%exp((-
(X_rot)/(Sigma_x)^2-(Y_rot)/(Sigma_y)^2)/2);
% GaussianMat=myGaussian(x_rot, Sigma_x)*myGaussian(y_rot,
Sigma_y);

```

```

% FreqModulation=zeros(size(GaussianMat));
%
% for n=1:length(y)
%     for m=1:length(x)
%
FreqModulation(n,m)=exp(j*F*2*pi*(x(m)*cos(Theta)+y(n)*sin(
Theta)));
%     end
% end
FreqModulation=exp(j*(F*2*pi*X_rot+Phase_shift));
%
FreqModulation=exp(2*pi*i*F*repmat(x_rot,length(y_rot),1));
%'*ones(size(x_rot));
%
FreqModulation=exp(2*pi*i*F*x_rot)'*exp(2*pi*i*F*y_rot+Phas
e_shift); %repmat(exp(2*i*pi*F*x),m,1);
GaborFilter=GaussianMat.*FreqModulation;

handles.FilterData=GaborFilter; % Save the resulting Gabor
filter
%set(handles.Graph_type_popup,'UserData',GaborFilter);
guidata(hObject,handles);
eventdata='datachanged';
Graph_type_popup_Callback(handles.Graph_type_popup,
eventdata, handles)

function G=myGaussian(x, sigma,mean)
if nargin<3
    mean=0;
    if nargin<2
        sigma=1;
    end
end
end

G=1/(2*pi)*exp(-((x-mean)/sigma).^2/2);

function [x_rot,y_rot]=my_rotate(x,y,Theta)
%function [x_rot,y_rot]=my_rotate(x,y,Theta)
% Rotates X and Y by agle Theta (Theta is given in rad)
x_rot=x*cos(Theta)+y*sin(Theta);
y_rot=-x*sin(Theta)+y*cos(Theta);

function error_accured(handles, error_String)
% function error_accured(handles, error_String)

```

```

% the function displays an error string on the GUI screen,
once an error
% occurs.
set (handles.ErrorText,'String',error_String);
set (handles.ErrorPanel,'Visible','On');%set
([handles.ErrorText,
handles.ErrorOffButton],'Visible','On');
% --- Executes on button press in Hold_on_checkbox.
function Hold_on_checkbox_Callback(hObject, eventdata,
handles)
% hObject      handle to Hold_on_checkbox (see GCBO)
% handles      structure with handles and user data (see
GUIDATA)

% Hint: get(hObject,'Value') returns toggle state of
Hold_on_checkbox

% --- Executes on button press in LoadButton.
function LoadButton_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to LoadButton (see GCBO)

% handles      structure with handles and user data (see
GUIDATA)

handles=guidata(hObject);

switch (get(handles.FileTypeMenu,'Value'))
    case(1)
        %('Image')

FilterSpec={'*.jpg;*.jpeg;*.gif;*.bmp;*.png;*.tiff','Image
Files (*.jpg;*.jpeg;*.gif;*.bmp;*.png;*.tiff)'};
        DialogTitle='Select an Image file';
    case(2)
        %('Filter')
        FilterSpec='*.mat';
        DialogTitle='Select a previolsy saved  Filter
file';
    case(3)
        %('Filtered Image')
        FilterSpec='*.mat';
        DialogTitle='Select a previolsy saved  Filtered
Image file';
end

[FileName,PathName,FilterIndex] =
uigetfile(FilterSpec,DialogTitle);

```

```

if isequal(FileName,0)
    error_accured(handles, 'No such file exists. Choose a
file.')
```

