

О.М. Кісельова, Т.О. Фірсова, Ю.О. Сидорук

Дніпропетровський національний університет імені Олеся Гончара

МЕТОД РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧІ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ВІДБИТКІВ ПАЛЬЦІВ НА ОСНОВІ ТЕОРІЇ ОПТИМАЛЬНОГО РОЗБИТТЯ МНОЖИН

Розглянуто задачу ідентифікації відбитків пальців. Побудовано метод та алгоритм її розв'язання, засновані на теорії неперервних задач оптимального розбиття множин (ОРМ). Розроблено програмну реалізацію алгоритму, яка дозволяє перевірити ідентичність двох відбитків.

Рассмотрена задача идентификации отпечатков пальцев. Построены метод и алгоритм её решения, основанные на теории непрерывных задач оптимального разбиения множеств (ОРМ). Разработана программная реализация алгоритма, позволяющая проверить идентичность двух отпечатков.

Fingerprint identification problem is considered. Method and algorithm solving this problem are constructed based on the theory of continuous set partitioning problems (SPP). A software implementation of the algorithm permitting to check the identity of two fingerprints is developed.

Ключові слова: задача ідентифікації, відбитки пальців, радіальна структура, оптимальне розбиття множин, діаграма Вороного, папілярні лінії, мінюції.

Вступ. Теорія оптимального розбиття множин – напрям сучасного математичного програмування та наразі набуває бурхливого розвитку, оскільки велика кількість теоретичних та прикладних задач із різних галузей зводиться до математичних моделей теорії ОРМ. Однією з таких галузей є розпізнавання образів та її окремий напрям – біометричний захист інформації. У даній роботі досліджено можливість застосування апарату теорії ОРМ до розв'язання задачі розпізнавання особи за відбитками пальців. Доведено, що це один із найбільш надійних та найпоширеніших способів біометричного захисту [1]. Актуальність названої задачі не викликає сумнівів, оскільки на сьогодні все більше технічних пристроїв містять біосканери і потребують ідентифікації відбитка у процесі свого функціонування.

Робота узагальненої системи ідентифікації за відбитками пальців складається з таких етапів: збирання (за допомогою сканерів, камер тощо), оброблення зображення відбитка (видалення шумів, скелетування папілярних ліній тощо), отримання унікальних ознак відбитка (features) та порівняння.

Усі алгоритми ідентифікації поділяються на три класи:

- засновані на мінюціях [2];
- засновані на папілярних лініях [3];
- змішані [4].

Найбільш поширені є алгоритми, засновані на мінюціях, оскільки вони зазвичай потребують менше часу на виконання та мають досить високу точність.

Мінюції (або «точки Гальтона») – це ділянки папілярного рисунка шкіри, де окремі лінії зливаються, роздвоюються або обриваються, тобто у них змінюється структура папілярних ліній. Мінюції були відкриті та описані Френсісом Гальтоном у 1892 р. [6]. Вони є унікальні для кожного відбитка. Найбільш виразними особливими точками є закінчення ліній та біфуркації (рис. 1).

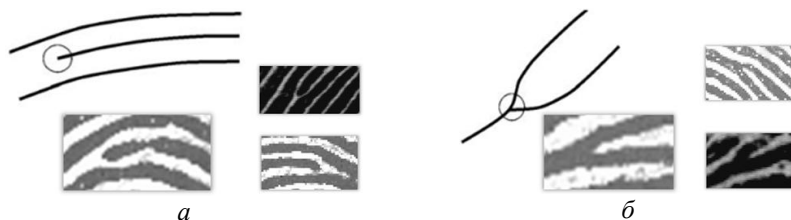


Рис. 1. Приклади мінюцій: а – закінчення ліній; б – біфуркації

Алгоритм, побудований у даній роботі, належить до класу алгоритмів, заснованих на мінюціях. Одним із його основних кроків є побудова діаграми Вороного з центрами у точках мінюцій. Цю задачу сформульовано як задачу ОРМ [7].

Постановка задачі ідентифікації відбитків. У загальному вигляді задачу ідентифікації відбитків пальців можна сформулювати таким чином: *шляхом порівняння двох екземплярів відбитків пальців необхідно встановити, чи належать вони одній особі* [1].

