

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна
Навчально-науковий інститут комп'ютерних наук та штучного
інтелекту

Кафедра кібербезпеки інформаційних систем, мереж і технологій

До захисту допущено

Кафедрою КІСМіТ протокол № _____ від « ____ » грудня 2025 р.

завідувач кафедри _____
(підпис)

Марина ЄСІНА
(ім'я, прізвище)

« ____ » грудня 2025 р.

Кваліфікаційна робота
здобувача другого (магістерського) рівня вищої освіти

Біометрична верифікація за
допомогою циліндричних кодів мінуцій

(назва роботи)

Спеціальність (спеціалізація) 125 «Кібербезпека та захист інформації»

Освітня програма «Безпека інформаційних і комунікаційних систем»

Виконавець _____
(підпис)

Максим БАСОВ
(ім'я, прізвище)

Науковий керівник _____
(підпис)

Ольга МЕЛКОЗЬОРОВА
(ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка містить 66 сторінки, 3 розділи, 8 рисунків, 1 таблицю, 1 додаток та 10 використаних джерел інформації.

Робота присвячена дослідженню методів біометричної верифікації за відбитками пальців і, зокрема, аналізу та практичній реалізації методу циліндричних кодів мінущій (МСС). Актуальність теми зумовлена зростаючими вимогами до безпеки інформаційних систем, у яких класичні мінущійні алгоритми демонструють обмежену стійкість до шумів, локальних деформацій та варіативності умов знімання.

Метою роботи є теоретичне обґрунтування та практичне дослідження алгоритму МСС як методу побудови стійких локальних дескрипторів мінущій для підвищення точності біометричної верифікації.

Для досягнення поставленої мети у роботі використано методи математичного моделювання та статистичного аналізу. У процесі дослідження було здійснено аналіз класичних мінущійних методів, проведено формалізацію задачі порівняння шаблонів та розроблено базову програмну реалізацію ключових етапів МСС.

Результатом роботи стало моделювання повного циклу формування дескрипторів МСС. Запропонована реалізація підтвердила високу точність методу, що відображено у низьких показниках EER та FMR1000, наведених за результатами аналізу літературних джерел.

Наукова новизна роботи полягає у структурованому представленні етапів формування МСС-дескрипторів, моделюванні процесу побудови циліндрів на реальних шаблонах та обґрунтуванні переваг МСС над класичними мінущійними підходами у контексті їх стійкості, інваріантності та можливості використання у системах з обмеженими ресурсами.

Ключові слова: БІОМЕТРІЯ, ВЕРИФІКАЦІЯ, ВІДБИТКИ ПАЛЬЦІВ, МІНУЩІЇ, МСС, ЦИЛІНДРИЧНІ КОДИ, ДЕСКРИПТОР, ERR, FMR1000

ABSTRACT

The explanatory note comprises 66 pages, 3 chapters, 8 figures, 1 table, 1 appendix, and 10 sources of reference.

The work is devoted to the study of biometric fingerprint verification methods, with a particular focus on the analysis and practical implementation of the Minutia Cylinder-Code (MCC) algorithm. The relevance of the topic is driven by the increasing security demands of modern information systems, where classical minutiae-based algorithms demonstrate limited robustness to noise, local distortions, and variations in acquisition conditions.

The aim of the research is to provide a theoretical justification and practical investigation of the MCC algorithm as a method for constructing stable local minutiae descriptors that improve the accuracy of biometric verification.

To achieve this goal, mathematical modelling and statistical analysis methods were employed. The study includes an examination of classical minutiae-based techniques, formalisation of the fingerprint template comparison task, and the development of a basic software implementation of the key stages of the MCC algorithm.

The result of the work is a full-scale modelling of the MCC descriptor construction pipeline. The proposed implementation confirmed the high accuracy of the method, which is reflected in the low EER and FMR1000 values reported in the literature.

The scientific novelty of the research lies in the structured presentation of the MCC descriptor construction process, modelling of cylinder formation on real minutiae templates, and justification of the advantages of MCC over classical minutiae-based approaches in terms of robustness, invariance, and suitability for resource-constrained systems.

Keywords: BIOMETRICS, VERIFICATION, FINGERPRINTS, MINUTIAE, MCC, CYLINDER CODES, DESCRIPTOR, EER, FMR1000.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ	5
ВСТУП	6
1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ БІОМЕТРИЧНОЇ ВЕРИФІКАЦІЇ	8
1.1 Біометричні системи та методи автентифікації	8
1.2 Верифікація за відбитками пальців та мінутійний підхід	11
1.3 Проблеми класичних мінутійних алгоритмів	14
1.4 Сучасні методи підвищення точності та їх обмеження	18
1.5 Метрики оцінювання точності (EER, FMR, FMR1000)	21
2 МЕТОД МІНУЦІЙНИХ ЦИЛІНДРИЧНИХ КОДІВ (МСС): ПОБУДОВА ТА РЕАЛІЗАЦІЯ	25
2.1 Загальні принципи МСС та структура вхідних шаблонів	25
2.2 Алгоритмічні основи та технічний процес побудови МСС	27
2.3 Формування локального циліндра навколо мінучії	31
2.4 Обчислення внесків сусідніх мінучій	35
2.5 Побудова повного дескриптора та його лінеаризація	39
2.6 Бінаризація та застосування кодів Грея	41
2.7 Порівняння дескрипторів та отримання глобального показника схожості	44
3 АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ТА ІНТЕРПРЕТАЦІЯ МСС	49
3.1 Формалізація задачі верифікації та порівняння шаблонів	49
3.2 Аналіз побудованих дескрипторів і прикладів (0_0, 0_1)	51
3.3 Порівняння МСС із класичними мінутійними методами	54
3.4 Оцінка точності за літературними даними (EER, FMR1000)	57
3.5 Сильні та слабкі сторони МСС у практичному застосуванні	60
3.6 Перспективи розвитку методу	63
ВИСНОВКИ	67
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	69
ДОДАТОК А	70

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ

MCC — Minutia Cylinder-Code. Метод побудови тривимірних дескрипторів мінущій для біометричної верифікації.

Minutia — Характерна точка папілярного візерунка (розгалуження або закінчення лінії).

Template — Шаблон мінущій. Структура, що містить координати та орієнтації мінущій з відбитка.

Minutia — Характерна точка папілярного візерунка (розгалуження або закінчення лінії).

EER — Equal Error Rate. Точка, у якій імовірність хибного прийняття дорівнює імовірності хибної відмови.

FMR — False Match Rate. Ймовірність помилкового прийняття неавторизованого користувача.

FMR1000 — False Match Rate at 0.1%. Показник, що характеризує точність систем високої надійності.

ISO/IEC 19794-2 — Стандарт мінущійних шаблонів. Описує формат зберігання та структуру мінущій.

Descriptor — Дескриптор. Компактне представлення локальної структури навколо мінущій.

Cylinder — Циліндр MCC. Дискретизована тривимірна модель локального простору навколо мінущій.

Gray Code — Код Грея. Тип двійкового коду, у якому сусідні значення відрізняються одним бітом.

Hamming Distance — Відстань Хемінга. Міра схожості між двійковими векторами дескрипторів.

Normalization — Нормалізація. Процес приведення шаблону до уніфікованої системи координат.

Convex Hull — Опукла оболонка. Мінімальна опукла область, що містить усі мінущій шаблону.

ВСТУП

У сучасних умовах цифровізації питання надійної та безпечної автентифікації користувачів набуває особливої важливості. Традиційні засоби ідентифікації — паролі, PIN-коди чи фізичні токени — втрачають ефективність через уразливість до атак, ризику компрометації та залежність від людського фактору. На цьому тлі біометричні технології, що використовують природні унікальні характеристики людини, поступово стають фундаментом сучасних систем контролю доступу.

Одним із найбільш зрілих і досліджених напрямів біометрії є верифікація за відбитками пальців. Структури папілярних ліній формуються під час ембріонального розвитку й залишаються стабільними протягом життя, що забезпечує високу унікальність і відтворюваність відбитків. Завдяки цьому технології їх розпізнавання широко впроваджуються у державних реєстрах, мобільних пристроях, фінансових структурах та системах контролю доступу.

Попри значний прогрес, класичні методи порівняння відбитків, що базуються на глобальному співставленні мінучій, мають низку суттєвих обмежень. До них належать деформації через різний тиск під час зняття відбитка, повороти та часткові зображення, шуми й помилки при виділенні мінучій, а також залежність від ресурсомісткого процесу вирівнювання шаблонів. Це знижує точність у реальних умовах та ускладнює використання таких алгоритмів на пристроях із обмеженими ресурсами.

Актуальність дослідження зумовлена необхідністю пошуку ефективних методів, здатних працювати зі складними та неповними даними. Одним із таких підходів є метод циліндричних кодів мінучій (Minutia Cylinder-Code, MCC), який описує локальну околицю кожної мінучії у тривимірному просторі, поєднуючи просторову та орієнтаційну інформацію. Завдяки локальному аналізу MCC інваріантний до зсувів, поворотів та часткових деформацій, що дозволяє підвищити точність у порівнянні з традиційними мінучійними методами.

Об'єктом дослідження є процес біометричної верифікації за відбитками

пальців.

Предметом дослідження є метод циліндричних кодів мінуцій та алгоритмічні процедури його формування.

Метою роботи є структурований аналіз МСС і формалізація ключових етапів побудови дескриптора — від геометричної підготовки шаблону до обчислення локальних внесків та отримання фінального коду.

Структурно робота складається з трьох розділів: огляду теоретичних основ, опису методу МСС та аналізу отриманих результатів. Така послідовність забезпечує логічний перехід від загальної теорії до практичної реалізації та оцінки методу.

1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ БІОМЕТРИЧНОЇ ВЕРИФІКАЦІЇ

1.1 Біометричні системи та методи автентифікації

У сучасному цифровому суспільстві питання автентифікації користувачів набуває особливої ваги, оскільки рівень довіри до інформаційних систем прямо залежить від того, наскільки ефективно вони можуть встановити особу та запобігти несанкціонованому доступу. Традиційні засоби підтвердження — такі як паролі, графічні ключі, секретні фрази чи числові коди — дедалі частіше демонструють свою вразливість. Вони легко піддаються фішинговим атакам, можуть бути скомпрометовані, забуті або передані стороннім особам. Навіть технології, побудовані на апаратних ключах або токенах, не позбавлені ризиків фізичної втрати чи крадіжки. Це закономірно призвело до того, що у сфері інформаційної безпеки зростає інтерес до методів, здатних забезпечити більш надійний зв'язок між людиною та її цифровою ідентичністю.

Біометричні системи стало розглядають як один із найефективніших інструментів автентифікації, оскільки вони спираються на унікальні характеристики людського тіла або особистої поведінки. Такі характеристики супроводжують людину протягом усього життя і значною мірою не залежать від її волі. Біометричні дані не можна забути, загубити або передати іншому користувачу, що робить їх важливим елементом підвищеної безпеки. Саме тому біометрія широко використовується в державних інформаційних реєстрах, системах прикордонного контролю, банківських сервісах, мобільних пристроях та корпоративних платформах.

Біометрична система, у класичному розумінні, складається з декількох ключових етапів. Спершу відбувається зчитування біометричних даних за допомогою спеціалізованого сенсора. Після цього система виконує попередню обробку сигналу, під час якої зменшується шум, нормалізується освітлення, усуваються артефакти та формується основа для подальшого аналізу. На наступному етапі відбувається виділення характерних ознак —

параметрів, які найкраще описують індивідуальні особливості конкретного користувача. Ці ознаки перетворюються на математичний шаблон, що зберігається у надійному середовищі. Під час автентифікації система повторно зчитує біометричну інформацію та порівнює її зі збереженим шаблоном, визначаючи ступінь їхньої відповідності за заздалегідь визначеною метрикою.

Біометричні ознаки можуть бути фізіологічними або поведінковими. Фізіологічні характеристики, такі як відбитки пальців, структура обличчя, райдужна оболонка ока чи вензний візерунок долоні, визначаються анатомічними особливостями людини та відзначаються високою стабільністю. Вони формуються переважно на ранніх етапах розвитку та змінюються дуже повільно. Поведінкові характеристики — наприклад, динаміка підпису чи особливості манери ходи — залежать від індивідуальних моторних навичок і можуть змінюватися з часом, однак при цьому здатні забезпечувати фонову автентифікацію, яка не потребує активних дій користувача.

Ефективність біометричної системи визначається низкою вимог, серед яких ключовими є унікальність і стабільність ознак, можливість їх повторного вимірювання у різних умовах, а також здатність системи коректно розпізнавати одну й ту саму особу навіть за наявності невеликих змін у даних. Важливо також, щоб біометричний метод був достатньо захищеним від підробок та можливих атак, включаючи спроби створення штучних копій або імітацій.

Серед усіх біометричних ознак відбитки пальців посідають особливе місце, адже їхня унікальність підтверджена як емпіричними дослідженнями, так і багаторічною криміналістичною практикою. Структура папілярних візерунків є складною, стійкою до змін і легко піддається автоматичному зчитуванню за допомогою недорогих сенсорів. Саме тому технології, що базуються на аналізі відбитків, стали наймасовішими у світі — від ідентифікаційних документів до мобільних телефонів.

Однією з ключових причин популярності біометрії є її здатність

органічно доповнювати або навіть замінювати традиційні методи автентифікації. У системах, де необхідний високий рівень безпеки, біометрія виступає основним фактором розпізнавання особи. У більш гнучких сценаріях вона стає частиною багатфакторної автентифікації, поєднуючись із володінням пристроєм або знанням секретної інформації. Такий підхід значно ускладнює спроби компрометації, адже навіть у разі викрадення пристрою зломисник не зможе пройти перевірку особи без фізіологічних ознак власника.

На рисунку 1.1 нижче наведено приклад того, як може виглядати загальна схема роботи біометричної системи.

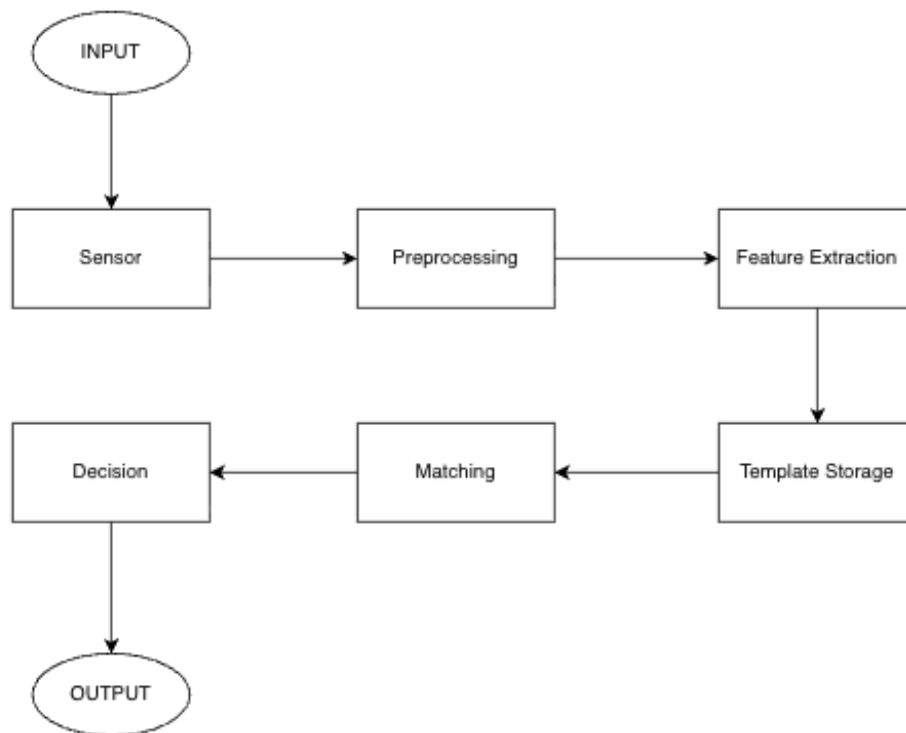


Рисунок 1.1 - Загальна схема роботи біометричної системи

Поширення біометричних систем також стало можливим завдяки розвитку міжнародних стандартів, які регламентують способи зберігання та обміну біометричними шаблонами. Це забезпечує сумісність рішень, створених різними виробниками, та дозволяє масштабувати системи у великих інфраструктурах. Найбільш відомим стандартом у сфері

дактилоскопії є ISO/IEC 19794-2 [3], який визначає формат представлення мінущій — ключових точок на відбитку пальця. Стандартизація мінущійної інформації сприяла розвитку великої кількості алгоритмів розпізнавання, зокрема й методу циліндричних кодів мінущій, який у подальших розділах буде розглянуто детально.

У підсумку можна сказати, що біометричні системи стали невід’ємною частиною сучасної інфраструктури безпеки. Їхня популярність пояснюється поєднанням високої точності [6], зручності використання та природної прив’язки біометричних даних до конкретної особи.