```

    if
strcmpr(get(handles.ApplyFilterButton, 'Enable'), 'On')
        set(handles.ApplyFilterButton, 'Enable', 'Off');
    end

else
    set(handles.FilePathEdit, 'String', PathName);
    set(handles.FileNameEdit, 'String', FileName);
    if
strcmpr(get(handles.ApplyFilterButton, 'Enable'), 'Off')
        set(handles.ApplyFilterButton, 'Enable', 'On');
    end
end

switch (get(handles.FileTypeMenu, 'Value'))
    case(1)
        %('Image')
        ImageDataTmp=imread([PathName, FileName]);
        if (size(ImageDataTmp, 3)==3)
            %work with
Gray iamges only!!!
            ImageDataTmp=rgb2gray(ImageDataTmp);
        end
        handles.ImageData=double(ImageDataTmp);
    case(2)
        %('Filter')
        FilterDataTmp=load([PathName, FileName]);
        handles.FilterData=FilterDataTmp.tmp;
    case{3,4}
        %('Filtered Image')
        FilteredImageDataTmp=load([PathName, FileName]);
        handles.FilteredImageData=FilteredImageDataTmp.tmp;
end

guidata(hObject, handles);
% --- Executes on button press in SaveButton.
function SaveButton_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to SaveButton (see GCBO)

% handles    structure with handles and user data (see
GUIDATA)
FileName=get(handles.FileNameEdit, 'String');
PathName=get(handles.FilePathEdit, 'String');

if isempty(strfind(FileName, '.mat'))

```

```

    % Error, trying to save .mat output in a non *.mat
file!!!
    error_accured(handles, 'Attempt to save .mat output in
a non *.mat file!!!')
end
tmp=[];
switch (get(handles.FileTypeMenu, 'Value'))
    case(1)                %('Image')
        %Do nothing here. Saving the image is obsolete at this
point
    case(2)                %('Filter')
        tmp=handles.FilterData;
    case{3,4}              %('Filtered Image')
        tmp=handles.FilteredImageData;
end
if ~isempty(tmp)    save([PathName,FileName], 'tmp'); end;

function FilePathEdit_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to FilePathEdit (see GCBO)

% handles    structure with handles and user data (see
GUIDATA)

% Hints: get(hObject, 'String') returns contents of
FilePathEdit as text
%          str2double(get(hObject, 'String')) returns contents
of FilePathEdit as a double

% --- Executes during object creation, after setting all
properties.
function FilePathEdit_CreateFcn(hObject, eventdata,
handles)
% hObject    handle to FilePathEdit (see GCBO)

% handles    empty - handles not created until after all
CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on
Windows.
%          See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject, 'BackgroundColor'),
get(0, 'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject, 'BackgroundColor', 'white');
end

```

```

function FileNameEdit_Callback(hObject, eventdata,
handles)
% hObject      handle to FileNameEdit (see GCBO)

% handles      structure with handles and user data (see
GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of
FileNameEdit as text
%           str2double(get(hObject,'String')) returns contents
of FileNameEdit as a double

% --- Executes during object creation, after setting all
properties.
function FileNameEdit_CreateFcn(hObject, eventdata,
handles)
% hObject      handle to FileNameEdit (see GCBO)

% handles      empty - handles not created until after all
CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on
Windows.
%           See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
% --- Executes on selection change in FileTypeMenu.
function FileTypeMenu_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to FileTypeMenu (see GCBO)

% handles      structure with handles and user data (see
GUIDATA)

% Hints: contents = get(hObject,'String') returns
FileTypeMenu contents as cell array
%           contents{get(hObject,'Value')} returns selected
itm from FileTypeMenu

% --- Executes during object creation, after setting all
properties.

```

```

function FileTypeMenu_CreateFcn(hObject, eventdata,
handles)
% hObject      handle to FileTypeMenu (see GCBO)

% handles      empty - handles not created until after all
CreateFcns called

% Hint: popupmenu controls usually have a white background
on Windows.
%           See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes on button press in ShowButton.
function ShowButton_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to ShowButton (see GCBO)

% handles      structure with handles and user data (see
GUIDATA)
if (get(handles.NewFigCheckBox,'Value'))
    figure; % if checkbox is on, plot graph in a new window
%   title(['Image of ',
get(handles.FileTypeMenu,'String')]);
%   hold on;
end

switch (get(handles.FileTypeMenu,'Value'))
    case(1) %('Image')
        imshow(uint8(handles.ImageData));
%         if (get(handles.Frequency_radiobutton,'Value'))
%             image(abs(fft2(handles.ImageData)));
%         else
%             imshow(uint8(handles.ImageData));
%         end
    case(2) %('Filter')
        eventdata='Show Button was pressed';
        Graph_type_popup_Callback(hObject, eventdata,
handles)
    case(3) %('Filtered ImageAmplitude')
        if isempty(handles.FilteredImageData)
            eventdata='Filtered Image data is needed';
            ApplyFilterButton_Callback(hObject, eventdata,
handles);

```

