
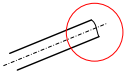
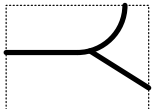
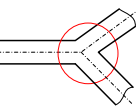
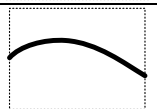
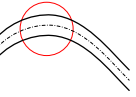


Роздвоєнням називається область, в околі якої судина розділяється на дві судини, або в околі якої дві судини сполучаються в одну.

Вигином називається область, в околі якої кривизна судини перевищує граничне значення. Під час ідентифікації дані ключові точки використовуються рідко [4].

Таблиця 1

## Особливі області зображень рисунка вен долоні

№	Зображення особливої області	Схематичне подання	Тип особливої області
1			Закінчення
2			Роздвоєння
3			Вигин

В околі особливих областей локалізуються відповідні їм ключові точки. Плоска проекція венозного малюнка однозначно визначається взаємним розміщенням і типом ключових точок в околі особливих областей.

Структура венозного малюнка представляє локалізовану матрицю координат ключових точок і зв'язків між ними, і може бути описана, наприклад, у вигляді неповного плоского графу. Тоді вузлами графу є елементи множини  $P(A)$ , а форма ребер графу може бути апроксимована певним поліномом, якщо це необхідно.

Для повного подання структури у вигляді графу вводиться матриця суміжності  $M$ , яка відображає зв'язки між вузлами графу:

$$M_{p_i p_j} = \begin{cases} 0, & \mu(p_i, p_j) = 0 \\ \omega_{p_i p_j}, & \mu(p_i, p_j) \neq 0 \end{cases}, \quad (1)$$

де  $\mu(p_i, p_j)$  – міра зв'язку між точками графу  $p_i$  і  $p_j$ ,  $\mu(p_i, p_j) = 0$ , якщо  $i = j$  або  $p_i$  і  $p_j$  несуміжні;  $\omega_{p_i p_j}$  – міра, яка характеризує довжину ділянки венозного малюнка (вага ребер графу) [5].

Таким чином, комплекс ідентифікаційних характеристик венозного малюнка представляє собою набір ключових точок певного типу, який описується матрицею координат і матрицею суміжності.

Стосовно ж алгоритму ідентифікації, то він включає наступні етапи обробки зображень:

- отримання малюнка вен;
- розпізнавання малюнка вен, виділення ключових точок венозного малюнка;
- класифікація ключових точок, визначення типу ключових точок і формування матриці координат і матриці суміжності [6].

Принцип порівняння рисунків вен долоні за локальними ознаками складається з наступних етапів:

- поліпшення якості початкового зображення відбитка для збільшення чіткості меж венозних ліній; дана операція дозволяє максимально точно виділити на малюнку ключові точки (роздвоєння ліній та їх закінчення);
- бінаризація зображення відбитка – приведення до чорно-білого зображення (1 bit) пороговою обробкою;
- скелетизація зображення – стоншення ліній зображення відбитка, яке проводиться доти, доки лінії не будуть шириною 1 піксель;
- виділення мінуцій. Координати виявлених мінуцій та їх кути орієнтації записуються у вектор:

$$W(p) = [(x_1, y_1, t_1), (x_2, y_2, t_2), \dots, (x_p, y_p, t_p)], \quad (2)$$

де  $p$  – кількість мінуцій [7]; під час реєстрації користувачів цей вектор вважається еталоном і записується в базу даних. Під час розпізнавання вектор визначає поточний відбиток (що цілком логічно);

зіставлення мінуцій. Два відбитки малюнка вен однієї долоні можуть відрізнятися один від одного поворотом (навіть незначним) і зсувом. Тому не можна прямо сказати, належить малюнок вен людині, чи не належить, на підставі простого їх порівняння (вектори еталону і поточного малюнка можуть відрізнятися довжиною, містити невідповідні мінуції тощо). Через це процес зіставлення повинен бути реалізований для кожної мінуції окремо [5].

Виділення ключових точок і визначення координат цих точок виконується у первинній системі координат. Для того, щоб уникнути численних перевірок на кути повороту та зсувів малюнка вен, застосовуємо метод переходу від декартових координат до полярних, перенісши центр координат у геометричний центр області сканування долоні. Це дозволить розпаралелити зіставлення відбитків, а також

знизити залежність імовірності розпізнавання відбитка вен від поворотів та зсувів. Швидкість розпізнавання відбитка збільшується завдяки порівнянню вагових коефіцієнтів, а не координат вершин та відстаней між ними. Базові відрізки формуються із внутрішніх точок розгалужень і закінчень венозного малюнка.

Під час порівняння відбитків на основі графів вихідне зображення відбитка перетворюється на зображення ключових точок із зазначенням їх типу (рис. 1 а,б).