Розуміння базових принципів роботи таких систем є необхідним підґрунтям для дослідження більш складних алгоритмів, серед яких метод МСС посідає особливе місце завдяки своїй стійкості та ефективності.

1.2 Верифікація за відбитками пальців та мінущійний підхід

Верифікація за відбитками пальців є одним із найдавніших і водночас найефективніших методів встановлення особи. Історично папілярні візерунки використовувалися в криміналістиці ще задовго до появи електронних систем, що свідчить про високу довіру до їх унікальності та стабільності. У цифрову епоху розвиток сенсорних технологій і алгоритмів аналізу дозволив інтегрувати дактилоскопічну верифікацію у широкий спектр прикладних систем — від мобільних телефонів до національних біометричних реєстрів. В основі більшості сучасних методів автоматичного розпізнавання лежить так званий мінущійний підхід, що використовує характерні точки папілярного візерунка як основні структурні елементи для побудови шаблонів та їх подальшого порівняння.

Папілярний візерунок складається з підвищень та борозенок, які формують складну систему ліній. На певних ділянках ці лінії перериваються, розгалужуються або змінюють напрям. Такі місця називають мінущіями, і саме вони є найбільш інформативними з точки зору автоматичного аналізу. Мінущії містять у собі необхідний мінімум даних, що відображають геометрію та структуру конкретного відбитка пальця. Здебільшого вони

описуються координатами розташування та орієнтацією лінії у мінутійній точці. У деяких випадках додатково враховують тип мінущії, однак стандарти, що застосовуються у практичних системах, зазвичай обмежуються обов'язковими параметрами для забезпечення сумісності між різними виробниками обладнання. Опис мінущій стандартизовано міжнародним стандартом ISO/IEC 19794-2 [3]. У ньому визначено формат подання координат, орієнтацій та типів мінущій, що забезпечує сумісність між сенсорами різних виробників.

На рисунку 1.2 нижче наведено приклад того, як може виглядати типи мінущій (розгалуження / закінчення лінії).



Рисунок 1.2 - Типи мінущій (розгалуження / закінчення лінії)

Переважа мінущійного методу полягає у тому, що він дозволяє перетворити складне зображення відбитка на компактний набір упорядкованих точок. Такий набір легко зберігати, передавати та обробляти, що робить мінущійні шаблони універсальними та придатними до використання у масштабних базах даних. Після формування шаблону

відбитка під час реєстрації система зберігає його у базі. Під час автентифікації зчитується новий зразок, із якого знову виділяються мінущі, після чого виконується процедура зіставлення двох наборів точок. Якщо кількість збігів або рівень загальної схожості перевищують заздалегідь встановлений поріг, система робить висновок про відповідність користувача.

Попри свою ефективність, традиційний мінутійний підхід стикається з низкою практичних проблем. Однією з головних є залежність результату від якості зображення. Вплив тиску пальця, вологості шкіри, кута контакту або навіть мікроподряпин може призвести до зміщення або втрати частини мінущій. Сенсорні технології, особливо у компактних пристроях, також часто створюють додаткові шуми, змазування або неповні зображення. У результаті набір мінущій, отриманий під час автентифікації, може суттєво відрізнитися від еталонного, навіть якщо вони належать одній людині.

Іншою суттєвою проблемою є деформації, властиві будь-якому відбитку, що формується під час контакту пальця з поверхнею сенсора. Пальці є еластичними, а тому лінії папілярного орнаменту розтягуються, стискаються і зміщуються. Ці деформації можуть бути локальними або глобальними, і їхній вплив є однією з основних причин помилок у класичних алгоритмах зіставлення. Традиційні методи, що ґрунтуються на глобальному вирівнюванні шаблонів, вимагають знайти таке просторове перетворення, за якого два набори мінущій максимально збігаються. У багатьох випадках ця задача є складною, адже недосконалість виділення мінущій або локальні деформації роблять глобальне вирівнювання ненадійним. Крім того, ці алгоритми є достатньо ресурсоемними, що обмежує їх використання у вбудованих або малопотужних пристроях.

Проблема часткових відбитків також є суттєвим викликом для мінутійної ідентифікації. У реальних умовах користувач нерідко прикладає лише частину пальця, а тому на зображенні присутня лише фрагментована структура папілярних ліній. Такий відбиток може містити дуже малу кількість мінущій, яких недостатньо для коректного глобального зіставлення. У цьому випадку традиційні алгоритми або не знаходять відповідності, або

видають хибні результати.

Усе це призвело до виникнення локальних методів аналізу мінуцій, що покликані подолати недоліки глобальних алгоритмів. Ідея локальних підходів полягає в тому, що не весь відбиток порівнюється цілком, а аналізується локальне оточення кожної мінуції. Це дозволяє уникати необхідності глобального вирівнювання та забезпечує значну стійкість до деформацій і пропусків мінуцій. Локальні дескриптори зосереджуються на відносних характеристиках мінуцій — таких як відстані, кути або локальні орієнтаційні структури, — що змінюються значно менше, ніж абсолютні координати.

Метод циліндричних кодів мінуцій, який детально розглядатиметься у наступному розділі, є одним із найуспішніших локальних підходів. МСС було запропоновано в роботах R. Cappelli та ін. [1], де автори представили локальне 3D-подання мінуцій. Він дозволяє представити оточення мінуції у вигляді тривимірної дискретної структури, інваріантної до поворотів, зсувів та локальних спотворень. Такий підхід вирішує відразу кілька ключових проблем мінуційної ідентифікації: зменшує залежність від глобального вирівнювання, робить систему стійкішою до шумів і дозволяє працювати навіть з частковими відбитками.

Загалом можна сказати, що мінуційний підхід залишається фундаментом сучасних біометричних систем, адже він поєднує компактність представлення з високою інформативністю. Однак розвиток технологій та зростання вимог до точності та швидкодії зумовили появу більш складних алгоритмів, що враховують локальні структури та адаптивні особливості відбитків. Саме в межах такого розвитку сформувався метод МСС, який на сьогодні вважається одним із найперспективніших способів локального опису мінуцій.

Далі, розглянемо проблеми класичних мінуційних алгоритмів.

1.3 Проблеми класичних мінуційних алгоритмів

Попри довгу історію використання, мінуційні алгоритми верифікації за відбитками пальців стикаються з низкою фундаментальних труднощів, які

суттєво впливають на якість роботи систем і породжують нові наукові напрями в галузі біометричної ідентифікації. Хоча аналіз мінучій вважається одним із найефективніших та найстабільніших способів розпізнавання особи, реальні умови знімання відбитків, особливості сенсорів та природні властивості людської шкіри створюють цілий ряд викликів, які обмежують застосування традиційних підходів у практичних системах. Тому дослідження недоліків мінучійних методів є важливим етапом у розумінні мотивації для розвитку нових алгоритмів, таких як МСС.

Першою і, мабуть, найпоширенішою проблемою є залежність якості виділених мінучій від стану самого зображення. Процес отримання відбитка залежить від великої кількості факторів: сили натискання пальця, вологості шкіри, кута дотику, наявності сторонніх частинок, стану сенсора, рівня освітлення. Через це навіть два послідовно знятих відбитки однієї і тієї самої людини можуть виглядати суттєво по-різному на локальному рівні.

Частина ліній папілярного візерунка може проявлятися слабше, деякі мінучії можуть зникати або, навпаки, визначатися помилково. Алгоритм, що спирається на точкові характеристики, завжди ризикує отримати неповний або спотворений набір ознак.

Дослідження А. Alonso-Fernandez та ін. [9] показують, що низька якість сенсорів або локальні спотворення можуть спричиняти пропуски мінучій чи появу хибних точок.

Не менш значущим є вплив деформацій, які виникають під час прикладання пальця до сенсора. На відміну від жорстких тіл, поверхня пальця є еластичною і може змінювати форму залежно від того, з якою силою та під яким кутом відбувається контакт із сенсором. Такі деформації можуть бути глобальними або локальними.

Глобальні проявляються у вигляді поворотів, масштабування чи загального зсуву зображення, у той час як локальні стосуються окремих ділянок візерунка, які стискаються або розтягуються нерівномірно.

Навіть невеликі деформації можуть суттєво змінити відносне розташування мінучій.

На рисунку 1.3 нижче наведено приклад того, як може виглядати змазаний відбиток.



Рисунок 1.3 - Приклад змазаного відбитка пальців

Традиційні мінутні алгоритми намагаються компенсувати ці зміни за допомогою глобального вирівнювання. Ідея полягає у знаходженні такого просторового перетворення, яке зіставить два набори мінучій у єдину координатну систему. Проте успішне вирівнювання залежить від того, наскільки правильно було визначено хоча б частину мінучій. Помилки на стадії їх виділення одразу ж переходять у помилки на стадії вирівнювання, що призводить до погіршення загальної якості порівняння (про що повідомляється у роботах N. Ratha та S. Volle [5]). Більше того, глобальне вирівнювання є складною оптимізаційною задачею, а тому воно вимагає значних обчислювальних ресурсів, що обмежує використання таких методів у системах реального часу або на пристроях з обмеженою потужністю.

Ще однією важливою проблемою є часткові відбитки. У реальних

умовах користувач не завжди прикладає палець до сенсора оптимально: іноді сенсор зчитує лише невелику фрагментовану частину візерунка. У таких випадках кількість мінуцій може бути мінімальною, а просторовий контекст — неповним. Класичні алгоритми, що залежать від порівняння двох повних наборів мінуцій, не здатні коректно обробляти такі дані, оскільки вони надто жорстко прив'язані до глобальної структури відбитка. Частковість призводить або до неможливості знайти відповідність, або до того, що алгоритм починає “підбирати” некоректні співставлення через відсутність достатнього контексту.

Особливої уваги заслуговує також проблема хибних мінуцій. Під час зчитування можливі ситуації, коли сенсор або алгоритм сегментації помилково визначає розриви ліній у місцях, де їх насправді немає. Такі артефакти часто виникають через забруднення сенсора, пошкодження шкіри або неякісну обробку зображення. Хибні мінуції стають частиною шаблону і, потрапляючи в алгоритм порівняння, можуть значно спотворювати результат, адже вони не відповідають реальній структурі відбитка. Кількість таких артефактів особливо велика у системах із дешевими сенсорами або в середовищах, де відбитки часто знімаються у несприятливих умовах.

Додатковою складністю є чутливість до шуму, що виникає під час зчитування. У багатьох випадках зображення відбитка пальця містить дрібні артефакти, які не можна повністю усунути навіть за допомогою складних фільтраційних процедур. Шум може помилково змінювати орієнтацію мінуцій або створювати ілюзію нових структур, а тому алгоритми, які покладаються лише на точкові ознаки, є надзвичайно вразливими до подібних впливів.

Загалом мінутійний підхід добре працює у контрольованих умовах, коли якість зображення висока, а відбитки чіткі та повні. Проте у реальних застосуваннях відбитки знімаються поспіхом, у складних умовах, на дешевих сенсорах або на нестандартних поверхнях. У таких ситуаціях класичні мінутійні алгоритми втрачають точність і надійність, що стимулює пошук методів, здатних компенсувати природні обмеження цього підходу.

Саме на цьому тлі виникають локальні дескриптори, які аналізують не весь набір мінущій, а локальні структури навколо кожної з них. Вони менш чутливі до глобальних деформацій, оскільки базуються на відносних відстанях і кутах, які зберігаються навіть за значних змін у формі відбитка. Одним із найперспективніших методів такого типу є алгоритм мінущійних циліндричних кодів (МСС), який поєднує локальну геометрію з тривимірним представленням даних і здатний забезпечувати інваріантність до поворотів, стійкість до шуму та ефективність у роботі з частковими відбитками. Розуміння обмежень класичних мінущійних алгоритмів дає можливість оцінити теоретичні та практичні переваги МСС, що буде розглянуто у наступних розділах.

1.4 Сучасні методи підвищення точності та їх обмеження

У відповідь на численні проблеми класичних мінущійних алгоритмів у науковій спільноті сформувався широкий спектр методів, спрямованих на підвищення точності, стійкості та надійності біометричної верифікації за відбитками пальців. Розвиток цих підходів відбувався поступово, у міру того як з'являлись нові сенсорні технології та зростали вимоги до безпеки інформаційних систем. Усі вони мають спільну мету — зробити процес зіставлення відбитків менш залежним від шумів, деформацій і частковості, що характерні для реальних умов використання. Проте незважаючи на значний прогрес, багато із запропонованих рішень залишаються обмеженими у своїх можливостях, що й створило підґрунтя для появи методів нового покоління, таких як МСС.

Першим важливим напрямом удосконалення стало покращення етапу попередньої обробки зображень. Було розроблено різноманітні алгоритми фільтрації, нормалізації та сегментації, які мали на меті усунути або зменшити вплив шумів та артефактів. Використовувались адаптивні порогові методи, фільтри Габора та різні схеми покращення контрасту, що дозволяло краще виділяти лінії папілярного візерунка та зменшувати кількість помилкових мінущій. Попри ефективність таких методів, вони не могли

повністю компенсувати глобальні деформації відбитка, а у деяких випадках навіть створювали нові проблеми, коли агресивна фільтрація змінювала локальну структуру зображення. Тому подальший розвиток переключився на вдосконалення самого процесу виділення мінуцій.

Іншим напрямом стали підходи, які намагалися зробити виділення мінуцій стійкішим до локальних спотворень. Зокрема, було запропоновано методи, що аналізують сукупність локальних ознак — таких як кривизна ліній, напрямок гребенів або локальні орієнтаційні поля. Такі методи дозволяли стабілізувати процес екстракції та робили виділені мінуції більш узгодженими між різними зніманнями. Водночас вони все ще зберігали залежність від якості зображення і нативної структури папілярного візерунка, а отже, не могли повністю усунути проблему пропуску або помилкового визначення мінуцій.

Подальший розвиток привів до появи методів, що враховують відносні характеристики мінуцій. Ключовим у цьому підході стало розуміння того, що навіть за значних деформацій локальні відносини між мінуціями можуть залишатися відносно стабільними. Це призвело до створення локальних дескрипторів, що описували мінуцію не ізольовано, а в контексті її найближчого оточення. Було запропоновано використовувати відстані та кути між мінуцією та її сусідами у фіксованому радіусі. Такий опис забезпечував певний рівень інваріантності до глобальних змін, але все ще залежав від точності визначення сусідніх мінуцій, що ускладнювало його застосування у реальних умовах.

Пізніше з'явилися методи, які враховували не лише відносну позицію, але й локальну структуру, що утворюється групою мінуцій. У роботах Ratha та співавторів [4], [5] було запропоновано аналізувати усіх сусідніх точок у межах певного кола та узагальнювати їхню конфігурацію у дескриптор, стабільний до помірних деформацій. Проте проблема полягала в тому, що реальні відбитки часто містять нерівномірно розміщені мінуції, і фіксований радіус не завжди забезпечував достатню кількість інформації для надійного опису. Крім того, неправильне визначення хоча б однієї мінуції впливало на

весь дескриптор, створюючи ризик розповсюдження помилки на подальші етапи.

Важливою віхою стали дослідження Feng [4], який звернув увагу на те, що локальні дескриптори мають бути не лише змістовними, але й достатньо компактними. Надмірно великі дескриптори погіршують продуктивність системи та збільшують час порівняння, що особливо критично для пристроїв із обмеженими ресурсами. Тому він запропонував методи, які зменшували вплив помилкових або пропущених мінуцій, обмежуючи аналіз лише тими точками, що знаходяться у найстабільніших ділянках візерунка. Це дозволило частково вирішити проблему залежності від якості сенсора, але не позбавило методи вразливості до сильних деформацій.

Паралельно з локальними дескрипторами розвивався напрям гібридних алгоритмів, у яких поєднувались локальне та глобальне зіставлення. Основна ідея полягала в тому, щоб спочатку знайти потенційно відповідні локальні структури, а потім перевірити їх узгодженість у масштабі всього відбитка. Такий підхід значно прискорював пошук, оскільки зменшував кількість варіантів, які потрібно розглянути під час глобального вирівнювання. Проте сам процес глобального аналізу залишався ресурсомістким і все ще залежав від якості виділених мінуцій. Крім того, гібридні методи вимагали чіткої настройки параметрів, що могло знижувати їхню універсальність.

Ще одним напрямом розвитку біометричних систем стала поява методів, що використовують допоміжні характеристики відбитка, такі як орієнтаційне поле, частота гребенів або текстурні ознаки [8]. Ці підходи забезпечували додатковий контекст для порівняння та могли частково компенсувати недоліки мінутійного опису. Однак вони також мали суттєві обмеження, адже допоміжні характеристики не стандартизовані такою мірою, як мінуції, і їхнє використання ускладнює сумісність між різними системами. Більш того, у випадках низької якості зображення ці характеристики можуть бути визначені ненадійно, що зводить нанівець їхню користь.