```

%         guidata(hObject,handles);
%         handles=guidata(hObject); % update handle
structure
    end
%         if (get(handles.Frequency_radiobutton,'Value'))
%             image(abs(fft2(handles.FilteredImageData)));
%         else
%
%         imshow(uint8(real(handles.FilteredImageData))); % Showing
only real part of filtered image
%         end

imshow(Scale2Uint(abs(handles.FilteredImageData))); %
Showing only absolute value of the filtered image
    case(4)    %('Filtered Image Phaze')
        if isempty(handles.FilteredImageData)
            eventdata='Filtered Image data is needed';
            ApplyFilterButton_Callback(hObject, eventdata,
handles);
        end
%         imshow(uint8(angle(handles.FilteredImageData))); %
Showing only real part of filtered image

scaled_amp=Scale2Uint(abs(handles.FilteredImageData));

scaled_phase=Scale2Uint(angle(handles.FilteredImageData));
%         ind=scaled_amp==0;
%         scaled_phase(ind)=0;%set phase for low
amplitudes to zero
        scaled_phase(scaled_amp<1)=0;%set phase for low
amplitudes to zero

        imshow(scaled_phase); % Showing the angle value of
the filtered image
    case(5)    %('Laplasina(Filtered Image Phaze)')
        if isempty(handles.FilteredImageData)
            eventdata='Filtered Image data is needed';
            ApplyFilterButton_Callback(hObject, eventdata,
handles);
        end
%         imshow(uint8(angle(handles.FilteredImageData))); %
Showing only real part of filtered image

imshow(Scale2Uint(del2(angle(handles.FilteredImageData))));
% Showing the angle value of the filtered image

```

```

        case(6)    %('Gaussian(Filtered Image Phaze)')
            if isempty(handles.FilteredImageData)
                eventdata='Filtered Image data is needed';
                ApplyFilterButton_Callback(hObject, eventdata,
handles);
            end
            %        imshow(uint8(angle(handles.FilteredImageData))); %
Showing only real part of filtered image

imshow(Scale2Uint(gradient(angle(handles.FilteredImageData)
))); % Showing the angle value of the filtered image
end
if (get(handles.NewFigCheckBox, 'Value'))
    temp_str_arr=get(handles.FileTypeMenu, 'String');

temp_str=temp_str_arr(get(handles.FileTypeMenu, 'Value'));
    title(temp_str, 'FontSize', 18);
end
% --- Executes on button press in ApplyFilterButton.
function ApplyFilterButton_Callback(hObject, eventdata,
handles)
% hObject        handle to ApplyFilterButton (see GCBO)

% handles        structure with handles and user data (see
GUIDATA)
handles=guidata(hObject);
if isempty(handles.ImageData)
    error_accured(handles, 'No Image file loaded');
end
set(handles.GaborFiltGUI, 'Pointer', 'watch'); drawnow;
% uiwait(handles.GaborFiltGUI);

if size(handles.ImageData, 3)==3
    handles.FilteredImageData=[];
    for i=1:3

handles.FilteredImageData(:, :, i)=filter2(handles.FilterData
,handles.ImageData(:, :, i), 'same');
        end
    else

handles.FilteredImageData=filter2(handles.FilterData, handle
s.ImageData, 'same');%conv2(handles.FilterData,handles.Image
Data);
end

```

```

set(handles.GaborFiltGUI,'Pointer','arrow');drawnow;
guidata(hObject,handles);

% --- Executes during object creation, after setting all
properties.
function GaborFiltGUI_CreateFcn(hObject, eventdata,
handles)
% hObject      handle to GaborFiltGUI (see GCBO)