Відбитки пальців однієї людини є унікальні та незмінні з віком, але такі фактори, як зміна кута нахилу, сила натиску пальця, якість сканера, вологість, пил та шуми ускладнюють процес порівняння відбитків та потре-

бують ретельного розгляду відбитку для виділення деяких особливих ознак, які слугували б підставою для прийняття рішення щодо ідентифікації особи.

Таким чином, постає задача виділення унікальних структур відбитків для їх порівняння. Найбільш поширеним є порівняння таких структур:

- окремі мініюції з обох відбитків;
- трійки мініюцій (triplets);
- структури, що складаються з центральної мініюції та деякої заданої кількості найближчих до неї мініюцій.

У даній роботі для порівняння було обрано структури, засновані на побудові оптимального розбиття зображення відбитка – діаграми Вороного. З урахуванням цього вихідна задача зводиться до задачі віднайдення оптимальних розбиттів зображень відбитків, побудови певних структур на основі цих розбиттів та порівняння таких структур.

Зважаючи на те що множина, яка підлягатиме розбиттю (зображення відбитка) складається з великої кількості елементів (пікселей), можемо задачу розбиття розглядати як неперервну задачу ОРМ.

Як зазначено вище, поставлену задачу можна поділити на три підзадачі. Сформулюємо кожну з них.

1. Побудова оптимального розбиття. Нехай Ω – множина пікселів зображення відбитка. Позначимо клас усіх можливих розбиттів множини Ω через \sum_{Ω}^N , тобто

$$\sum_{\Omega}^N = \{(\Omega_1, \dots, \Omega_N) : \bigcup_{i=1}^N \Omega_i = \Omega, \text{mes}(\Omega_i \cap \Omega_j) = 0, i \neq j; i, j = 1, \dots, N\}.$$

Уведемо функціонал

$$F(\{\Omega_1, \dots, \Omega_N\}) = \sum_{i=1}^N \int_{\Omega_i} c(x, \tau_i) dx, \quad (1)$$

де $c(x, \tau_i)$ – функції відстані, дійсні, обмежені, визначені на $\Omega \times \Omega$, вимірні за x за будь-якого визначеного $\tau_i = (\tau_i^{(1)}, \tau_i^{(2)}) \in T$ – i -й мініюції відбитку, $i = 1, \dots, N; x = (x^{(1)}, \dots, x^{(n)}) \in \Omega$ – точка зображення відбитка.

Необхідно знайти

$$\min_{\{\Omega_1, \dots, \Omega_N\} \in \sum_{\Omega}^N} F(\{\Omega_1, \dots, \Omega_N\}). \quad (2)$$

Оптимальне розбиття $\{\Omega_1^*, \dots, \Omega_N^*\}$, що являє собою розв'язок поставленої задачі, має вигляд діаграми Вороного [7].

Значимо, що задача (1)-(2) є частинний випадок найпростішої задачі оптимального розбиття A1 [7].

2. Побудова структур відбитка. За унікальну структуру відбитка обрано радіальні структури [5].

Радіальна структура мінюції – це геометрична структура, що складається з ліній, які з'єднують її із сусідніми мінюціями. Останні вважають такими, якщо вони належать коміркам зі спільним ребром.

Формальне означення: радіальною структурою точки $\tau_i \in T$ називають множину, що складається із τ_i та усіх сусідніх мінюцій, комірки Вороного яких мають спільну межу із коміркою Ω_i^* .

Позначимо радіальну структуру через $R(\tau_i)$, центр радіальної структури через c_i , а сусідні мінюції – n_j . Таким чином, можна записати таке:

$$R(\tau_i) = \{c_i, n_1, n_2, \dots, n_j\}, \quad 2 \leq j \leq n. \quad (3)$$

Необхідно побудувати множину усіх радіальних структур R^* :

$$R^* = \bigcup_{i=1}^n R(\tau_i). \quad (4)$$

3. Порівняння радіальних структур. Необхідно знайти

$$f : R^* \times R^* \rightarrow S_c, \quad (5)$$

де f – правило (алгоритм) порівняння радіальних структур, що ставить у відповідність парі радіальних структур $(R(\tau_i), R(\tau_j))$ число з множини S_c ;

S_c – множина оцінок подібності радіальних структур.