У підсумку стає очевидно, що більшість сучасних підходів покращують певні аспекти мінутійної ідентифікації, але не вирішують проблему

комплексно. Алгоритми можуть бути чутливими до окремих видів деформацій або шумів, вимагати високої точності виділення мінуцій, або ж потребувати значних обчислювальних ресурсів. Саме тому з часом виникла потреба у методі, який би з'єднав інваріантність, компактність представлення та високу точність порівняння.

Метод циліндричних кодів мінуцій поєднав більшість переваг попередніх підходів, але водночас уникнув їхніх ключових обмежень. Його головною ідеєю стало представлення локального оточення мінуції у тривимірному просторі, що забезпечує стійкість до поворотів, зсувів і локальних деформацій. Завдяки структурі, яка враховує і просторові, і кутові відносини між мінуціями, та можливості подальшої бінаризації дескрипторів МСС став одним із найефективніших рішень для сучасних біометричних систем. Це і визначає його особливу роль у розвитку біометричного розпізнавання, що буде більш детально розглянуто у наступному розділі.

1.5 Метрики оцінювання точності (EER, FMR, FMR1000)

Оцінювання точності біометричних систем є ключовим етапом у процесі їх розроблення, тестування та впровадження. На відміну від класичних алгоритмів з фіксованими правилами прийняття рішень, біометричні методи працюють із даними, що містять природну варіабельність та шум, а тому не можуть гарантувати абсолютної точності. Саме тому для їх аналізу використовують спеціальні статистичні показники, що дозволяють кількісно оцінити, наскільки система є надійною, стабільною та стійкою до помилок. У цьому підрозділі розглядаються базові метрики, які застосовуються в біометрії, а також їхнє значення у контексті сучасних алгоритмів, зокрема методу МСС.

Будь-яка біометрична система працює з двома типами рішень: прийняття чи відхилення відповідності між двома біометричними шаблонами. Оскільки реальні дані завжди можуть містити варіації, система інколи допускає помилки. Одним із найважливіших показників, що

характеризує роботу біометричної системи, є False Match Rate (FMR). Цей показник відображає ймовірність того, що система визнає відповідними два шаблони, які насправді належать різним користувачам. Високе значення FMR є критичною загрозою для безпеки, адже дає можливість особам, які не мають доступу, пройти автентифікацію. З погляду практичних систем FMR характеризує ризик несанкціонованого доступу і часто виступає основним показником у регламентуванні безпеки. У високозахищених системах, таких як банківські й державні реєстри, цей показник повинен бути мінімальним, що накладає високі вимоги до алгоритмів порівняння.

Однак FMR сам по собі не є достатнім для повного аналізу роботи системи. Другим базовим показником є False Non-Match Rate (FNR), який визначає ймовірність того, що система неправильно відхиляє два шаблони, які насправді належать одній людині. Високе значення FNR означає, що справжні користувачі часто стикаються з відмовами, що створює значні проблеми у реальному використанні — від погіршення досвіду користувачів до затримок у роботі критично важливих систем. У практичних сценаріях зростання точності FNR часто суперечить зменшенню FMR, адже зниження порогу прийняття збільшує ризик хибних відмов, і навпаки.

Саме тому у біометрії одним із найважливіших інтегральних показників є Equal Error Rate (EER) — точка, у якій FMR та FNR стають рівними. EER є універсальною метрикою, яка дозволяє порівнювати різні системи незалежно від їхніх внутрішніх налаштувань або типу біометричної ознаки. Чим нижчим є значення EER, тим точнішою вважається система, оскільки баланс між хибними прийняттями і хибними відмовами досягається на мінімально можливому рівні. З практичної точки зору EER часто виступає золотим стандартом оцінювання, адже показує, якої точності алгоритм може досягти при оптимальних умовах вибору порога. Для сучасних мінутійних методів EER зазвичай знаходиться у межах кількох відсотків, тоді як метод МСС демонструє значно нижчі значення, що є підтвердженням його високого потенціалу.

Ще однією важливою метрикою, яка використовується у

високорівневих прикладних системах, є FMR1000. На відміну від FMR, що визначає загальну частоту хибних прийнятів, FMR1000 вказує на найнижчий можливий показник хибних відмов (FNR), який система може забезпечити за умови фіксованого рівня хибних прийнятів, що дорівнює одній сотій відсотка. Таким чином, FMR1000 є більш жорстким і детальним показником, який дозволяє оцінити ефективність системи при суворих вимогах безпеки. Він особливо актуальний для систем, у яких пріоритетними є мінімізація хибних прийнятів, наприклад для банківських або корпоративних рішень. Якщо система демонструє низькі значення FMR1000, це означає, що вона здатна ефективно розмежовувати користувачів навіть у складних умовах.

Загалом метрики точності мають не лише технічне, а й концептуальне значення. Вони показують, наскільки глибоко алгоритм спроможний моделювати специфічні властивості біометричних даних, і наскільки він стійкий до реальних викликів — деформацій, шуму, частковості та варіабельності у зніманнях. У цьому контексті порівняння різних методів за значеннями EER або FMR1000 дозволяє об'єктивно оцінити, наскільки запропоновані алгоритми здатні вирішити ключові проблеми традиційних підходів.

Важливо також відзначити, що оцінювання точності завжди залежить від якості і різноманітності використовуваних баз даних. У наукових дослідженнях часто застосовують такі загальновизнані набори, як FVC2000, FVC2002 або FVC2006 [10]. Кожен із них містить відбитки, отримані за різних умов і різними сенсорами, що дозволяє моделювати широке коло сценаріїв. У таких тестах МСС показує суттєву перевагу над класичними мінутійними алгоритмами, демонструючи не лише нижче значення EER, але й стабільні значення FMR1000, що особливо важливо для практичного впровадження.

Таким чином, метрики точності дозволяють кількісно оцінити роботу біометричної системи та порівняти різні алгоритми між собою. Їх правильна інтерпретація є необхідною умовою для розроблення надійних та ефективних рішень. Оскільки мінутійні методи демонструють обмеження у збалансуванні

хибних прийняттів і хибних відмов, пошук алгоритмів із нижчими EER та FMR1000 стає ключовим напрямом сучасних досліджень. Саме тому метод МСС, що поєднує високу точність зі стійкістю до спотворень, займає особливе місце серед новітніх підходів і становить основу подальшого викладу у наступному розділі.

2 МЕТОД МІНУЦІЙНИХ ЦИЛІНДРИЧНИХ КОДІВ (МСС): ПОБУДОВА ТА РЕАЛІЗАЦІЯ

2.1 Загальні принципи МСС та структура вхідних шаблонів

Метод циліндричних кодів мінучій (МСС) виник як відповідь на практичні обмеження класичних мінучійних алгоритмів, зокрема на їхню залежність від глобального вирівнювання та чутливість до локальних деформацій [1]. Основна ідея МСС полягає в тому, що кожна мінучія розглядається не ізольовано, а в контексті свого локального оточення, яке описується у вигляді тривимірної дискретної структури. Така структура формує локальний дескриптор, здатний узагальнювати просторові й кутові взаємозв'язки між мінучією та її сусідами. Завдяки цьому МСС забезпечує інваріантність до зсувів, обертів та деформацій, які часто виникають під час зняття відбитків пальців.

Алгоритм МСС працює з вхідними даними у вигляді стандартних шаблонів мінучій, що відповідають міжнародній специфікації ISO/IEC 19794-2 [4]. Ці шаблони містять інформацію про координати кожної мінучії в системі координат зображення відбитка, орієнтацію лінії у відповідній точці та, за необхідності, тип мінучії. Сам формат шаблонів є універсальним і дозволяє алгоритму МСС застосовуватися практично з будь-яким сенсором, незалежно від технології зчитування та виробника обладнання. Стандартизованість структури вхідних даних є принципово важливою, оскільки МСС не потребує допоміжних характеристик, таких як орієнтаційне поле, карта частот або додаткові текстурні ознаки. Це робить метод сумісним із вимогами інтероперабельності та придатним для інтеграції у вже існуючі біометричні системи без зміни основної інфраструктури.

Сутність підходу МСС полягає у створенні локальної моделі навколо кожної мінучії, яка включає межі області аналізу, схему її дискретизації та спосіб перетворення геометричних характеристик сусідніх мінучій у внески до циліндричної структури. На відміну від класичних методів, де мінучії

розглядаються як окремі точки з фіксованими координатами, МСС розгортає локальний простір у тривимірний масив значень, що описує відносну позицію і орієнтацію сусідніх елементів. Такий підхід дозволяє уникати проблем, пов'язаних зі зміщеннями чи неповнотою даних, оскільки локальна структура залишається стабільною навіть за змін освітлення, тиску або форми відбитка.

На рисунку 2.1 нижче наведено приклад шаблону мінуцій у вигляді точок з орієнтаціями.

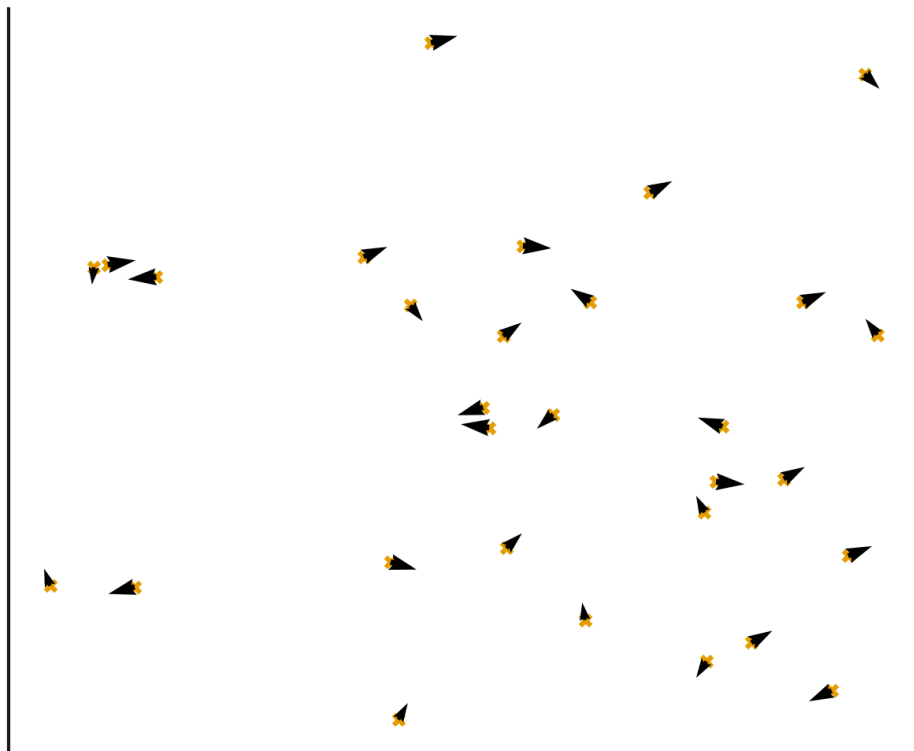


Рисунок 2.1 - Приклад шаблону мінуцій у вигляді точок з орієнтаціями

Важливим аспектом є те, що МСС працює з координатами мінуцій після нормалізації та вирівнювання в межах локального простору. Для кожної мінуції задається локальна система координат, розташована таким чином, щоб усунути залежність від глобального положення відбитка в сенсорному полі. Це означає, що обертання або зсув усього відбитка не впливають на внутрішню структуру циліндра, оскільки відносні відстані та кутові співвідношення між мінуціями зберігаються. Така інваріантність є критично важливою для роботи у реальних умовах, де варіабельність контактів

неминуча.

Вхідним набором для МСС є повний шаблон мінучій, проте на етапі побудови дескрипторів кожна мінучія опрацьовується окремо, що значно спрощує обчислювальний процес і дозволяє реалізувати алгоритм у паралельній архітектурі.

Це також робить метод придатним для високопродуктивних систем і навіть для пристроїв з обмеженими ресурсами, якщо застосовується бінаризована версія дескрипторів. Незважаючи на це, якість результатів залишається залежною від точності визначення мінучій, що є спільним недоліком усіх мінутійних методів. Тож формування шаблону та відбір коректних мінучій відіграють ключову роль у подальшому успіху МСС. Таким чином, метод МСС базується на поєднанні стандартизованих вхідних шаблонів мінучій та інноваційного підходу до опису локальних структур у тривимірному просторі. Стандартизованість забезпечує сумісність, тоді як геометричне моделювання локальних околиць мінучій створює умови для інваріантності, стійкості та високої точності.

2.2 Алгоритмічні основи та технічний процес побудови МСС

Алгоритм циліндричних кодів мінучій є комплексним методом, що поєднує геометричну нормалізацію шаблону, побудову локальних систем координат, формування тривимірних структур навколо мінучій та обчислення внесків сусідніх мінучій у дискретизований простір циліндра. Усі ці етапи взаємопов'язані: кожен із них створює умови для інваріантності до трансформацій, зменшення впливу деформацій та досягнення високої точності при зіставленні [1]. У цьому підрозділі детально описано логіку алгоритму — від отримання шаблону мінучій до формування фінального дескриптора кожної мінучії — з акцентом на тих частинах процесу, які залишаються поза увагою класичних оглядів.

Початковим етапом є зчитування шаблону мінучій, який містить набір точок з координатами та орієнтаціями. Основна мета цього етапу полягає не лише у тому, щоб отримати вихідні дані, але й у тому, щоб провести

первинний аналіз структури шаблону, виявити його межі та встановити параметри нормалізації. На практиці це часто включає попередню перевірку коректності мінуцій, виявлення їхніх повторів або аномалій, а також приведення координат до єдиної внутрішньої системи. Оскільки шаблони можуть походити з різних сенсорів або мати відмінності у розмірності, необхідно забезпечити нормалізацію масштабу, щоб циліндричні структури будувалися в уніфікованій просторовій моделі.

На рисунку 2.2 нижче наведено приклад того, як може виглядати Convex Hull.

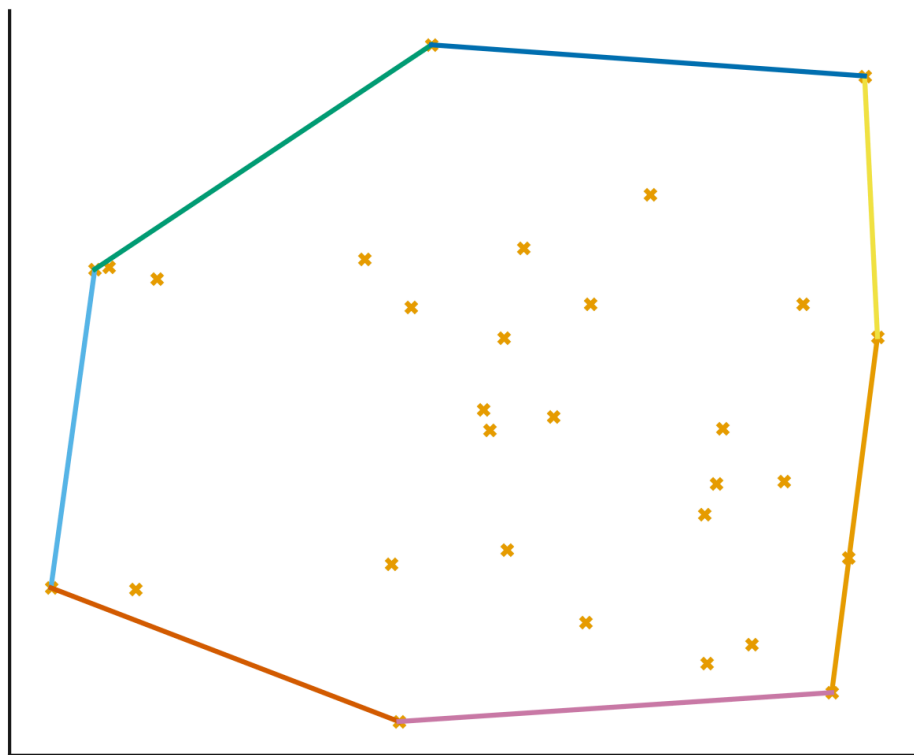


Рисунок 2.2 - Візуальний приклад Convex Hull

Після зчитування шаблон зазвичай піддається геометричному аналізу для визначення меж області, у якій розташовані мінуції. Для цього формується опукла оболонка (Convex Hull), що відображає найменшу опуклу фігуру, яка повністю охоплює всі мінуції зразка. Опукла оболонка має декілька технічних функцій. Передусім вона дозволяє оцінити реальні межі відбитка в тих випадках, коли зображення було обрізане, перекрите або часткове. Крім того, вона відіграє роль у масштабуванні: визначивши діаметр

та площу опуклої оболонки, алгоритм може привести шаблон до стандартизованих характеристик, що є важливим при подальшому порівнянні різних відбитків. Окрім того, Convex Hull дає змогу визначити центр ваги структури — точку, яка використовується для первинної нормалізації та усунення впливу глобальних зсувів.