% handles      empty - handles not created until after all
CreateFcns called
handles=guidata(hObject);
home; % scrole screen up
fprintf('\n\n %s \n\n','(olayS) Gabor Filter generation and
application GUI started ');
handles.ImageData=[];          % Init vriables, so isempty
function can be applied to them.
handles.FilterData=[];
handles.FilteredImageData=[];
guidata(hObject,handles);
% --- Executes on button press in ErrorOffButton.
function ErrorOffButton_Callback(hObject, eventdata,
handles)
% hObject      handle to ErrorOffButton (see GCBO)

% handles      structure with handles and user data (see
GUIDATA)
%set ([handles.ErrorText,
handles.ErrorOffButton],'Visible','Off');
set (handles.ErrorPanel,'Visible','Off');
% --- Executes on button press in NewFigCheckBox.
function NewFigCheckBox_Callback(hObject, eventdata,
handles)
% hObject      handle to NewFigCheckBox (see GCBO)
% handles      structure with handles and user data (see
GUIDATA)
% Hint: get(hObject,'Value') returns toggle state of
NewFigCheckBox
% -----
-----
function AboutMenu_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to AboutMenu (see GCBO)

% handles      structure with handles and user data (see
GUIDATA)

```

```

web('GaborFilterDesignAbout.htm');
% -----
-----
function HelpMenu_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to HelpMenu (see GCBO)
% handles    structure with handles and user data (see
GUIDATA)
web('GaborFilterDesignHelp.htm');
%% Servise sub functions
function scaled_mat=Scale2Uint(temp) % rescale data to be
in margins of UINT8[0-255]
temp=double(temp);
temp_min=min(temp(:));
temp_max=max(temp(:));
temp=temp-temp_min;
temp=255*temp/(temp_max-temp_min);
scaled_mat=uint8(temp);

```

Додаток Б. Документи, що підтверджують впровадження результатів дисертації



АКТ

про впровадження у навчально-науковий процес
Національного авіаційного університету

результатів дисертаційної роботи Фесенка Андрія Олексійовича на тему «Методи обробки даних для систем ідентифікації та автентифікації на основі біометричних характеристик ока».

Комісія у складі:

Голова комісії: Павленко П.М., д.т.н., професор, відповідальний з навчально-методичної роботи та міжнародної діяльності ННІДС

Членів комісії: Гумен М.Б., к.т.н., доцент, відповідальний за навчальну роботу ННІДС
Квасніков В. П., д.т.н., професор, завідувач кафедри комп'ютеризованих електротехнічних систем та технологій ННІДС
Козловський В.В., д.т.н., професор, завідувач кафедри засобів захисту інформації ННІДС

яка діє на підставі розпорядження Філоненка С.Ф. директора навчально-наукового інституту інформаційно-діагностичних систем Національного авіаційного університету від «20» жовтня 2015р. №70, засвідчує, що результати дисертаційної роботи Фесенка А.О. на тему «Методи обробки даних для систем ідентифікації та автентифікації на основі біометричних характеристик ока» впроваджені у навчально-науковий процес навчально-наукового інституту інформаційно-діагностичних систем, а саме:

- впроваджено статистичний метод прийняття рішень в системах контролю і управління доступом на основі статистичних критеріїв, який за рахунок використання нормованої відстані Хеммінга – як міри схожості в біометричних системах ідентифікації, в лабораторний практикум з дисципліни «Автоматизовані системи сигналізації, відеоспостереження і контролю доступом» спеціальності 125 «Кибербезпека»;


- впроваджено результати дослідження особливостей кодування зображення, який за рахунок фазових відгуків при обробці модифікованим DoG-фільтром, дозволяє кодувати один піксель зображення, одним бітом інформації, в курс лабораторних робіт з дисципліни «Автоматизовані системи сигналізації, відеоспостереження і контролю доступом» спеціальності 125 «Кибербезпека»;


- впроваджено інтегрально-диференціальний метод локалізації зображення райдужної оболонки ока на зображенні обличчя людини, який за рахунок попередньої НЧ-фільтрації (інтегрування) дозволяє зменшити локальні зміни інтенсивності пікселів, а наступна ВЧ-фільтрація (диференціювання) дозволяє виділити межі райдужної оболонки ока, в лабораторний практикум з дисципліни «Цифрова обробка сигналів», напряму підготовки 6.170102 «Системи технічного захисту інформації»;