Отже, вихідну задачу математично можна подати у вигляді задачі (1)–(5).

Метод розв'язання задачі. На *першому етапі* розв'язання задачі ідентифікації відбитків (1)-(5) для розв'язання підзадачі (1)-(2) введемо характеристичні функції підмножин $\Omega_i, i = 1, \dots, N$ згідно з єдиним підходом до розв'язання задач ОРМ [7], який полягає у переході від задачі оптимального розбиття множин, у якій невідомі входять до меж інтегрування, до задачі нескінченновимірною математичного програмування:

$$\lambda_i(x) = \begin{cases} 1, & x \in \Omega_i, \\ 0, & x \in \Omega \setminus \Omega_i, \end{cases} \quad i = 1, \dots, N. \quad (6)$$

Тоді задачу (1)-(2) можна переписати в наступному вигляді:

знайти

$$\min_{\lambda(\cdot) \in \Gamma_1} \int_{\Omega} \sum_{i=1}^N c(x, \tau_i) \lambda_i(x) dx, \quad (7)$$

де

$$\Gamma_1 = \{ \lambda(x) = (\lambda_1(x), \dots, \lambda_N(x)) : \lambda_i(x) = 0 \vee 1, \quad i = \overline{1, N}, \sum_{i=1}^N \lambda_i(x) = 1, \text{ м.в. для } x \in \Omega \}. \quad (8)$$

Згідно з методом розв'язання найпростішої задачі ОРМ множину Γ_1 занурюємо у симплекс

$$\Gamma_2 = \{ \lambda(x) = (\lambda_1(x), \dots, \lambda_N(x)) : 0 \leq \lambda_i(x) \leq 1, \quad i = \overline{1, N}, \sum_{i=1}^N \lambda_i(x) = 1, \text{ м.в. для } x \in \Omega \}. \quad (9)$$

Відтак від задачі (7)-(8) переходимо до наступної:

$$\int_{\Omega} \sum_{i=1}^N c(x, \tau_i) \lambda_i(x) dx \rightarrow \min_{\lambda(\cdot) \in \Gamma_2}. \quad (10)$$

Згідно з [7] невідомі характеристичні функції $\lambda_i^*(x)$ підмножин Ω_i^* визначасмо у такий спосіб:

$$\lambda_i^*(x) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } c(x, \tau_i) = \min_{k=1, \dots, N} c(x, \tau_k), \\ 0, & \text{інакше.} \end{cases} \quad (11)$$

Таким чином, отримано оптимальне розбиття $\{\Omega_1^*, \dots, \Omega_n^*\}$ зображення відбитка Ω у вигляді діаграми Вороного.

На *другому етапі* для отримання множини радіальних структур R^* необхідно для кожної центр-мінюїї відбитка $\tau_i, i = 1, \dots, N$ виділити сусідів Вороного, а відповідні мінюїї-сусіди занести до i -ї радіальної структури (рис. 2, 3).