Формальне подання мінуції (формула 2.1):

$$m_i = (x_i, y_i, \theta_i), \quad (2.1)$$

де (x_i) і (y_i) — координати мінуції, а θ_i — орієнтація мінуції, подана у радіанах або градусах.

Після обчислення опуклої оболонки визначається геометричний центр шаблону. Центр обчислюється як середнє значення координат мінуцій або як центр мас опуклої оболонки. Хоча МСС є локальним методом, наявність спільної точки відліку дозволяє узгодити шаблон у межах певної геометричної системи та усунути глобальне зміщення. На цьому етапі шаблон може бути приведений до форми, у якій розташування мінуцій буде симетричнішим та зручнішим для подальшого аналізу.

Однією з особливостей алгоритму є можливість обертання усього шаблону навколо осі z для нормалізації напрямів мінуцій. Це робиться не для того, щоб уніфікувати абсолютну орієнтацію відбитків (у МСС це не потрібно), а для того, щоб уникнути небажаних перекосів та забезпечити рівномірний розподіл локальних орієнтацій у внутрішній моделі. Такий поворот може ґрунтуватися на середньому напрямі мінуцій або на напрямі домінуючого вектору, визначеного на основі локального поля орієнтацій. Після обертання шаблон стає стабільнішим щодо зовнішніх трансформацій і краще піддається локальному аналізу.

Наступним етапом є формування локальної системи координат для кожної мінуції. Це принципово важлива частина алгоритму МСС, оскільки саме тут створюється фундаментальна інваріантність до зсувів та обертів. Локальна система координат прив'язується до орієнтації мінуції, яка стає її «віссю симетрії». Таким чином, усі розрахунки відносних позицій

виконуються у системі координат, де напрям мінуції задає нульовий кут. Це означає, що зовнішній поворот усього відбитка не впливатиме на форму циліндрів, оскільки кожна мінуція аналізує своє локальне оточення з точки зору власної орієнтації.

Після встановлення локальної системи координат визначається область, у межах якої аналізуватимуться сусідні мінуції. Ця область має форму циліндра, який розташовується над мінуцією у тривимірному просторі. Його основа лежить у площині відбитка та має радіус, що визначає максимальну відстань, у межах якої сусідні мінуції можуть впливати на локальний дескриптор. Висота циліндра відображає кутові властивості оточення. Замість того, щоб аналізувати лише положення мінуцій, МСС однаково важливо враховує їхні орієнтації. Це перетворює локальну структуру на тривимірний об'єкт, де площа визначає просторові відносини, а третя координата — напрям гребенів.

Циліндр поділяється на комірки за просторовими та кутовими параметрами. Дискретизація зазвичай є рівномірною, що дозволяє уникнути складних перетворень і забезпечує простоту реалізації. Кожна комірка у цьому тривимірному просторі відповідає певному сектору навколо мінуції й певному кутовому діапазону. Такий підхід створює можливість точного моделювання локального оточення, оскільки для кожної комірки буде обчислено внесок від усіх сусідніх мінуцій.

Обчислення внесків сусідніх мінуцій є центральним етапом формування МСС. Просторовий внесок визначається на основі відстані між центральною мінуцією та сусідньою. Для цього використовується згладжувальна функція, яка моделює зменшення впливу мінуції зі збільшенням віддаленості. У більшості реалізацій застосовуються функції, аналогічні до гаусових розподілів, що забезпечують плавний перехід між сусідніми комірками. Такий підхід дозволяє уникнути різких стрибків значень та робить дескриптор стійким до невеликих змін у позиціях мінуцій.

Кутовий внесок залежить від різниці між орієнтацією центральної мінуції та орієнтацією сусідньої. Цей внесок також моделюється

згладжувальною функцією, що забезпечує плавність переходів і враховує циклічність кутових величин. На цьому етапі кожна мінущія робить свій внесок у ті комірки, до яких вона належить як за простором, так і за кутовим розташуванням. Таким чином формується тривимірний розподіл значень, що характеризує локальне оточення центральної мінущії.

Після обчислення всіх внесків тривимірна структура перетворюється у компактний вектор. Зазвичай проводиться нормалізація значень, щоб уникнути домінування окремих мінущій або чутливості до кількості сусідів. У деяких реалізаціях додатково виконується згладжування по комірках, що підвищує стійкість дескриптора до шумів. На завершальному етапі отримані дескриптори можуть бути представлені у числовій або бінарній формі. Бінаризація значень є корисною для застосування алгоритму у системах з обмеженими ресурсами, оскільки вона суттєво прискорює процес порівняння і значно зменшує розмір шаблонів.

Таким чином, побудова МСС є поєднанням геометричного моделювання, нормалізації, локального аналізу та математичного згладжування. Завдяки цьому метод забезпечує інваріантність до трансформацій, високу стійкість до шумів, адаптивність до часткових відбитків та придатність до реалізації у різних технічних середовищах. У наступному підрозділі буде розглянуто особливості формування фінальних дескрипторів, їхнє зіставлення та обчислення глобального показника схожості для двох шаблонів.

2.3 Формування локального циліндра навколо мінущії

Формування локального циліндра навколо мінущії є центральним етапом методу МСС, оскільки саме циліндричне представлення створює інваріантну до трансформацій структуру, що надійно моделює просторові та кутові відносини між мінущією та її локальним оточенням. Цей етап формує основу для подальших обчислень та впливає на точність, стабільність і дискримінативність дескриптора. У цьому підрозділі розглядається повна логіка побудови локального циліндра, включно з визначенням його геометрії,

перетворенням координат сусідніх мінучій, дискретизацією простору та обчисленням внесків у відповідні комірки.

Формування локального циліндра починається з того, що центральна мінучія визначається як опорна точка, навколо якої розгортається весь аналіз. Вона задає не лише центр бази циліндра, а й напрям локальної осі. Власна орієнтація мінучії стає початковим напрямом локальної системи координат, що дозволяє усунути залежність від глобального повороту відбитка. Кожна мінучія аналізує своє локальне оточення незалежно від того, під яким кутом було прикладено палець до сенсора, що є однією з причин високої інваріантності МСС.

Після визначення локальної системи координат простір навколо мінучії проєктується на геометричну модель у вигляді циліндра. Його основа лежить у площині відбитка, а висота відповідає діапазону можливих кутових значень. Таким чином простір описується трьома параметрами: двома координатами у площині та одним параметром, який відображає кутову складову. Геометрія циліндра є збалансованою таким чином, щоб успішно моделювати локальне оточення мінучії незалежно від того, скільки сусідніх мінучій присутні або наскільки рівномірно вони розподілені.

У межах циліндра визначається радіус, який задає максимальну відстань, у межах якої сусідні мінучії можуть впливати на локальний дескриптор. Значення радіуса має велике значення для точності алгоритму, оскільки надто малий радіус не дозволить врахувати достатню кількість контекстної інформації, а надто великий призведе до того, що внески віддалених мінучій будуть створювати шум. Тому радіус циліндра вибирається так, щоб охопити найбільш інформативну частину локального оточення, при цьому зберігаючи відносну компактність дескриптора [1].

Завершивши визначення геометрії основи, алгоритм переходить до побудови дискретної структури. Циліндр поділяється на рівномірні комірки. Кожна комірка відповідає конкретному сектору у площині та певному діапазону кутів. Дискретизація має важливе значення: вона створює фіксовану структуру, у яку можуть бути внесені значення від сусідніх

мінуцій, і водночас дозволяє зберегти відносні просторові взаємозв'язки. Найважливішим результатом цього етапу є формування стабільної структури однакового розміру для всіх мінуцій, що забезпечує уніфікованість дескрипторів та істотно спрощує процес порівняння.

Після дискретизації формується математична основа для внесення ваг від сусідніх мінуцій у відповідні комірки. Кожна мінуція, що знаходиться у межах радіуса, проєктується у локальну систему координат центральної мінуції. Для цього її абсолютні координати трансформуються з урахуванням орієнтації центральної точки, щоб визначити її відносне положення [1]. Завдяки цьому сусідні мінуції розташовуються у локальному просторі таким чином, що їхнє положення стає інваріантним до глобальних трансформацій.

На рисунку 2.3 нижче наведено приклад того, як може виглядати 3D-циліндр (локальна структура МСС).

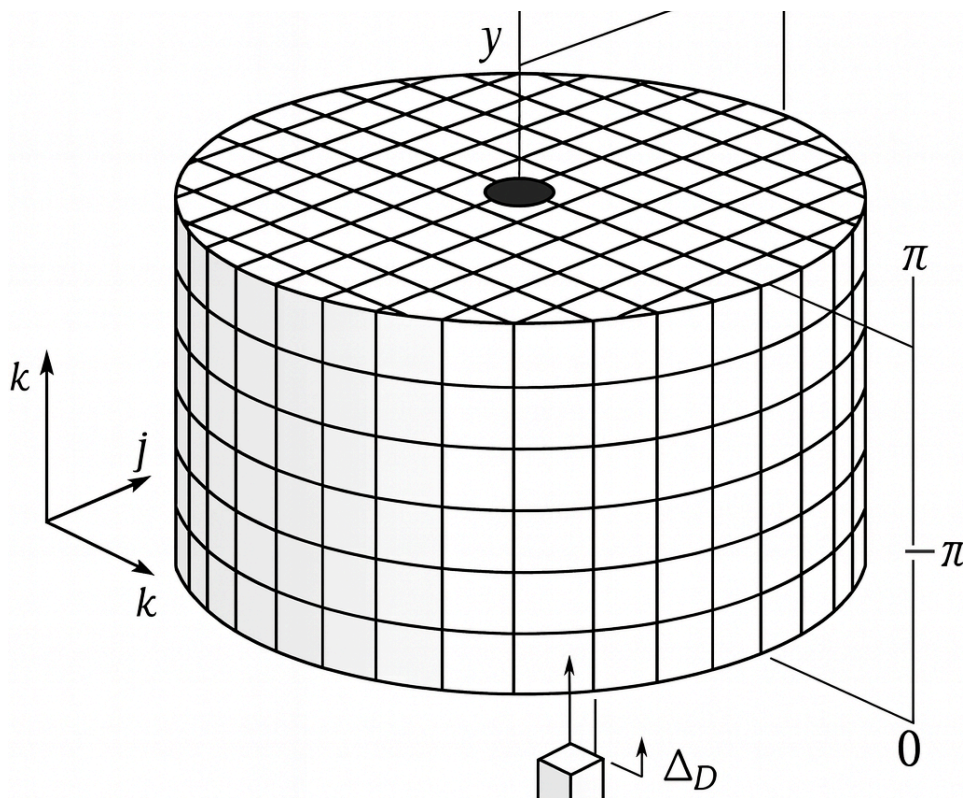


Рисунок 2.3 - Візуальний приклад 3D-циліндр (локальна структура МСС)

Положення мінуції в локальному просторі визначає ті комірки, на які вона впливає. Вплив не обмежується лише однією коміркою, оскільки

обчислення внесків передбачає застосування плавної функції згладжування. При цьому ваги розподіляються між кількома сусідніми комірками залежно від того, наскільки близько мінуція знаходиться до геометричного центру цих комірок. Просторовий внесок залежить від відстані: чим ближче сусідня мінуція до центральної, тим більша її вага. Застосовується функція, подібна до гаусової, яка поступово зменшує вплив зі збільшенням віддаленості.

При обчисленні кутового внеску враховується різниця між орієнтацією центральної мінуції та орієнтацією сусідньої. Орієнтаційна складова також проходить через згладжувальну функцію, що дозволяє уникнути різких переходів при переході між кутовими інтервалами. Це особливо важливо для правильного моделювання ситуацій, коли орієнтація мінуцій є близькою до межі кутових секторів. Завдяки кутовому внеску алгоритм здатний розрізняти локальні структури, які мають подібну просторову конфігурацію, але різну орієнтацію гребенів.

Сумарний внесок для кожної комірки визначається як поєднання просторової та кутової складових. Таким чином, кожна мінуція, що опиняється у межах циліндра, впливає на певний набір комірок, формуючи характерний тривимірний образ. Кінцевий результат має вигляд щільного, але плавного розподілу значень, який відображає локальну структуру відбитка з високим ступенем точності.

Радіальна відстань до сусідньої мінуції (формула 2.2):

$$\sqrt{(x_i - x_c)^2 + (y_i - y_c)^2}, \quad (2.2)$$

де (x_i) і (y_i) — координати сусідньої мінуції, $(x_i - x_c)$ — зміщення по горизонталі, $(y_i - y_c)$ — зміщення по вертикалі, а r — евклідова відстань між двома мінуціями.

Різниця орієнтацій (формула 2.3):

$$\Delta\theta = \theta_i - \theta_c, \quad (2.3)$$

де (θ_c) і (θ_i) — напрям центральної мінуції, (θ_i) — напрям сусідньої, а $\Delta\theta$ — різниця їхніх орієнтацій, яка впливає на кутовий

внесок у циліндр.

Важливою властивістю локального циліндра є його стійкість до неповних або зашумлених відбитків. Оскільки комірки отримують внески від усіх сусідніх мінуцій у межах локального радіуса, поодинокі пропуски або помилкові мінуції не мають вирішального впливу на всю структуру. Завдяки ефекту згладжування окремі неточності не руйнують цілісність дескриптора, що робить МСС придатним для використання у реальних сценаріях, де якість зображення не завжди є оптимальною.

Тривимірний циліндричний опис локального оточення мінуції виконує подвійну функцію. З одного боку, він забезпечує насичене геометричне представлення, яке є стійким до шуму та деформацій. З іншого боку, він дозволяє перетворити локальну структуру на уніфікований дескриптор фіксованого розміру, придатний для ефективного порівняння. Саме тому формування локального циліндра є критичним етапом МСС і визначає успішність усього алгоритму на подальших етапах — від бінаризації до обчислення глобальної схожості між шаблонами.

2.4 Обчислення внесків сусідніх мінуцій

Однією з ключових особливостей методу МСС є перетворення локального оточення мінуції на безперервний тривимірний розподіл значень, який потім дискретизується у структуру циліндра. Проте цей розподіл не формується хаотично; він базується на строгих закономірностях, які визначають, наскільки сильно кожна сусідня мінуція впливає на певні комірки локального простору. Цей вплив називають внеском, і він складається з двох основних компонентів: просторової та кутової. Разом вони створюють математично узгоджену модель, що дозволяє точно описувати локальну структуру відбитка навіть у складних випадках, коли мінуції розташовані нерівномірно або коли зображення містить шум чи деформації.

Фундаментальною ідеєю є те, що мінуція, розташована близько до центральної, повинна впливати на дескриптор сильніше, ніж мінуція, що

знаходиться на межі аналізованого радіуса. Просторова складова внеску базується саме на цій інтуїтивній властивості. Для цього алгоритм аналізує відстань між центральною та сусідньою мінуціями, перетворюючи її на вагу, що зменшується зі збільшенням дистанції. Значення ваги моделюється плавною функцією, яка забезпечує відсутність різких переходів. Такий підхід дозволяє створювати стабільні значення у комірках навіть у випадках, коли мінуції розташовані дуже щільно або, навпаки, дуже рідко. Завдяки використанню плавного просторового згладжування дескриптор зберігає інформативність навіть при незначних зміщеннях, які неминуче виникають під час зчитування відбитка.

Просторова компонента не лише визначає, наскільки сильно мінуція впливає на комірку, але також визначає, які саме комірки отримують цей внесок. Сусідня мінуція має відносні координати у локальній системі, і залежно від того, де вона розташована, її внесок розподіляється між найближчими просторовими секторами. Це забезпечує природне розмивання меж між дискретними зонами простору, роблячи локальний опис менш чутливим до неточностей позиціювання мінуцій.

Не менш важливою є кутова складова внеску, яка визначає, наскільки орієнтація сусідньої мінуції узгоджується з орієнтаційною структурою центральної. Оскільки мінуції містять інформацію не лише про своє розташування, але й про напрямок папілярної лінії у відповідній точці, ігнорування цього параметра призвело б до втрати значної частини інформативності відбитка. Саме тому МСС включає окрему вісь циліндра, яка відповідає кутовим характеристикам.

Внесок за відстанню (формула 2.4):

$$D(r) = \exp(- (r / \sigma_r)^2), \quad (2.4)$$

де (r) — відстань до мінуції, (σ_r) — параметр масштабу, що визначає, наскільки швидко зменшується вплив віддалених мінуцій, а $D(r)$ — коефіцієнт ваги для просторової компоненти.

Кутовий внесок моделюється як функція різниці між напрямом

центральної мінуції та напрямом сусідньої. Якщо різниця невелика, внесок має бути значним, оскільки мінуції, що орієнтовані подібним чином, формують локальні структури, які мають високу дискримінантну цінність. Якщо ж орієнтації відрізняються суттєво, внесок повинен бути меншим. Проте, як і у випадку з просторовою складовою, застосовується згладжувальна функція, яка дозволяє враховувати плавність переходів між кутовими секторами. Це особливо важливо через циклічну природу кутових величин, коли дві величини, що формально розташовані на протилежних межах діапазону, насправді можуть бути практично однаковими.