- розроблені в дисертаційній роботі методи та програмні модулі застосовуються аспірантами кафедри засобів захисту інформації в науковій роботі та підготовці дисертаційних робіт.


Голова комісії:

Члени комісії:

 П.М. Павленко

 М.Б. Гумен

 В. П. Квасніков

 В.В. Козловський



ПАТ «МИРОНІВСЬКИЙ ХЛІБОПРОДУКТ»

код ЄДРПОУ 25412361
вул. Ак. Заболотного, 158,
м. Київ, 03143, Україна
тел.: (+38 044) 207-0000
факс: (+38 044) 207-0002
E-mail: office@mhp.com.ua
www.mhp.com.ua

Вих. № _____

від « ____ » _____

АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи
Фесенка Андрія Олексійовича «Методи обробки даних для систем
ідентифікації та аутентифікації на основі біометричних характеристик ока»
на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук у діяльність
компанії «Миронівський хлібопродукт»

Даний акт констатує, що результати дисертаційної роботи Фесенка Андрія будуть впроваджені і використовуватися в діяльності компанії ПАО «Миронівський хлібопродукт». Під час роботи над дисертацією автором був розроблений ряд методів та відповідних програмних модулів для посилення безпеки, що дозволило підвищити рівень конфіденційності систем контролю і управління доступом. Запропонований спосіб формування коду райдужної оболонки дозволяє отримувати однозначний бінарний код райдужки модифікованим DoG-фільтром, і дає змогу зменшити об'єм бази даних СКУД приблизно на 25% в порівнянні з існуючими методом.

Крім того, пропонується метод прийняття рішень на основі статистичного критерія Неймана-Пірсона, де в якості критерія роздільності використовується нормована відстань Хеммінга.

Запропоновані підходи були використані в компанії ПАО «Миронівський хлібопродукт» для реалізації рішень в області інформаційної безпеки та дозволяють підвищити швидкість роботи системи ідентифікації та аутентифікації по райдужній оболонці ока на 15%.

Начальник відділу забезпечення
технічних засобів безпеки
ПАТ «Миронівський хлібопродукт»


Рябий М.О.



Товариство з обмеженою відповідальністю
«АККСОН СОФТ»

Адреса для листування: 03115, Україна, м. Київ, вул. Львівська, буд. 22-А, офіс - 145
Код ЄДРПОУ-37818589, тел. +38(044)4821991/факс. +38(044)4093034
П/Р 26000344117 в АТ «РАЙФФАЙЗЕН БАНК АВАЛЬ» м. Київ,
МФО – 380805, <http://www.axxonsoft.com>

10.03.2017 вих. № 20170310/02

АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи
Фесенка Андрія Олексійовича «Методи обробки даних для систем ідентифікації та аутентифікації на основі біометричних характеристик ока» на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук у діяльність компанії «АххонСофт»

Найменування впровадженого результату	Досягнутий ефект
<p>1. Біометрична ідентифікації та аутентифікації користувача без еталонного зображення райдужної оболонки ока в системах контролю і управління доступом.</p> <p>2. Програмні модулі попередньої обробки зображень райдужної оболонки ока, DoG-фільтра, обчислення відстані Хеммінга, а також модуль порівняння кодів райдужок і прийняття рішень по статистичному критерію</p>	<p>Розроблена біометрична система ідентифікації та аутентифікації користувачів без еталонного зображення райдужки, яка в якості еталона зберігає бінарний код райдужної оболонки, а в якості критерія порівняння – використовує нормовану відстань Хеммінга і приймає рішення на основі використання статистичного критерію Неймана-Пірсона, що зменшило об'єм бази даних систем контролю і управління доступом, і як наслідок зменшило час доступу до неї.</p> <p>Розроблене програмне забезпечення використовується для збереження матеріальних цінностей, а також оперативний контроль за пересуванням персоналу і часу його перебування на території підприємства.</p>

З повагою,

Директор компанії «АККСОН СОФТ»



О.В. Курінний

Вик. Шинкарюк І.А. т. 482-19-91