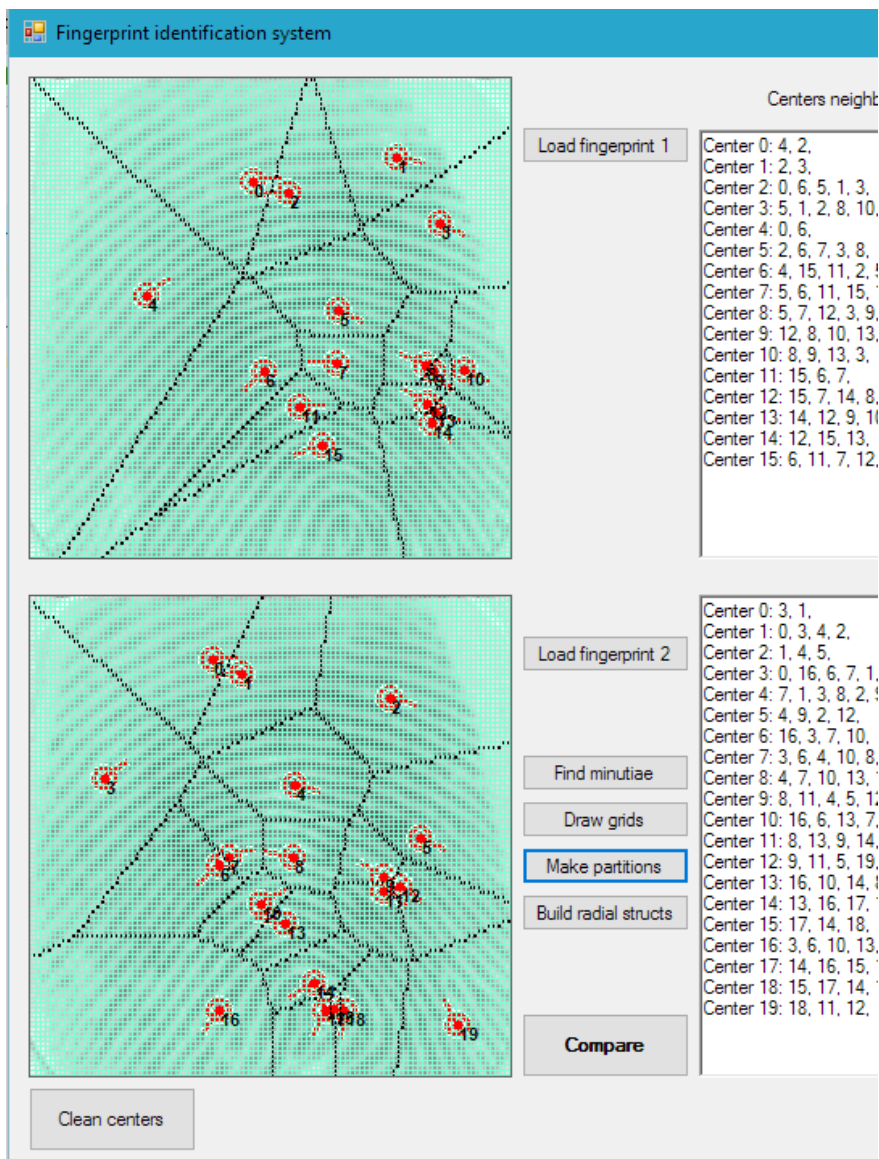


Рис. 2. Побудовані оптимальні розбиття та радіальні структури двох порівнюваних відбитків

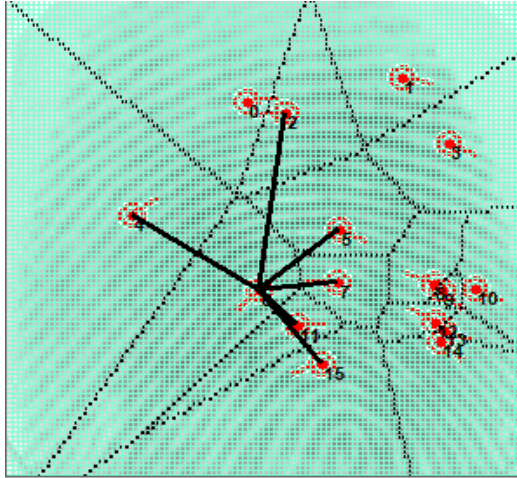


Рис. 3. Радіальна структура 6-ї міноції

На *третьому етапі* для проведення порівняння радіальних структур виділимо такі характеристики:

- координати центральної міноції;
- відносний кут;
- тип центральної міноції;
- відстані від центральної міноції до сусідніх.

Координати та тип центральної міноції визначають ще на етапі отримання (екстракції) міноцій відбитку. Відносний кут обчислюють за допомогою напрямного та абсолютного кутів (рис. 4).

Кожну радіальну структуру $R(\tau_i)$ порівнюють із радіальними структурами другого відбитка $R(\tau_j)$, щоб віднайти величину оцінки подібності S_c [8] між ними.

Щоб реалізувати таке порівняння, уведемо два типи векторів характеристик: V_1 та V_2 . Перший вектор містить тип центральної міноції, а другий – тип, відносний кут та відстань від центральної міноції до сусідньої. Діапазони для кожного з елементів векторів наведено у табл. 1, правило порівняння радіальних структур (f) записано у вигляді табл. 2. Вищеописаний метод порівняння радіальних структур називають Score-методом [8].