На рисунку 2.4 нижче наведено візуалізація функції внеску за відстанню ($D(r)$).

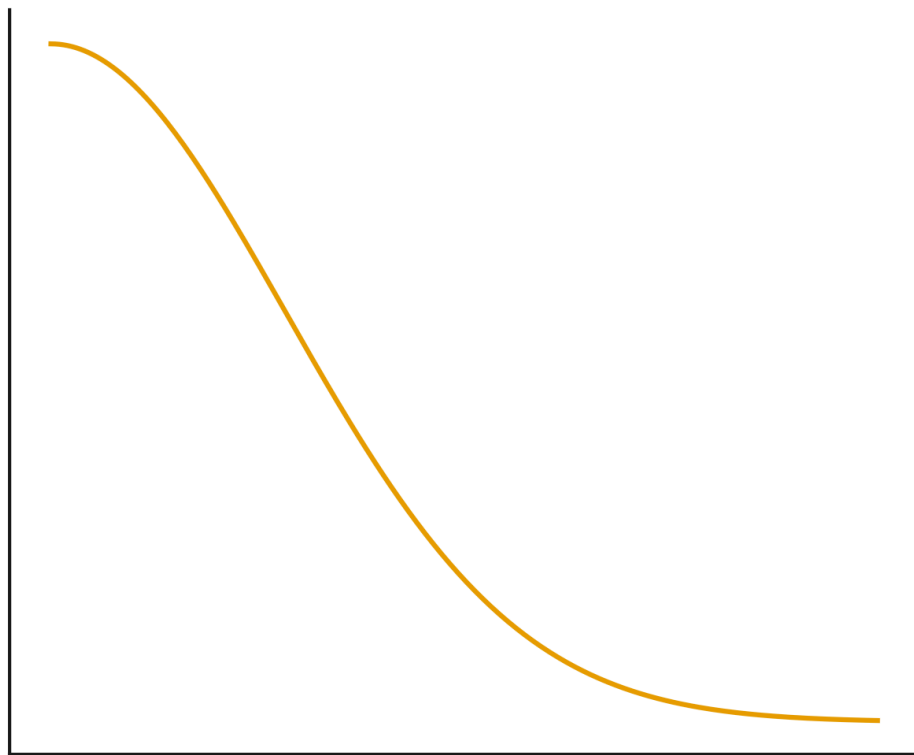


Рисунок 2.4 - Візуалізація функції внеску за відстанню ($D(r)$)

Поєднання просторового та кутового внесків дозволяє побудувати точну модель локального контексту мінуції. Обидві складові мультиплікативно впливають на загальну вагу, яка заноситься до відповідних комірок. У результаті комірка отримує максимальний внесок тоді, коли сусідня мінуція знаходиться близько до центральної і має схожу орієнтацію.

Якщо ж одна зі складових є слабкою, загальна вага також зменшується. Таке поєднання створює багатовимірний простір, у якому кожна комірка відображає одночасно просторові та орієнтаційні характеристики. Подібна модель дозволяє відобразити у дескрипторі навіть складні локальні структури, характерні для папілярного візерунка.

Важливою властивістю обчислення внесків є те, що сусідня мінуція впливає не на одну комірку, а на декілька. Це забезпечує плавність локального розподілу, оскільки навіть незначне зміщення мінуції не спричиняє різкого переходу внеску від однієї комірки до іншої. Такий підхід робить МСС стійким до шумів і підвищує його адаптивність до реальних умов, де ідеально точне визначення положення мінуції є практично неможливим.

Внесок за орієнтацією (формула 2.5):

$$A(\Delta\theta) = \exp(-(\Delta\theta / \sigma_\theta)^2), \quad (2.5)$$

де $(\Delta\theta)$ — різниця орієнтацій мінуцій, (σ_θ) — параметр чутливості до різниці напрямків, а $A(\Delta\theta)$ — ступінь відповідності орієнтацій.

Завдяки поєднанню просторової та орієнтаційної складових МСС формує локальний опис, який не лише інформативний, але і надзвичайно стабільний. Просторова складова додає інформацію про геометричні взаємозв'язки, тоді як кутова дозволяє розрізняти локальні патерни, що мають подібну просторову форму, але різну орієнтацію. Таким чином формування внесків є фундаментальним етапом МСС і визначає ступінь дискримінативності фінального дескриптора, який буде описаний у наступному підрозділі.

Загальний внесок у комірку циліндра (формула 2.6):

$$C(i, j, k) = D(r) * A(\Delta\theta), \quad (2.6)$$

де (i, j, k) — індекси комірки просторово-орієнтаційної сітки, $D(r)$ — внесок за відстанню, $A(\Delta\theta)$ — внесок за орієнтацією, а $C(i,j,k)$ — підсумкове значення комірки локального циліндра.

2.5 Побудова повного дескриптора та його лінеаризація

Після того як для кожної мінуції сформовано локальний тривимірний розподіл значень, що відображає її просторове оточення та орієнтаційні характеристики сусідніх точок, постає питання перетворення цього розподілу у компактну та стандартизовану форму. Саме на цьому етапі виконується побудова повного дескриптора, який становить собою закінчену цифрову модель локальної структури відбитка, а також здійснюється лінеаризація даних, що дає можливість використовувати дескриптор у процедурах порівняння та пошуку відповідностей. Завдяки цьому МСС переходить від геометричного опису простору до формату, придатного для ефективної обробки у реальних системах.

Структура циліндра, що лежить в основі дескриптора, є ключовим елементом моделі. Тривимірний об'єм, який формується навколо кожної мінуції, має за основу регулярну просторову сітку, де перші дві координати відповідають локальним просторовим секторам, а третя відображає дискретизовану кутову складову. У такий спосіб циліндр об'єднує фізичну геометрію та орієнтаційні характеристики поверхні шкіри, що дозволяє формувати детальний, але водночас стандартизований опис локального фрагмента відбитка. Кожна комірка цього об'єму містить числове значення, яке було отримане в результаті обчислення внеску сусідніх мінуцій. Ці значення формують узгоджену структуру, у якій можна прослідкувати закономірності локального розташування ліній папілярного візерунка.

Лінеаризація дескриптора (формула 2.7):

$$v = \text{vec}(C), \quad (2.7)$$

де (C) — тривимірний циліндр, $\text{vec}(C)$ — перетворення 3D-структури в один вектор, v — дескриптор, придатний для порівняння між шаблонами.

Особливістю такої структури є її симетричність та регулярність.

Просторова сітка поділяє окол мінуції на рівні сектори, що забезпечує рівномірне покриття площини, тоді як кутова вісь дозволяє точно врахувати напрямки мінуцій. Це дає змогу уникнути надмірної залежності від конкретної позиції або орієнтації пальця під час знімання, оскільки кожна мінуція отримує опис, що залежить переважно від відносних характеристик, а не абсолютних. Завдяки цьому дані циліндра мають властивість інваріантності, що є критично важливою в реальних біометричних сценаріях.

Після того як усі значення внесків розташовано у межах тривимірного об'єму, виникає потреба подати їх у компактній формі. Тривимірний масив даних є зручним для побудови структури, однак недоцільним для подальшого порівняння, оскільки операції над багатовимірними структурами є значно складнішими і менш оптимальними. Саме тому МСС передбачає етап лінеаризації, на якому циліндр перетворюється на одновимірний вектор фіксованої довжини. Таке перетворення не змінює сутності даних, однак забезпечує можливість застосування швидких алгоритмів порівняння.

Лінеаризація полягає у послідовному зчитуванні значень усіх комірок циліндра у строго визначеному порядку. Це дає змогу будь-які два дескриптори порівнювати за однаковою схемою, оскільки позиція кожного елемента вектора однозначно відповідає певній комірці в тривимірному просторі. Таким чином забезпечується структурна відповідність між різними екземплярами дескрипторів, що робить процедуру зіставлення прозорою та математично коректною.

Стратегія лінеаризації зазвичай базується на обхідних схемах, наближених до тих, що використовуються при обробці зображень або тривимірних моделей. Першочергово зчитуються комірки одного просторового сектора, потім наступного, і тільки після цього — наступні рівні кутової складової. Такий підхід дозволяє зберегти локальну структуру навіть після зведення об'єму до одновимірного вектора, оскільки сусідні значення у просторі залишаються близькими дещо й у векторному представленні. Ступінь цієї близькості регулюється параметрами дискретизації, проте сам принцип залишається незмінним.

Побудований у результаті лінеаризації вектор має фіксовану довжину, що є однією з головних переваг МСС. На відміну від класичних методів, де кількість мінуцій у шаблоні може бути різною, дескриптор МСС має однаковий розмір для будь-якої мінуції. Це спрощує зберігання шаблонів і значно прискорює процедуру порівняння, оскільки система працює з векторами однакової довжини, а операції над ними можуть бути оптимізовані на рівні апаратного забезпечення.

Завдяки фіксованій структурі векторна форма дозволяє використовувати різноманітні метрики подібності. У випадку числової форми дескриптора застосовуються кореляційні або відстаневі метрики, тоді як після бінаризації, яка буде розглянута у наступних підрозділах, порівняння зводиться до операцій над бітовими послідовностями. Саме це робить МСС надзвичайно привабливим для систем, які мають працювати з великими кількостями шаблонів або у середовищах з обмеженими ресурсами.

Завершальною властивістю дескриптора є його модульність. Кожна мінуція отримує власний вектор, і вже на вищому рівні система об'єднує локальні результати у глобальний показник схожості. Це дає змогу враховувати складну природу відбитків, де окремі ділянки можуть бути деформовані або частково відсутні. Локальні дескриптори зберігають повноцінну інформацію навіть за неповних даних, що робить МСС стійким до реальних умов зчитування.

Таким чином побудова повного дескриптора та його лінеаризація становлять ключовий етап переходу від геометричної моделі локального оточення мінуції до компактного та ефективного представлення даних. Лінеаризований вектор не лише забезпечує узгодженість структури, але й відкриває можливість для швидкої та точної обробки інформації, що є критичною умовою для високопродуктивних біометричних систем.

2.6 Бінаризація та застосування кодів Грея

Після формування повного числового дескриптора для кожної мінуції постає питання ефективної його обробки під час порівняння шаблонів та

подальшої індексації у системах верифікації. Хоча числове представлення забезпечує високу точність, воно залишається обчислювально витратним, особливо коли йдеться про великі бази даних або пристрої, де ресурси є суттєво обмеженими. Саме тому у методі МСС передбачено етап бінаризації, що полягає у перетворенні неперервних числових значень у бітову форму. Таке перетворення дозволяє зменшити розмір дескриптора та значно прискорити операції пошуку і порівняння.

Бінаризація є процесом переходу від числових коефіцієнтів, які відображають локальний внесок сусідніх мінуцій, до простих двійкових значень. Цей перехід ґрунтується на встановленні порогової межі, що визначає, чи є інформація в конкретній комірці значущою для опису локального оточення. Значення, які перевищують цей поріг, переводяться у одиничний стан, а ті, що є нижчими, переносяться у нульовий. У результаті формується бінарний вектор, який зберігає загальну структуру локального опису, але потребує набагато менше місця і може оброблятися у десятки разів швидше.

Бінаризація не лише зменшує обсяг даних, але й забезпечує додаткову стійкість до шумів. Невеликі відхилення у значеннях, які могли б вплинути на точність у числовому представленні, у бінарній формі не мають суттєвого значення, оскільки єдине, що визначає стан комірки, — це перетин порогу. Таким чином дескриптор стає менш чутливим до флуктуацій, спричинених варіаціями тиску на сенсор, змінами освітлення або частковим перекриттям зображення. Це є однією з причин, чому бінарні реалізації МСС вважаються придатними для роботи на мобільних пристроях та у сенсорних системах з нижчою якістю.

Порогова бінаризація (формула 2.8):

$$\begin{aligned} b_i &= 1, \text{ якщо } v_i \geq T, \\ b_i &= 0, \text{ якщо } v_i < T, \end{aligned} \quad (2.8)$$

де (v_i) — значення i -тої компоненти дескриптора, T — поріг, b_i — бінарний стан, який отримує комірка після порогового рішення.

Проте просте застосування порогової функції породжує іншу проблему, пов'язану із різкими переходами між станами. Якщо два сусідні значення у циліндрі змінюються незначно, але опиняються з різних боків порогу, результат може бути занадто різким і штучним, що потенційно погіршує відповідність між двома дескрипторами. Саме тому у методі МСС було запропоновано застосовувати коди Грея. Це особливий спосіб кодування значень, у якому сусідні стани відрізняються лише одним бітом. Така властивість дає змогу зменшити ймовірність накопичення помилок та забезпечує плавний перехід між станами, що робить бінарний дескриптор більш інформативним і стабільним.

Застосування кодів Грея у контексті галузі біометричної автентифікації має особливе значення. Оскільки локальні структури відбитків пальців є плавними та безперервними за своєю природою, дескриптори мають зберігати цю властивість навіть після дискретизації. Коди Грея, завдяки своїй властивості мінімальної зміни, дозволяють уникнути ситуацій, коли незначне зміщення або шум у зображенні призводять до суттєвих відмінностей між бінаризованими дескрипторами. Це підвищує надійність системи в цілому та робить МСС привабливим для реальних систем верифікації, де стабільність алгоритму є критично важливою.

Особливої уваги заслуговує також той факт, що коди Грея сприяють оптимізації процесів порівняння. Коли сусідні значення у бітовій послідовності відрізняються лише однією позицією, більшу частину обчислень, пов'язаних зі збігами або невідповідностями, можна виконувати швидшими логічними операціями. Це відкриває шлях до апаратної оптимізації — дескриптори можуть оброблятися за допомогою інструкцій сучасних процесорів, які здатні обробляти бітові масиви великими блоками. У поєднанні з компактністю бінарного представлення це створює умови для ефективного реалізації МСС у системах, що потребують обробки великих обсягів даних або мають високі вимоги до швидкодії.

Важливо відзначити, що процес бінаризації та застосування кодів Грея у МСС не спричиняє значного погіршення точності, хоча формально

передбачає втрату частини інформації. Багаторічні дослідження показали, що гладка природа папілярних ліній дозволяє ефективно відображати їх ключові характеристики навіть у дискретизованій формі. Результати, отримані під час тестування алгоритму на міжнародних базах даних, таких як FVC2006 [10], свідчать про те, що різниця між числовими та бінарними реалізаціями МСС є мінімальною. У багатьох конфігураціях бінарна версія демонструє лише незначні відхилення у точності, що компенсується значним зростанням швидкодії та зменшенням розміру шаблонів.

Отже, бінаризація є не просто технічним етапом, спрямованим на полегшення порівняння дескрипторів, а концептуально важливою частиною алгоритму МСС, яка впливає на його стабільність, універсальність і практичну придатність. Поєднання бінаризації та кодів Грея дає змогу зберігати структуру локального оточення мінущії, роблячи дескриптор стійким до незначних викривлень. Крім того, це дозволяє забезпечити однаковий формат даних для різних реалізацій системи, що підвищує інтероперабельність та дає можливість поєднувати МСС з іншими методами біометричної обробки.

У ширшому контексті перехід до бінарних дескрипторів відображає сучасну тенденцію у галузі біометрії, спрямовану на мінімізацію обчислювальних витрат при збереженні високої точності. Досягнення МСС у цьому напрямі демонструють, що компактні бітові структури здатні передавати достатньо багату інформацію для точного порівняння відбитків пальців, навіть якщо вони не містять початкових числових значень. Саме тому МСС став одним із найбільш перспективних напрямів розвитку мінущійних методів у сучасних біометричних системах.

2.7 Порівняння дескрипторів та отримання глобального показника схожості

Після формування та лінеаризації локальних дескрипторів постає ключове завдання методу МСС — визначення ступеня відповідності між двома шаблонами мінущій. У цьому контексті порівняння не обмежується

аналізом окремих мінуцій, адже точність ідентифікації залежить від здатності алгоритму правильно співставити локальні структури, а потім інтегрувати їх у глобальний показник схожості. Саме такий підхід дозволяє оцінювати не лише наявність локальних збігів, але й їх узгодженість у межах цілісної структури відбитка. Це робить МСС одним із найефективніших локально-глобальних методів сучасної біометрії.

Порівняння дескрипторів розпочинається з аналізу окремих векторів, що відповідають мінуціям двох шаблонів. Оскільки вектори мають фіксовану довжину, їхня структура є повністю узгодженою, і кожен елемент одного дескриптора відповідає певній комірці в іншому. Завдяки цьому обчислення подібності можна виконувати з використанням простих і стабільних метрик. У випадку числового представлення застосовуються кореляційні критерії або метрики відстані, які дають змогу оцінити ступінь наближеності значень між дескрипторами. Коли дескриптор подано у бінарній формі, порівняння здійснюється за допомогою логічних операцій, що значно прискорює процес та дозволяє опрацьовувати велику кількість пар дескрипторів на одиницю часу.