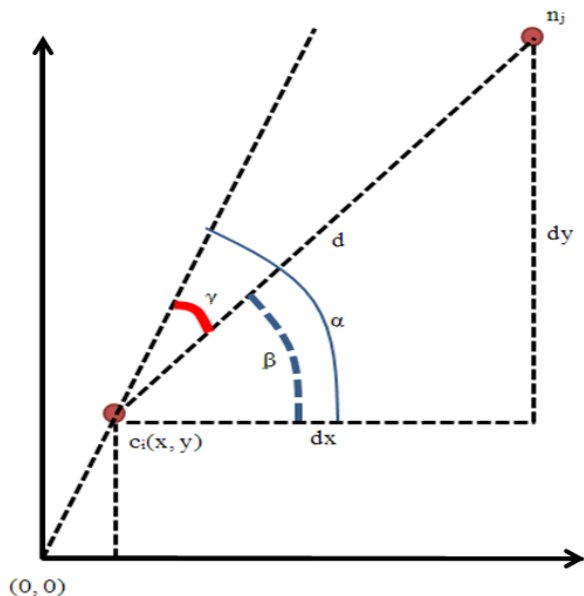


Рис. 4. Характеристики радіальної структури:

$\alpha = \arctg \frac{y}{x}$ – напрямний кут центральної мінюції;

$\beta = \arctg \frac{dy}{dx}$ – абсолютний кут сусідньої мінюції;

$\gamma = \alpha - \beta$ – відносний кут

Таблиця 1

Типи та діапазони характеристик

Елемент радіальної структури	Елемент вектора	Тип/діапазон
Центральна мінюція: вектор V_1	Тип мінюції	Біфуркація, закінчення
Сусідня мінюція – вектор V_2	Тип мінюції	Біфуркація, закінчення
	Відстань до центральної мінюції	$3\rho x - 300\rho x$
	Відносний кут	$0^0 - 359^0$

Таблиця 2

Правило порівняння радіальних структур (f)

Зв'язок векторів характеристик	Оцінка подібності S_c
$V_1(\Omega^a) = V_1(\Omega^b)$ та $V_{2_i}(\Omega^a) = V_{2_i}(\Omega^b)$ для $i = 1$	1
$V_1(\Omega^a) = V_1(\Omega^b)$ та $V_{2_i}(\Omega^a) = V_{2_i}(\Omega^b)$ для $i = 1, 2$	2
$V_1(\Omega^a) = V_1(\Omega^b)$ та $V_{2_i}(\Omega^a) = V_{2_i}(\Omega^b)$ для $i = 1, 2, 3$	3
...	...
$V_1(\Omega^a) = V_1(\Omega^b)$ та $V_{2_i}(\Omega^a) = V_{2_i}(\Omega^b)$ для $i = 1, \dots, n$	n

Тут $V_1(\cdot)$ та $V_2(\cdot)$ – вектори ознак, Ω^a, Ω^b – порівнювані відбитки.

Згідно з правилом f кожній радіальній структурі другого відбитка нараховують один «бал» подібності за кожну мінюцію-сусіда, якщо на першому відбитку є радіальна структура з аналогічним положенням сусіда.

На наступному кроці підраховують кількість радіальних структур C_N , які мають оцінки подібності більші, ніж заданий поріг оцінок T_S , тобто найбільш подібних структур [5]. Поріг T_S визначають експериментально, шляхом перевірки на великій кількості відбитків. Якщо $C_N \geq T_N$

($T_N = N * \frac{25}{100}$, N – загальна кількість структур), то перехід на наступний крок не здійснюють, відбитки ідентичні. Така ситуація виникає, коли відбитки є однакові або мають незначні локальні пошкодження, які не заважають отримати мінюції або побудувати радіальні структури. Якщо ж подібних структур менше, ніж T_N , здійснюють перехід на останній крок.

На останньому кроці обирають три найбільш схожі радіальні структури та обчислити оцінки подібності цих структур, обертаючи їх та порівнюючи із радіальними структурами першого відбитка на кожному обороті. За фінальну оцінку структури – S – беруть найбільшу з усіх отриманих. Тепер, якщо $S > T_S$, відбитки вважаються ідентичними, інакше – різними.