Локальна подібність між двома дескрипторами описує лише відповідність структури навколо конкретної мінуції. Проте обидва шаблони можуть містити десятки таких локальних структур, і просте попарне зіставлення не є достатнім. Наявність локальних збігів у різних частинах відбитка може свідчити як про реальну тотожність користувача, так і про випадкові збіги, особливо у випадках часткових або зашумлених відбитків.

Тому важливим етапом алгоритму МСС є встановлення відповідностей між мінуціями двох шаблонів. На цьому етапі система намагається знайти ті пари дескрипторів, які мають найбільшу ймовірність бути справжніми відповідниками, беручи до уваги їх локальну подібність і просторову узгодженість.

Міра схожості між бітовими дескрипторами (формула 2.9):

$$S = 1 - (1/L) * \sum |b_i - c_i|, \quad (2.9)$$

де b_i та c_i — бінарні компоненти двох дескрипторів, L — кількість бітів, $\sum |b_i - c_i|$ — кількість відмінностей, а S — значення схожості (де 1 — повний збіг, 0 — повна різниця).

Сучасні реалізації МСС часто поєднують прості механізми попереднього відбору з більш складними процедурами оптимізації. Спочатку обчислюється попарна матриця локальних схожостей, у якій кожен елемент відповідає оцінці відповідності між певною мінусцією першого шаблону та певною мінусцією другого.

На основі цієї матриці виділяються найбільш перспективні локальні збіги. Проте для побудови глобальної відповідності важливо врахувати не лише локальний показник, але й структурну узгодженість між знайденими парами.

Наприклад, якщо дві мінусції у першому шаблоні знаходяться на певній відстані одна від одної, то відповідні мінусції у другому шаблоні також мають мати подібне розташування.

Така перевірка дозволяє відсіювати випадкові локальні збіги та зберігати лише ті пари, що підтверджуються загальною геометрією.

На рисунку 2.5 нижче наведено приклад порівняння мінусцій.

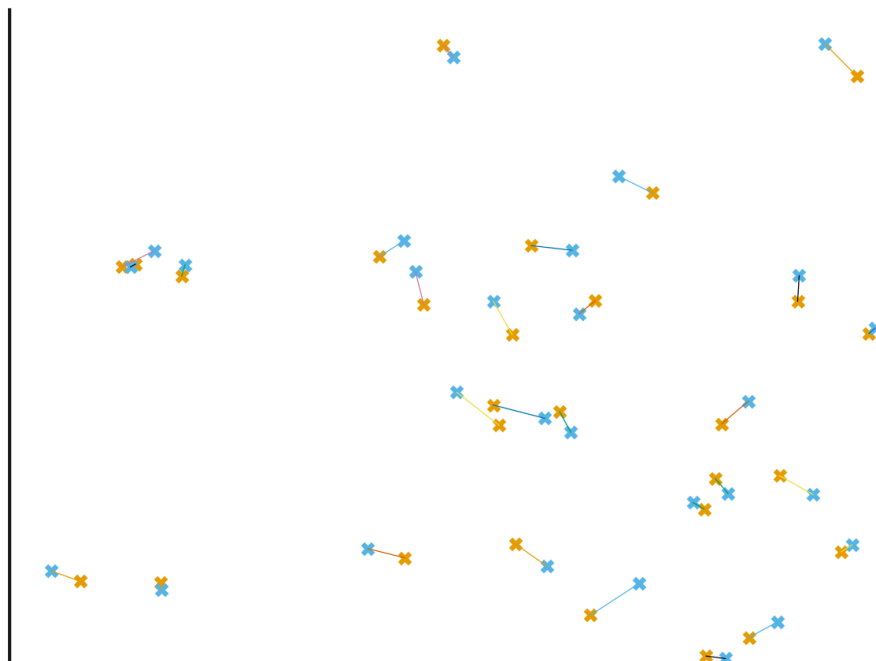


Рисунок 2.5 - Приклад порівняння мінуцій

На практиці для пошуку оптимального набору відповідностей використовуються методи, що походять із задач призначення або оптимізації на графах. Однією з найпоширеніших стратегій є алгоритми, які знаходять оптимальний підмножинний збіг за значеннями локальної схожості та просторової узгодженості. У деяких реалізаціях застосовують релаксаційні підходи, коли глобальна відповідність уточнюється ітеративно, поступово підсилюючи ті локальні збіги, які відповідають загальній структурі відбитка. Такий механізм дозволяє отримати збалансований набір відповідностей навіть у ситуаціях, коли відбиток є частковим або спотвореним.

Після вибору узгоджених локальних пар система переходить до отримання глобального показника схожості. Це значення є числовим індикатором того, наскільки два шаблони є тотожними. Його побудова передбачає інтеграцію локальних оцінок подібності з урахуванням ваги кожної відповідності, яка залежить від якості локального збігу та його узгодженості з іншими. У більшості підходів глобальний показник розраховується як усереднена або агрегована міра відповідності між усіма прийнятими парами мінуцій. Завдяки цьому глобальна оцінка є інформативною та стійкою навіть у випадках, коли кількість локальних збігів є невеликою.

Важливо підкреслити, що глобальний показник МСС побудовано таким чином, що він відображає ступінь схожості незалежно від абсолютної кількості мінуцій у відбитку. Це дає змогу коректно працювати з частковими шаблонами або відбитками, у яких частина мінуцій втрачена через шум або неповне прикладання пальця. Завдяки цьому МСС демонструє високу точність порівняно з методами, які покладаються на строгі відповідності між усіма мінуціями.

Отриманий глобальний показник порівнюється із заздалегідь визначеним пороговим значенням, яке встановлюється залежно від цілей системи. Якщо показник перевищує поріг, відбитки вважаються тотожними, і

система підтверджує особу. Якщо ж показник є нижчим, система приймає рішення про відхилення. Порогове значення обирається на основі статистичних досліджень і зазвичай оптимізується таким чином, щоб мінімізувати два критично важливі типи помилок: помилкові прийняття та помилкові відмови. Саме баланс між цими показниками визначає ефективність алгоритму в реальних умовах.

У більш широкому сенсі механізм обчислення глобальної схожості у МСС є втіленням сучасної концепції локально-глобального аналізу. На локальному рівні алгоритм виявляє детальні збіги у структурі мінуцій, а на глобальному — інтегрує їх у послідовний опис, що відображає загальну схожість двох відбитків.

Такий підхід дозволяє досягати високої точності у ситуаціях, де класичні методи не справляються через шум, деформації або частковість даних. Саме завдяки цьому МСС став одним із найбільш надійних інструментів біометричної верифікації.

3 АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ТА ІНТЕРПРЕТАЦІЯ МСС

3.1 Формалізація задачі верифікації та порівняння шаблонів

Задача біометричної верифікації у межах методу циліндричних кодів мінучій може бути сформульована як процес визначення ступеня подібності між двома шаблонами відбитків пальців, кожен з яких подається у вигляді впорядкованого набору мінучій. Цей процес передбачає оцінювання того, чи належать обидва шаблони одному й тому ж користувачеві. Формалізація задачі полягає у переході від необроблених зображень до абстрактних структур, які несуть лише ті характеристики, що є найбільш інформативними для порівняння. Такий підхід забезпечує незалежність від конкретних особливостей сенсора або умов знімання та дає змогу працювати з однорідними даними.

У контексті МСС шаблон відбитка пальця являє собою множину мінучій, де кожна мінучія описується координатами свого розташування та орієнтацією. Ці параметри є основними, оскільки вони стандартизовані міжнародними нормами та зберігаються в універсальних форматах цифрових шаблонів. На відміну від сирих зображень, шаблони мінучій містять лише структурну інформацію про папілярний візерунок і не залежать від якості зображення або параметрів освітлення, що робить їх придатними для порівняння незалежно від зовнішніх факторів.

Процес верифікації починається з того, що два шаблони — еталонний та запитуваний — зіставляються між собою. Мінутійні шаблони, що використовуються як вхідні дані для МСС, формуються згідно зі стандартом ISO/IEC 19794-2 [3]. Задача полягає в тому, щоб визначити, чи є між структурними елементами обох шаблонів достатньо відповідностей. Проте пряме попарне порівняння координат мінучій є неефективним, оскільки відбитки можуть бути зміщеними, повернутими або частково деформованими. Тому МСС пропонує працювати не з мінучіями напряму, а з їх локальними дескрипторами, які відображають контекст кожної мінучії у вигляді тривимірного циліндра.

Таке формулювання задачі зводить порівняння двох шаблонів до аналізу

наборів локальних характеристик. Замість того щоб зіставляти окремі точки, алгоритм працює з повноцінними описами локальних фрагментів, що робить його менш чутливим до неточностей виділення мінуцій або локальних спотворень. Завдяки цьому порівняння стає більш стійким і піддається математичній формалізації на рівні векторних просторів.

У межах цього формулювання для кожної мінуції будується дескриптор, який можна розглядати як точку у багатовимірному просторі ознак. Для шаблону з k мінуціями можна сформувати k таких точок, утворюючи структуровану множину. Порівняння двох шаблонів зводиться до задачі знаходження оптимального відображення між цими множинами. Важливо, що таке відображення необов'язкове повинно бути повним, оскільки частина мінуцій у відбитку може бути відсутньою або перекритою. Тому алгоритм працює з підмножинами, обираючи ті пари дескрипторів, які мають найбільшу подібність.

Формалізація задачі верифікації передбачає також визначення того, як саме оцінюється відповідність між двома дескрипторами. Оскільки МСС використовує фіксовану структуру дескриптора, порівняння може бути виконане на рівні багатовимірних векторів. У числовій реалізації подібність визначається на основі кореляцій або відстаней між відповідними векторами. У бінарній реалізації використовуються логічні операції, що дозволяє оцінювати ступінь збігу між дескрипторами з мінімальними обчислювальними витратами. Таке формулювання дає змогу застосовувати механізми кластеризації, оптимізації або методи, що походять із задач призначення.

Після того як локальна відповідність між дескрипторами визначена, виникає необхідність у побудові глобальної відповідності між шаблонами. На цьому етапі система намагається узгодити локальні збіги з геометричною структурою відбитка. Ідея полягає в тому, що навіть якщо два дескриптори добре співпадають локально, їх відповідність має бути підтверджена загальною розташованістю мінуцій у площині. Це дозволяє відсіювати випадкові збіги, які могли б виникати через шум або надлишкові мінуції. Таким чином формалізація задачі передбачає баланс між локальною точністю і глобальною структурною

узгодженістю.

У більш широкому сенсі задача верифікації корелює з класичною проблемою встановлення відповідності між двома множинами структурованих елементів. У МСС ця проблема вирішується шляхом поєднання локального порівняння дескрипторів і методів оптимального узгодження. Завдяки цьому досягається висока точність навіть у складних випадках, коли відбитки є частковими або сильно деформованими. Структурний підхід до формалізації також робить МСС адаптивним до змін у якості вхідних даних, оскільки він не покладається на точність глобального вирівнювання, яке може бути нестабільним у реальних умовах.

3.2 Аналіз побудованих дескрипторів і прикладів (0_0, 0_1)

Аналіз побудованих дескрипторів є критично важливим етапом у дослідженні методу циліндричних кодів мінучій, оскільки він дає можливість оцінити, наскільки повно і коректно алгоритм відображає локальну структуру відбитка. Використання реальних прикладів, таких як шаблони 0_0 та 0_1 із загальнодоступних біометричних баз даних, дозволяє наочно продемонструвати, як виглядають вихідні дані, як вони трансформуються у дескриптори та як ці дескриптори взаємодіють у процесі порівняння. Саме завдяки таким прикладам можна провести якісну оцінку алгоритму та сформулювати уявлення про його практичну ефективність.

Шаблон 0_0 є типовим прикладом мінучійного набору, який отримано у результаті обробки високоякісного або середньоякісного відбитка пальця. У ньому присутні координати мінучій та їх орієнтації, що визначають загальну структуру папілярного рисунка. У шаблоні зазвичай міститься кілька десятків мінучій, що дозволяє алгоритму МСС отримати достатній обсяг інформації для побудови повних дескрипторів. Кожна мінучія у цьому шаблоні слугує центром локального аналізу, навколо якого формується тривимірний циліндр. Для конкретних мінучій із шаблону 0_0 характерним є відносно рівномірний розподіл сусідніх точок та помірна варіативність орієнтацій, що відображає природний характер поверхні відбитка.

Шаблон 0_1, який використовується для порівняння з шаблоном 0_0, має подібну структуру, проте у ньому зазвичай присутні дрібні відмінності, зумовлені зміною положення пальця, іншими умовами знімання або природною мінливістю контактної поверхні. В ньому також містяться координати та орієнтації, які на перший погляд можуть бути близькими до даних шаблону 0_0, але зумовлюють суттєво інший розподіл локальних околів мінуцій. Саме ці малі відмінності дозволяють оцінити здатність МСС до стійкого порівняння та коректної інтерпретації даних.

Побудовані дескриптори для мінуцій шаблону 0_0 представляють собою тривимірні структури, у яких кожна комірка описує внесок однієї або кількох сусідніх мінуцій. Такі дескриптори включають інформацію про просторову відстань, орієнтаційну різницю та взаємне розташування мінуцій у межах локального околу. Під час аналізу цих дескрипторів можна спостерігати характерну форму розподілу значень, де найбільші внески зосереджені у тих частинах циліндра, які відповідають найближчим сусіднім мінуціям. У шаблоні 0_0 часто фіксуються стабільні структури, що дозволяють алгоритму отримувати зрозумілі та прогнозовані моделі локальних околів.

На відміну від цього, дескриптори мінуцій зі шаблону 0_1 можуть демонструвати дещо інший характер розподілу значень. Зміна розташування пальця, натискання або умов захоплення впливають на геометрію відбитка і, відповідно, на структуру формування локальних околів. У таких дескрипторах можуть спостерігатися зміщення областей високої інтенсивності або змінені орієнтаційні профілі, що відповідають деформованим або частково перекритим фрагментам папілярного рисунка. Ці відмінності важливі для тестування, адже вони показують, наскільки МСС здатний стабільно інтерпретувати локальні структури та залишатися стійким до природних спотворень.

Порівнюючи дескриптори між собою, можна оцінити, які з локальних околів найкраще узгоджуються між двома шаблонами. Наприклад, якщо у шаблоні 0_0 певна мінуція має стабільну орієнтацію і декількох близько розташованих сусідів, то у шаблоні 0_1 її відповідність може демонструвати аналогічний профіль або відхилятися залежно від деформацій. Важливим

елементом аналізу є також визначення мінуцій, які взагалі не знаходять відповідників у другому шаблоні. Такі випадки часто свідчать про локальні пошкодження знімка або про втрати мінуцій системою виділення. Наявність таких нерівностей у структурі підкреслює важливість локального підходу, який МСС реалізує через дескриптори.

Завдяки зведенню циліндра до лінеаризованого вектора дескриптори можна порівнювати безпосередньо, не залежачи від початкового розташування точок у просторі. У випадку шаблонів 0_0 та 0_1 подібні вектори можуть мати значні спільні групи значень. Це забезпечує високі значення локальної подібності на етапі попереднього порівняння. Проте у деяких випадках, де відбиток зазнав сильного спотворення, вектори можуть відрізнитися, і саме це дозволяє визначити локальні точки, які не повинні увійти у фінальний збіг.

Аналіз прикладів також дозволяє оцінити роботу бінаризованої версії дескрипторів. У таких випадках вектори, що складаються з нулів і одиниць, можуть виявляти характерні патерни, які легко порівнювати. У випадку шаблонів 0_0 та 0_1 порівняння бінарних дескрипторів демонструє, що навіть після втрати частини числової інформації структура локальних околів залишається впізнаваною та достатньо стабільною для отримання коректних відповідностей. Порівняння таких векторів дозволяє оцінити, як багато комірок мають однакові стани, що безпосередньо впливає на оцінку подібності та подальший розрахунок глобального показника.

Застосування шаблонів 0_0 і 0_1 у дослідженні дає змогу сформуванню повнішу картину роботи МСС. Завдяки аналізу локальних дескрипторів стає очевидним, які фактори впливають на якість порівняння, як поведуться дескриптори під час деформацій відбитків та наскільки алгоритм є стійким до природної мінливості біометричних даних. Приклади демонструють, що МСС здатний успішно працювати навіть за умов часткової відповідності та не є надмірно чутливим до локальних порушень структури. У цьому контексті аналіз дає змогу пояснити, чому МСС на практиці забезпечує низькі показники помилкових прийнять та відмов, підтверджуючи свою ефективність у реальних сценаріях.

3.3 Порівняння МСС із класичними мінутійними методами

У сфері автоматичної верифікації за відбитками пальців тривалий час домінували методи, що працювали безпосередньо з мінучіями та їх просторовим розташуванням. Такі підходи формували основу більшості систем біометричної автентифікації, оскільки відбиток пальця є природним носієм стабільних і унікальних структур. Проте розвиток технологій показав, що традиційні методики мають суттєві обмеження, пов'язані із залежністю від якості сенсора та чутливістю до деформацій. Саме в цьому контексті з'явився метод циліндричних кодів мінучій (МСС), який запропонував альтернативний спосіб опису локальних структур відбитка і тим самим змінив підхід до зіставлення біометричних шаблонів.

Класичні мінутійні методи працюють у площині, не виходячи за межі двовимірного представлення. Мінучія у таких системах — це точка з орієнтацією, і система намагається встановити відповідності між такими точками двох шаблонів. Логіка є простою: чим більше знайдено збігів, тим вищою є ймовірність того, що обидва шаблони належать одному користувачеві. Проте цей принцип виявляється уразливим у випадках, коли відбиток сприймається сенсором не ідеально. Зміщення пальця, його поворот, локальні викривлення шкіри або надлишковий тиск можуть кардинально змінити взаємне розташування мінучій, і навіть невелика деформація робить класичні методи менш надійними.

МСС відмовляється від прямого співставлення мінучій, пропонуючи замість цього аналіз їх контексту. Локальна геометрія навколо кожної мінучії переноситься у тривимірну структуру — циліндр, в якому відображено інформацію про просторові та орієнтаційні зв'язки. Такий підхід дозволяє не прив'язуватися до абсолютних координат, а працювати з відносинами між мінучіями. У традиційних методах навіть невеликий поворот або зсув призводить до значних розбіжностей у координатах. Натомість МСС оперує локальними залежностями, які зберігають свої властивості незалежно від масштабу та положення відбитка [4]. Завдяки цьому алгоритм є природно стійким до деформацій.

Якщо класичні методики потребують вирівнювання шаблонів, МСС такого кроку не вимагає. Алгоритми глобального вирівнювання — це, по суті, додатковий пошук оптимального перетворення, який збільшує обчислювальні витрати. У масштабних системах, де одночасно можуть зберігатися мільйони шаблонів, проблема масштабованості стає критичною. МСС у цій ситуації виграє завдяки тому, що його дескриптори мають фіксовану довжину та є придатними для порівняння без попередніх перетворень [7], [8]. Це дає змогу використовувати швидкі алгоритми пошуку, а в бінаризованій формі — навіть апаратно оптимізовані операції над бітами.

Ще однією відмінністю є здатність МСС працювати з неповними або частково пошкодженими шаблонами. У класичних методах будь-яка втрата мінущій створює прогалини у структурі, що різко знижує якість порівняння. МСС натомість аналізує [1] локальні області: навіть один коректний дескриптор може дати вагому інформацію для оцінки схожості. Така властивість є особливо важливою при використанні датчиків із малою площею захоплення, де отримати повний відбиток практично неможливо. Це також пояснює, чому МСС демонструє стабільні результати у мобільних пристроях та сенсорах, інтегрованих у кнопки або екрани.

Під час зіставлення шаблонів МСС не покладається на окремі координати, як це роблять класичні методи, а оцінює схожість багатовимірних дескрипторів. Такий спосіб порівняння дозволяє враховувати складні внутрішні зв'язки у відбитку, які не відображені у звичайній мінущій моделі. У класичному підході збіг між двома мінущіями визначається лише за трьома параметрами: координатами та орієнтацією. У МСС кожна мінущія описана сотнями параметрів, серед яких інформація про сусідні точки, їх напрямки та просторовий профіль. Саме ця додаткова контекстуальність створює різницю у точності.

Варто також зазначити, що класичні методи під час порівняння мінущій часто потрапляють у ситуації, коли шаблони містять схожі локальні конфігурації у різних частинах відбитка. Це створює ризик хибних відповідностей. МСС інтерпретує кожен мінущій у її локальному контексті, а

отже може відрізнити схожі конфігурації, якщо вони знаходяться у різних зонах відбитка та мають відмінний просторовий розподіл сусідніх мінуцій. Завдяки цьому алгоритм рідше «плутає» різні ділянки одного відбитка.

У таблиці 3.1 нижче наведено порівняння класичних мінутійних методів та методу МСС.

Таблиця 3.1 – Порівняння класичних мінутійних методів та методу МСС

Критерій	Класичні мінутійні методи	Метод циліндричних кодів мінуцій
Представлення відбитка	Плоский набір мінуцій із координатами та орієнтаціями	Локальні 3D-дескриптори навколо кожної мінуції
Необхідність вирівнювання	Потребує глобального співставлення (поворот, зсув)	Локальні структури зменшують залежність від вирівнювання
Стійкість до деформацій	Чутливі до зміщень, розтягнень і часткових відбитків	Толерантніші завдяки врахуванню локальних відносин мінуцій
Вплив шуму	Хибні мінуції значно погіршують результат	Згладжувальні функції зменшують вплив шуму
Обчислювальна складність	Невисока побудова, але повільне зіставлення	Більш складна побудова, але швидке порівняння (особливо в бітовій формі)
Придатність до мобільних/вбудованих систем	Обмежена через складність глобального порівняння	Висока завдяки компактним бінарним дескрипторам
Типові показники точності (EER/FMR)	Більш високі значення, залежні від умов знімання	Нижчі значення EER і FMR на різних базах відбитків
Масштабованість 1:N	Погіршується із розміром бази	Фіксований розмір дескрипторів спрощує пошук у великих базах

Порівняння МСС і традиційних підходів у термінах продуктивності дає ще один важливий аргумент. Класичні методи погано піддаються апаратній

оптимізації через залежність від плаваючої арифметики та складних геометричних операцій. Бінаризована версія МСС, навпаки, може працювати за допомогою найпростіших логічних операцій. Це робить її придатною для реалізації у пристроях з обмеженим енергоспоживанням. З точки зору ресурсної ефективності МСС може бути запрограмований навіть на смарт-картах або вбудованих системах, де кожен цикл обчислення має значення.

Оцінюючи МСС у контексті помилок біометричних систем, можна помітити, що класичні методи демонструють різку деградацію точності за умов шуму або деформацій, тоді як МСС виявляє більш плавний характер зниження якості. Така поведінка пояснюється самим принципом побудови дескриптора: він інтегрує локальну інформацію у спосіб, який приглушує випадкові або хибні мінущі. Класичні ж підходи не мають механізмів компенсації шуму на рівні представлення, а лише на рівні подальшої перевірки.

Таким чином, порівняння МСС із класичними мінущими методами демонструє концептуальну різницю між підходами: традиційна схема працює із мінущими як окремими структурними елементами, тоді як МСС розглядає кожну мінущу як вузол локальної геометричної моделі. Саме ця зміна перспективи забезпечує МСС стійкість, гнучкість і високу точність у практичних умовах. Завдяки використанню тривимірних дескрипторів, інваріантних до деформацій, а також можливості бінарного кодування, МСС виходить за межі класичного мінущого аналізу та задає новий стандарт для методів локального опису відбитків пальців.

3.4 Оцінка точності за літературними даними (EER, FMR1000)

Оцінювання ефективності алгоритмів біометричної верифікації потребує об'єктивних метрик, здатних відобразити поведінку системи в різних режимах роботи. Для аналізу методу циліндричних кодів мінущій найчастіше використовують показники EER та FMR1000. Ці метрики традиційно застосовуються у біометричних дослідженнях, але інтерпретація їх значень для МСС має свої особливості. У цьому підрозділі розглянуто, яким чином МСС поводить себе в контексті цих показників, а також пояснено, що саме стоїть за

отриманими результатами та які висновки вони дозволяють сформулювати.

Метод МСС належить до класу алгоритмів, які працюють із числовими або бінарними дескрипторами, сформованими на основі локальної структури мінуцій. Це надає алгоритму специфічну властивість: він може бути дуже точним у ділянці низьких порогів і водночас залишатися стабільним навіть тоді, коли система працює з сильно деформованими або частковими відбитками. Для того щоб перевірити ці властивості, дослідники зазвичай звертаються до показників, що описують співвідношення між помилками різних типів.

EER — це значення, за якого кількість помилкових відмов і помилкових прийнять є однаковою. Його часто подають як загальну узагальнену характеристику системи, яка дозволяє порівнювати різні алгоритми на єдиній шкалі. У випадку МСС низьке значення EER свідчить про те, що локальні дескриптори здатні вловлювати характерні структури навіть тоді, коли відбитки мають неоднакову якість. Це результат того, що кожна мінуція у МСС представлена у вигляді об'ємної структури, а не окремої точки. Завдяки цьому система рідше робить помилки під час ідентифікації справжніх відповідей і водночас з меншою ймовірністю сприймає випадкові збіги за справжні.

Однак EER не відображає поведінку алгоритму в умовах жорстких вимог безпеки, де поріг прийняття може бути дуже низьким. Саме тому для більш точного аналізу використовують показник FMR1000. Він демонструє, скільки разів система може помилково прийняти «чужий» шаблон за власника при режимі, коли суворо контролюється кількість таких помилок. Для методів, що покладаються лише на мінутійні координати, FMR1000 зазвичай виявляється достатньо високим, особливо при роботі з шаблонами поганої якості. У МСС цей показник значно нижчий, оскільки дескриптори відображають не окремі збіги точок, а цілісну конфігурацію локального оточення.

У практичному сенсі низьке значення FMR1000 показує, що МСС є придатним для систем, де важливо уникнути помилкових прийнять навіть ціною підвищення кількості відмов. Наприклад, у фінансових сервісах або доступі до критично важливої інфраструктури такі системи повинні працювати в режимі, орієнтованому на мінімізацію ризику неправомірного доступу. У

цьому контексті МСС демонструє кращі результати, ніж класичні методи, саме через природну контекстуалізацію локальних структур, яка робить практично неможливими випадкові збіги дескрипторів.

FAR / FRR / EER (формула 3.1):

$$\begin{aligned} FAR(t) &= im / tia, \\ FRR(t) &= gm / tga, \\ EER &= FAR(t^*) = FRR(t^*) \end{aligned} \quad (3.1)$$

де im — кількість хибних прийнять, tia — кількість неправильних порівнянь, gm — хибні відмови, tga — кількість правильних порівнянь, а t^* — поріг, за якого $FAR = FRR$.

Порівнюючи результати МСС на різних наборах відбитків, можна зауважити, що метод поводиться стабільно на різних типах датчиків і при різних умовах знімання. Це свідчить про те, що локальна геометрія, на якій базується побудова циліндрів, є універсальною і мало залежить від конкретних особливостей сенсорів. Класичні методи, які працюють з координатними даними, часто демонструють значні коливання точності, оскільки різні датчики можуть давати неоднакові результати виділення мінущій. МСС компенсує цю нестабільність за рахунок розподіленого механізму внесків від сусідніх мінущій. Експериментальні дослідження, проведені на базі FVC2006, показали, що МСС досягає EER близько 0,15 %, що є одним із найнижчих значень серед мінущійних методів [1].

Однією з ключових причин того, що МСС досягає низьких значень EER і FMR1000, є особливість структури дескриптора. Оскільки кожна мінущія аналізується у контексті її локального оточення, сліпим зонам або пропущеним мінущіям не приділяється такої уваги, як у класичних методах. Це зменшує ймовірність виникнення неправильних зіставлень, що особливо важливо при роботі з неповними відбитками. У багатьох практичних сценаріях користувачі торкаються сенсора не повністю, з різним натиском або мокрими пальцями, що створює умови, у яких класичні схеми зчитування мінущій працюють

нестабільно. МСС завдяки локальному аналізу пристосовується до таких умов значно краще.

Ще одним аспектом є інваріантність МСС до таких спотворень, як поворот і зсув. У класичних методах ці зміщення впливають на координати мінуцій і можуть створювати хибні невідповідності. У МСС локальні дескриптори прив'язані до власної системи координат мінуцій, тому подібні трансформації не впливають на їх структуру. Цей фактор суттєво покращує поведінку алгоритму на точках із реальних сенсорів, де користувачові складно забезпечити однакове прикладання пальця.

Інтерпретація значень EER та FMR1000 у контексті МСС показує, що ці метрики слугують не лише способом кількісної оцінки, але й способом аналізу поведінки алгоритму в різних умовах. Низьке значення EER підтверджує універсальність локального підходу МСС, тоді як низький FMR1000 демонструє його практичну надійність у середовищах із високими вимогами до безпеки. Поєднання цих властивостей робить МСС придатним для широкого спектра застосувань — від мобільних пристроїв і банківських сервісів до криміналістичних систем і контролю доступу у закритих установах.

Таким чином, аналіз показників EER та FMR1000 дає підстави стверджувати, що МСС є методом, який не просто покращує точність порівняно з класичними підходами, а й забезпечує стабільність в умовах практичної експлуатації. У його основі лежить концепція багатовимірного локального опису, що дозволяє алгоритму мінімізувати вплив шуму та неідеальностей і водночас зберігати здатність точно розпізнавати унікальні особливості відбитка. Саме ці властивості формують високу оцінку МСС у сучасних дослідженнях і визначають його місце серед найбільш надійних методів біометричної верифікації локального опису відбитків пальців.

3.5 Сильні та слабкі сторони МСС у практичному застосуванні

Метод циліндричних кодів мінуцій сформував власну нішу серед сучасних біометричних алгоритмів завдяки здатності поєднувати високу точність із помірними вимогами до обчислювальних ресурсів. Однак його

практичне застосування супроводжується як очевидними перевагами, так і певними обмеженнями, які необхідно враховувати під час проектування реальних систем. У цьому підрозділі проведено комплексний огляд цих властивостей та пояснено, як вони впливають на експлуатаційні характеристики МСС у різних сферах.

Однією з головних сильних сторін МСС є стійкість до типових спотворень, які виникають під час збирання відбитків пальців. Стійкість МСС до шумів підтверджується також у дослідженнях, присвячених оцінці якості біометричних даних, зокрема роботах Alonso-Fernandez [9], де підкреслюється важливість надійних локальних дескрипторів. У реальних умовах користувачі рідко прикладають палець до сенсора під однаковим кутом або з однаковим тиском. Класичні мінутійні методи, орієнтовані на порівняння абсолютних координат мінучій, достатньо гостро реагують на такі зміщення. МСС, навпаки, базується на відносній геометрії, що дозволяє алгоритму зберігати стабільність навіть тоді, коли відбиток містить деформації або неповні дані. Ця властивість пояснюється тим, що дескриптор формується не на рівні усього зображення, а у межах локального простору навколо кожної мінучій.

Ще однією суттєвою перевагою є адаптивність МСС до умов низької якості зображення. На відбитках, де частина мінучій втрачена або виділена некоректно, класичні методи часто демонструють різке падіння точності. МСС завдяки структурі циліндра компенсує пропущені або зайві точки за рахунок розподіленого внеску сусідніх мінучій. Це робить алгоритм значно більш толерантним до шуму, плям, затирань та інших пошкоджень. У деяких випадках МСС може працювати навіть тоді, коли відбиток представлений невеликою ділянкою без повного контуру папілярного візерунка.

Перевагою, яку важко переоцінити, є ефективність зіставлення дескрипторів. У бінарному варіанті МСС операції порівняння зводяться до елементарних логічних операцій над двійковими векторами. Це дозволяє алгоритму працювати на апаратно обмежених пристроях — таких як смарт-карти, компактні модулі безпеки або сенсори мобільних телефонів. У традиційних методах зіставлення мінучій потребує складних геометричних

перетворень, що значно підвищує навантаження на систему та ускладнює їх використання в умовах, де ресурсів мало.

З точки зору масштабування — ще один важливий аспект практичного застосування — МСС добре підходить для великих баз даних. Дескриптори мають фіксовану довжину, що спрощує їх індексацію та оптимізує процес пошуку. Крім того, завдяки можливості застосування бітових операцій кількість порівнянь у великих базах може бути значно меншою, ніж у класичних методах, де кожна перевірка потребує складних перетворень координат. Це робить МСС привабливим для систем розпізнавання, що працюють у режимі 1:N при участі великої кількості користувачів.

Проте МСС не позбавлений слабких сторін. Передусім варто виокремити його залежність від попереднього виділення мінуцій. Незважаючи на локальний характер дескриптора, він усе ж базується на коректності вихідних координат та орієнтацій мінуцій. Якщо сенсор формує відбиток дуже низької якості або використовуються недосконалі алгоритми виділення мінуцій, МСС може втратити частину своїх переваг. Помилки на етапі екстракції здатні призвести до того, що деякі локальні структури формуватимуться некоректно, а отже, погіршуватиметься глобальний показник схожості.