Алгоритм розв'язання задачі. Алгоритм розв'язання задачі ідентифікації відбитків пальців наведено у вигляді блок-схеми [5] (рис. 5).

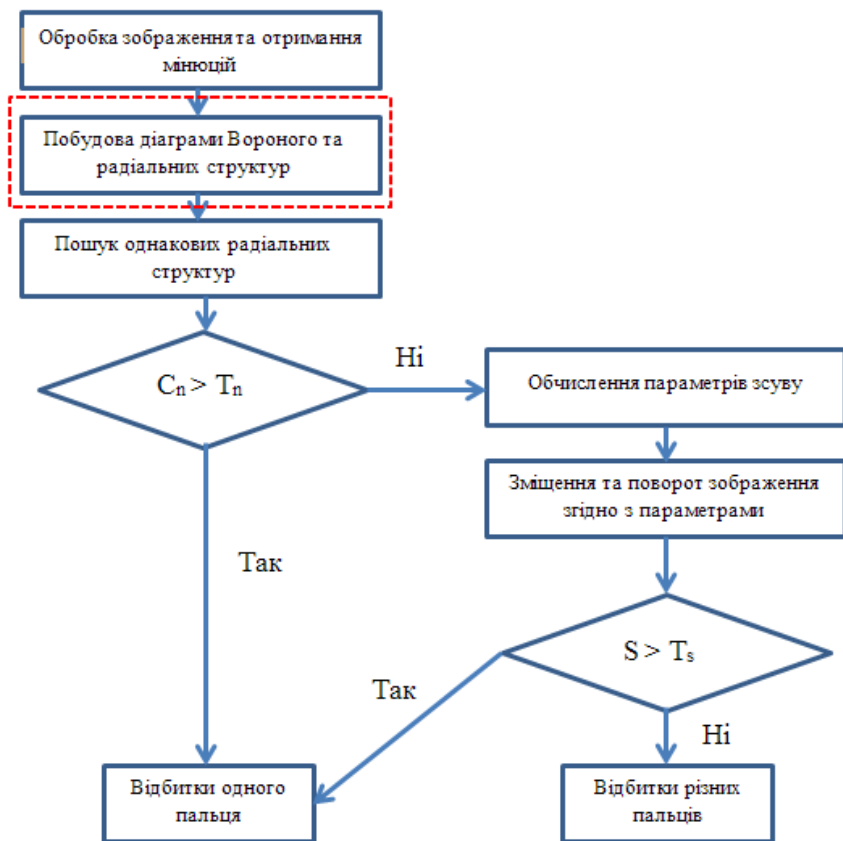


Рис. 5. Блок-схема алгоритму розв'язання задачі ідентифікації відбитків

Як алгоритм виконання другого кроку, виділеного на блок-схемі, застосовано алгоритм розв'язання задачі A1 [7] у такій редакції.

1. Область Ω покриваємо квадратною сіткою.
2. Для кожного вузла сітки відшукуємо $\min_{k=1, \dots, N} c(x, \tau_k)$ та знаходимо оптимальне розбиття $(\Omega_1^*, \dots, \Omega_n^*)$ за формулою (12).

3. Обчислюємо оптимальне значення цільового функціоналу за формулою

$$I^* = \int_{\Omega} \sum_{k=1}^N c(x, \tau_k) dx. \quad (12)$$

Кінець алгоритму.

Аналіз одержаних результатів. Мовою програмування C# було розроблено програму *VoronoiTest.exe*, яка реалізує побудований алгоритм розв’язання задачі та дозволяє визначити, чи є два відбитки ідентичні. Процес отримання (екстракції) мінюцій реалізовано за допомогою фреймворку «Experimental framework in C# for fingerprint recognition» [10].

Для порівняння ефективності отриманого алгоритму з іншими відомими алгоритмами використано відбитки пальців із бази DB1_B, яка є у відкритому доступі [9]. Перше число в файлі зображення даної бази позначає номер пальця, друге число – номер відбитка цього пальця. Розмір зображень 300x300 пікселів, формат TIF.