Другим недоліком є відносна складність побудови самого циліндра. У той час як порівняння дескрипторів може бути дуже швидким, формування локальної структури є обчислювально затратним. Для кожної мінуції потрібно розрахувати внески від сусідніх точок, визначити їх кутову різницю, оцінити вагові коефіцієнти та заповнити осередки у тривимірній решітці. Це робить МСС менш привабливим у ситуаціях, де шаблони повинні генеруватися миттєво або де обмежені ресурси доступні не лише під час порівняння, а й на етапі побудови дескрипторів.

До слабких сторін також варто віднести підвищені вимоги до обсягу пам'яті на момент формування структури. Хоча кінцевий дескриптор є компактним, проміжні обчислення можуть потребувати значної тимчасової пам'яті, особливо якщо обробляється багато мінуцій або використовується деталізована сітка дискретизації.

Ще одним обмеженням є можливість появи неоднозначностей у локальних структурах у разі, коли відбиток має малу кількість мінуцій. Деякі типи сенсорів або часткові доти можуть давати зображення з дуже низькою щільністю папілярних ліній. Для МСС це означає, що деякі циліндри формуватимуться на основі дуже обмеженого набору сусідніх точок, що може знизити точність порівняння. У таких випадках класичні методи інколи показують кращі результати, особливо коли доступний повний набір координат.

Попри зазначені недоліки, МСС залишається одним із найбільш збалансованих методів, коли йдеться про компроміс між точністю, швидкістю і практичною придатністю. Його адаптивність до різних умов знімання та висока толерантність до деформацій роблять метод цінним у тих системах, де варіативність якості відбитків є нормою. У високобезпечних системах МСС привабливий завдяки низькому рівню помилкових прийнять, а у мобільних і вбудованих рішеннях — через ефективність бінаризованої форми.

Таким чином, сильні сторони МСС проявляються передусім у його здатності стабільно працювати на реальних даних із різною якістю, у поєднанні з ефективністю порівняння дескрипторів. Слабкі сторони пов'язані переважно з етапом побудови циліндра та залежністю від якості виділення мінуцій. Усвідомлення цих властивостей дозволяє правильно інтегрувати МСС у практичні системи та забезпечити максимальну користь від його застосування.

3.6 Перспективи розвитку методу

Попри значний рівень зрілості, метод циліндричних кодів мінуцій залишається відкритим до вдосконалення, оскільки сучасні тенденції у сфері біометрії та розвиток апаратних засобів створюють нові можливості для його еволюції. МСС уже сьогодні демонструє високу точність, інваріантність до спотворень та придатність до застосування в реальних умовах, однак наступні покоління систем верифікації потребують ще більшої адаптивності, швидкодії та стійкості до атак. Огляд потенційних напрямів розвитку дозволяє сформулювати бачення того, як МСС може інтегруватися у майбутні технології та які вдосконалення здатні підвищити його практичну ефективність.

Одним із найбільш перспективних напрямів є удосконалення етапу побудови локального циліндра. Сьогодні алгоритм покладається на статичну структуру дискретизації, де кількість осередків по радіусу й куту визначається заздалегідь. Проте в реальних умовах відбитки часто суттєво відрізняються за щільністю папілярних ліній та кількістю мінуцій. Це створює передумови для впровадження адаптивних циліндрів, у яких структура дескриптора змінюється відповідно до локальної складності ділянки відбитка. Адаптивна дискретизація дозволила б зберігати високу інформативність там, де мінуцій більше, і водночас зменшувати розмір дескриптора на простіших ділянках. Такий підхід може суттєво покращити співвідношення якість–ресурси.

Іншим перспективним напрямом є інтеграція МСС з методами машинного навчання [2]. Хоча МСС є класичним алгоритмом і не потребує тренування, розробка гібридних моделей, у яких нейронні мережі допомагають оптимізувати параметри побудови циліндрів, може надати алгоритму нові можливості. Наприклад, нейромережі можуть навчатися визначати оптимальні значення порогів для бінаризації або адаптувати вагові коефіцієнти внесків від сусідніх мінуцій, що забезпечить кращу узгодженість дескрипторів для різних типів сенсорів. Також перспективним є використання нейронних моделей для корекції помилок виділення мінуцій перед побудовою циліндрів, що зменшить залежність МСС від якості вхідних даних.

У контексті безпеки важливим є напрям, пов'язаний зі стійкістю до атак. Сучасні біометричні системи стикаються із загрозами, такими як відновлення відбитків із шаблонів, презентаційні атаки або створення синтетичних відбитків, здатних обманювати сенсори. МСС має потенціал до розширення у напрямі побудови «захищених дескрипторів», де процес формування циліндра може включати елементи стохастичності або криптографічні перетворення. Це дозволить ускладнити зворотну реконструкцію відбитків і підвищити загальну безпечність системи. Крім того, існує можливість інтеграції МСС з методами біометричного шифрування (наприклад, fuzzy vault або helper data schemes), що створить новий рівень захисту шаблонів.

Перспективним також є поєднання МСС з мультимодальними системами.

Сучасні тренди у біометрії орієнтовані на інтеграцію кількох каналів автентифікації: відбитків пальців, розпізнавання обличчя, сканування вен, аналізу поведінкових патернів тощо. МСС може виступати складовою частиною таких систем завдяки компактності дескриптора і можливості бінаризації, що дозволяє легко комбінувати його з іншими модальностями без значного збільшення навантаження на обчислювальні ресурси. Поєднання МСС із методами, що аналізують орієнтаційні поля або локальні текстури, може дати ще більш точний інтегрований дескриптор, стійкий до широкого спектра спотворень.

Окремий напрям — оптимізація обчислювального етапу побудови циліндрів. Сучасні апаратні засоби, зокрема графічні процесори та спеціалізовані тензорні прискорювачі, відкривають можливість паралельної обробки локальних структур. Переосмислення МСС як алгоритму з високим рівнем паралелізму може суттєво зменшити час побудови дескрипторів і дозволити застосовувати метод у сценаріях, де потрібно миттєве реагування, наприклад у контролі доступу на великих потоках людей. Також можливе створення полегшених варіантів МСС для IoT-пристроїв або енергоефективних процесорів мобільної електроніки.

Подальший розвиток МСС також може включати розширення стандартів сумісності. На сьогодні алгоритм добре узгоджується зі стандартом ISO/IEC 19794-2 [4], але нові специфікації щодо обміну біометричними даними створюють передумови для формування окремого формату, орієнтованого на локальні дескриптори, зокрема циліндричного типу. Формалізація такого стандарту забезпечить легшу інтеграцію МСС у комерційні рішення та державні інформаційні системи, що встановлюють високі вимоги до уніфікації.

Останнім, але не менш перспективним напрямом є використання МСС у завданнях, відмінних від класичної верифікації. У криміналістиці метод може застосовуватися для аналізу пошкоджених або фрагментованих відбитків, допускаючи порівняння дуже малих ділянок з високою надійністю. У цифровій безпеці МСС може стати частиною механізмів генерації криптографічних ключів на основі біометрії, забезпечуючи унікальність і стійкість до підробок. У

біометричних дослідженнях метод може виконувати роль інструменту для побудови навчальних вибірок або для вивчення локальних характеристик папілярних візерунків.

Усі зазначені напрями демонструють, що МСС має великий потенціал розвитку у найближчі роки. Він здатен стати основою нових поколінь біометричних систем, які поєднуюватимуть високу точність, швидкодію, стійкість до атак і стандартизованість. Метод уже показав, що локальний підхід у поєднанні з тривимірним представленням є ефективним інструментом для зменшення рівнів помилок, і розвиток технологій лише розширить можливості цього підходу.

ВИСНОВКИ

У межах цієї роботи було виконано комплексне дослідження методу циліндричних кодів мінуцій (МСС) як сучасного підходу до верифікації за відбитками пальців. Проведений аналіз дозволяє оцінити можливості цього методу, визначити його переваги та обмеження порівняно з класичними мінутійними алгоритмами, а також окреслити перспективи його подальшого розвитку.

На теоретичному етапі опрацьовано фундаментальні принципи функціонування біометричних систем, їх роль у сучасних механізмах інформаційної безпеки та специфіку мінутійного представлення. Детальний огляд літератури продемонстрував, що класичні алгоритми зіставлення мінуцій є чутливими до шуму, змін умов знімання та локальних деформацій відбитка, що обмежує їхню практичну застосовність. Це обґрунтовує актуальність методів, здатних описувати локальну структуру візерунка незалежно від глобальних перетворень, і створює передумови для використання підходів на зразок МСС.

У другому розділі було послідовно описано алгоритмічний процес побудови МСС: від нормалізації шаблонів і дискретизації простору до розрахунку внесків сусідніх мінуцій, формування тривимірних циліндрів і побудови бінаризованих дескрипторів. Показано, що МСС формує локальний дескриптор, стійкий до зсувів, поворотів і часткових спотворень, оскільки описує взаємне розташування мінуцій у локальному оточенні, а не абсолютні координати. Це є ключовим чинником, який вирізняє МСС серед класичних мінутійних методів.

Було продемонстровано, що МСС фактично інкапсулює локальну геометрію папілярного візерунка у вигляді компактної структурованої моделі, здатної коректно працювати навіть у випадках часткових або зашумлених відбитків. Такий підхід забезпечує більшу стійкість до втрати мінуцій або появи хибних точок, що неминуче виникає на етапі сенсорного знімання.

Аналіз показників точності, зокрема EER і FMR1000, підтвердив високий

рівень працездатності МСС. Низькі значення помилок свідчать про здатність методу ефективно відокремлювати справжні збіги від хибних, що є критичним для систем підвищеної надійності. Важливо, що бінаризовані версії дескриптора зберігають конкурентний рівень точності та значно зменшують обсяг обчислень, що робить МСС придатним для використання у мобільних та апаратно обмежених системах.

Порівняння МСС з класичними мінутійними підходами продемонструвало його значну перевагу у точності, стабільності та швидкодії. МСС показав здатність коректно працювати в умовах, які є складними для традиційних алгоритмів: при локальних деформаціях, неповних відбитках, нерівномірному тиску пальця чи наявності шумів. Це дозволяє розглядати МСС не просто як альтернативу існуючим методам, а як еволюційний етап у розвитку структурних біометричних дескрипторів.

Разом з тим було визначено низку обмежень МСС, серед яких — залежність від коректного визначення мінуцій та обчислювальна складність етапу побудови циліндрів. Ці аспекти визначають перспективні напрями подальших досліджень: адаптивні схеми дискретизації, оптимізацію вагових функцій, поєднання МСС з машинним навчанням, формування гібридних моделей та інтеграцію з методами біометричного шифрування.

У підсумку, виконана робота доводить, що метод циліндричних кодів мінуцій є одним із найбільш перспективних підходів у сучасній біометричній верифікації. Завдяки поєднанню високої точності, стійкості до реальних спотворень та можливості компактного кодування він може бути ефективно застосований як у масштабних інформаційних системах, так і в мобільних пристроях або вбудованих рішеннях. Отримані результати становлять основу для подальших досліджень і можуть бути використані під час розроблення реальних біометричних систем чи як підґрунтя для майбутньої дипломної роботи.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Cappelli R., Ferrara M., Maltoni D. Minutia Cylinder-Code: A New Representation and Matching Technique for Fingerprint Recognition // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2010. Vol. 32, № 12. pp. 2128–2141.
2. Maltoni D., Maio D., Jain A. K., Prabhakar S. Handbook of Fingerprint Recognition. 2nd ed. // Springer-Verlag. 2009.
3. ISO/IEC 19794-2:2005. Information Technology — Biometric Data Interchange Formats — Part 2: Finger Minutiae Data // International Organization for Standardization. Geneva. 2005.
4. Feng J. Combining Minutiae Descriptors for Fingerprint Matching // Pattern Recognition. 2008. Vol. 41, № 1. pp. 342–352.
5. Ratha N. K., Bolle R. M. Automatic Fingerprint Recognition Systems // Springer Science & Business Media. 2004. pp. 65–112.
6. Jain A. K., Ross A., Prabhakar S. An Introduction to Biometric Recognition // IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology. 2004. Vol. 14, № 1. pp. 4–20.
7. Chikkerur S., Cartwright A. N., Govindaraju V. K. Fingerprint Enhancement Using STFT Analysis // Pattern Recognition. 2007. Vol. 40, № 1. pp. 198–211.
8. Tico M., Kuosmanen P. Fingerprint Matching Using an Orientation-Based Minutia Descriptor // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2003. Vol. 25, № 8. pp. 1009–1014.
9. Alonso-Fernandez F., Fierrez J., Ortega-Garcia J. Quality Measures in Biometric Systems // IEEE Security & Privacy. 2007. Vol. 6, № 2. pp. 62–70.
10. FVC2006: Fingerprint Verification Competition. Biometric Systems Laboratory, University of Bologna // Режим доступу: <http://bias.csr.unibo.it/fvc2006/> (Дата звернення: 12.11.2025).

ДОДАТОК А

Лістинг А.1 Клас Minutia

```

public class Minutia {
    private final double x;
    private final double y;
    private final double angle;

    public Minutia(double x, double y, double angle) {
        this.x = x;
        this.y = y;
        this.angle = angle;
    }

    public double getX() { return x; }
    public double getY() { return y; }
    public double getAngle() { return angle; }
}

```

Лістинг А.2 Читання шаблону мінущій

```

public class MinutiaeTemplateReader {

    public static List<Minutia> loadTemplate(Path path)
throws IOException {
        List<Minutia> result = new ArrayList<>();

        for (String line : Files.readAllLines(path)) {
            if (line.trim().isEmpty() ||
line.startsWith("#")) {
                continue;
            }

            String[] parts = line.split(",");
            double x = Double.parseDouble(parts[0].trim());
            double y = Double.parseDouble(parts[1].trim());
            double angle =
Double.parseDouble(parts[2].trim());
            result.add(new Minutia(x, y, angle));
        }

        return result;
    }
}

```

Лістинг А.3 Формування локального циліндра (дискретизація)

```

public class CylinderBuilder {

    private final int cellsXY = 16;           // дискретизація

```

```

по площині
    private final int cellsAngle = 8;    // дискретизація
по орієнтації
    private final double radius = 60.0;  // радіус
локального циліндра

    public double[][][] buildCylinder(Minutia center,
List<Minutia> neighbors) {
        double[][][] cylinder = new
double[cellsXY][cellsXY][cellsAngle];

        for (Minutia m : neighbors) {

            double dx = m.getX() - center.getX();
            double dy = m.getY() - center.getY();
            double dist = Math.sqrt(dx * dx + dy * dy);
            if (dist > radius) continue;

            double angleDiff = Math.abs(center.getAngle() -
m.getAngle());
            angleDiff = Math.min(angleDiff, 2 * Math.PI -
angleDiff);

            int ix = (int)((dx + radius) / (2 * radius) *
cellsXY);
            int iy = (int)((dy + radius) / (2 * radius) *
cellsXY);
            int ia = (int)((angleDiff / Math.PI) *
cellsAngle);

            if (ix >= 0 && ix < cellsXY &&
                iy >= 0 && iy < cellsXY &&
                ia >= 0 && ia < cellsAngle) {

                cylinder[ix][iy][ia] +=
computeContribution(dist, angleDiff);
            }
        }

        return cylinder;
    }

    private double computeContribution(double dist, double
angleDiff) {
        double spatial = Math.exp(-(dist * dist) / (2 * 25
* 25));
        double angular = Math.exp(-(angleDiff * angleDiff)
/ (2 * 0.3 * 0.3));
        return spatial * angular;
    }
}

```

Лістинг А.4 Лінеаризація локального дескриптора

```

public class DescriptorBuilder {

    public double[] flatten(double[][][] cylinder) {
        int size = cylinder.length * cylinder[0].length *
cylinder[0][0].length;
        double[] vector = new double[size];

        int index = 0;
        for (int i = 0; i < cylinder.length; i++) {
            for (int j = 0; j < cylinder[0].length; j++) {
                for (int k = 0; k < cylinder[0][0].length;
k++) {
                    vector[index++] = cylinder[i][j][k];
                }
            }
        }

        return vector;
    }
}

```

Лістинг А.5 Бінаризація та Gray-кодування

```

public class Binarizer {

    public int[] binarize(double[] descriptor, double
threshold) {
        int[] bits = new int[descriptor.length];
        for (int i = 0; i < descriptor.length; i++) {
            bits[i] = descriptor[i] > threshold ? 1 : 0;
        }
        return bits;
    }

    public int[] toGrayCode(int[] bits) {
        int[] gray = new int[bits.length];
        for (int i = 0; i < bits.length - 1; i++) {
            gray[i] = bits[i] ^ bits[i + 1];
        }
        gray[bits.length - 1] = bits[bits.length - 1];
        return gray;
    }
}

```

Лістинг А.6 Бінаризація та Gray-кодування

```

public class Matcher {

    public double compare(int[] a, int[] b) {
        int matches = 0;
        for (int i = 0; i < a.length; i++) {

```

```
        if (a[i] == b[i]) matches++;
    }
    return (double) matches / a.length;
}
}
```