Результати порівняння наведено в табл. 3. Словами «Різні» та «Однакові» позначено результати роботи алгоритмів, а кольором – правильність виданого результату: світло-сірий колір вказує на те, що алгоритм правильно порівняв відбитки, темно-сірий – на те, що алгоритм видав помилковий результат.

Таблиця 3

Порівняння роботи різних алгоритмів

Алгоритм Номери відбитків	Jiang and Yau (2000)	Parziale and Niel (2003)	Tico and Kuosmanen (2003)	Побудований алгоритм
101_1, 101_2	Однакові	Різні	Різні	Однакові
101_1, 102_1	Різні	Різні	Різні	Різні
102_2, 102_3	Різні	Різні	Різні	Однакові
106_6, 108_1	Різні	Різні	Різні	Різні
105_7, 106_3	Різні	Різні	Різні	Однакові
109_6, 109_8	Різні	Різні	Різні	Однакові
101_2, 101_3	Різні	Однакові	Різні	Різні
106_6, 106_7	Різні	Однакові	Різні	Різні
103_6, 103_7	Однакові	Однакові	Різні	Однакові

Висновки. Результати, отримані під час тестування алгоритму, побудованого на основі теорії ОРМ, указують на доцільність його застосування для розв'язання задачі ідентифікації відбитків пальців.

Підвищити точність побудованого алгоритму можна за рахунок впровадження комбінованих радіальних структур, що являють собою список радіальних структур із центрами у мініюціях, які є сусідні, за діаграмою Вороного, до однієї центральної мініюції та механізму оптимального вибору порогових значень T_s .

Бібліографічні посилання

1. Fingerprint recognition [Електронний ресурс] / National science and technology council – Режим доступу: https://www.fbi.gov/about-us/cjis/fingerprints_biometrics/biometric-center-of-excellence/files/fingerprint-recognition.pdf. – Заголовок з екрана.
2. **Jain, A. K.** On-Line Fingerprint Verification [Text] / A. K. Jain, L. Hong, R. Bolle // IEEE Trans. PAMI. – 1997. -- Vol. 19, № 4. – P. 302–313.
3. **Xie, X.** Ridge-Based Fingerprint Recognition [Text] / X. Xie, Fei Su, Anni Cai // Lecture Notes in Computer Science. – 2005. – Vol. 3832. – P. 273 – 279.
4. **Jain, A.** Fingerprint Matching Using Minutiae and Texture Features [Text] / Anil Jain, Arun Ross // Proc.of Int'l Conference on Image Processing (ICIP). – 2001. – P. 282 – 285.
5. **Deok, Yu K.** A Fingerprint Matching Algorithm Based on Radial Structure and a Structure-Rewarding Scoring Strategy [Text] / Kyung Deok Yu, Sangsin Na, Tae Young Choi. // AVBPA. – 2005. – Vol. 3546. – P. 656 – 664.
6. **Galton, F.** Finger Prints / [Text] F. Galton. – London : McMillan, 1892. – 216 p.
7. **Киселева, Е.М.** Непрерывные задачи оптимального разбиения множеств: теория, алгоритмы, приложения [Текст] / Е.М. Киселева, Н.З. Шор. – К., Наук. думка. – 2005. – 564 с.
8. **Mital, D. P.** An Automated Matching Technique for Fingerprint Identification [Text] / D. P. Mital, E. K. Teoh // In Proceedings of the 1997 First International Conference on Knowledge-Based Intelligent Electronic Systems. – 1997. – Vol.1. – P.142 – 147.
9. Databases [Електронний ресурс] / Second International Competition for Fingerprint Verification Algorithms website – Режим доступу: <http://bias.csr.unibo.it/fvc2002/databases.asp>. – Заголовок з екрана.
10. **Medina-Pérez, M. A.** Introducing an experimental framework in C # for fingerprint recognition [Text] / M. A. Medina-Pérez, O. Loyola-González, A. E. Gutierrez-Rodríguez, M. García-Borroto, and L. Altamirano-Robles // Lecture Notes in Computer Science. – 2014. – Vol. 8495. – P. 132 – 141.

Надійшла до редколегії 20.06.2016