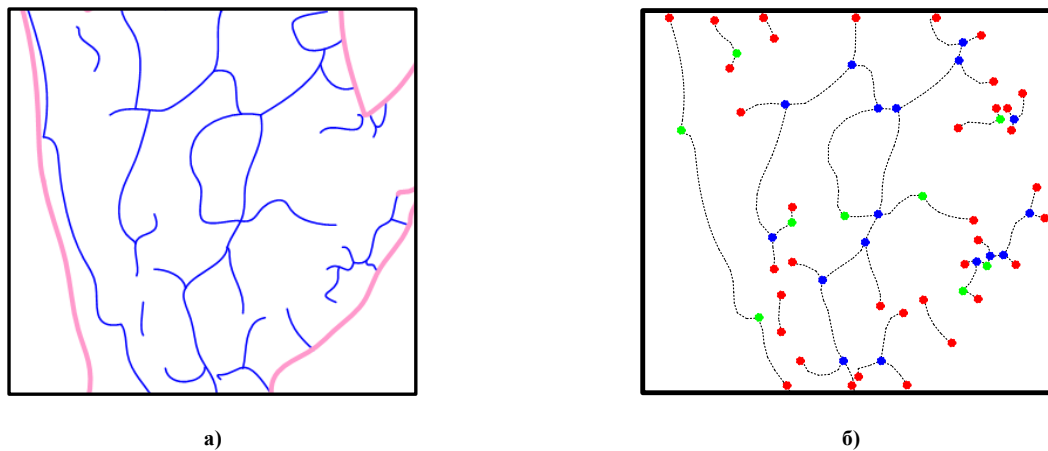


Рис. 1. Перетворення рисунка вен на зображення ключових точок

Ключові точки типу “закінчення” на рисунку позначені червоним кольором (їх 36 шт.), “роздвоєння” – синім кольором (17 шт.), “вигин” – зеленим (9 шт.). Як бачимо, найбільше ключових точок першого типу, а співвідношення між ними приблизно складає пропорцію 4 : 2 : 1.

Як бачимо, ключові точки типу “вигин” можна не використовувати під час зіставлення досліджуваного зразка із базовим, тому надалі будемо працювати лише з ключовими точками типів “закінчення” і “роздвоєння”, адже їх кількість становить більше 80% із загальної.

Скелетизація зображення проводилась за допомогою методу шаблонів, який по черзі переглядає всі точки бінарного зображення  $f(x, y) \in \{0,1\}$ , де значення 1 відповідає бінарній лінії візерунка, і аналізує околиці тільки забарвлених (інформативних) пікселів. Аналіз околиці представлений наступною формулою:

$$K = \sum_{i=-1}^1 \sum_{j=-1}^1 f(x+j, y+i) \cdot h(i, j), \tag{3}$$

де  $K$  – величина оцінки околиці, використовується як індекс;  $(x, y)$  – координати досліджуваного пікселя;  $f(x, y)$  – значення пікселя на бінарному зображенні;  $h(i, j)$  – маска, елементи якої задають вага точок, представлена у вигляді

$$h = \begin{pmatrix} 128 & 64 & 32 \\ 16 & 0 & 8 \\ 4 & 2 & 1 \end{pmatrix}, \tag{4}$$

Дана функція реалізується за допомогою операцій бітового зсуву під час обходу околиці, що забезпечує високу продуктивність розрахунків [6]

Індекс  $K$  – число в інтервалі від 0 до 255 включно. Воно розглядається алгоритмом як індекс гнізда в таблиці правил, заздалегідь заданої в процесі проектування.

Таблиця є закодованим набором правил і операцій з обробки околиці. Фактично вона організовує зв'язок між конкретним шаблоном і дією, яку необхідно зробити з околицею досліджуваної точки під час обчислення відповідного індексу  $K$ , який визначає номер елемента у таблиці. Кожний елемент таблиці містить код операції, нульовий код відповідає відсутності операції.

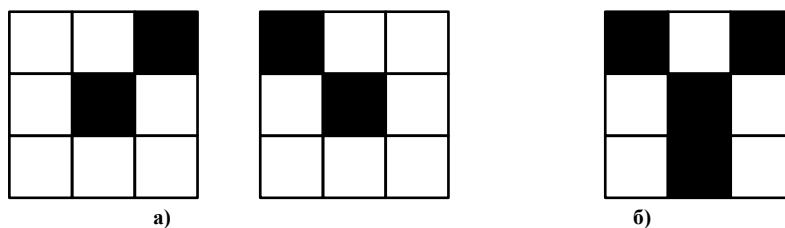


Рис. 2. Виділення і визначення типу мінуцій: а) закінчення; б) роздвоєння

Зображення, отримане після скелетизації, розбивається на блоки 3×3 пікселі. Після цього підраховується кількість чорних (ненульових) пікселів, що знаходяться навколо центру. Піксель у центрі вважається мінуцією, якщо він сам ненульовий, і сусідніх ненульових пікселів один (мінуція “закінчення”)

або три (мінущія “роздвоєння”), – рис. 2 [6].

Коли знайдено усі мінущії і визначено їх тип, вводимо на зображенні декартову систему координат, взявши за початок координат лівий нижній кут, тоді вісь абсцис буде спрямована горизонтально зліва праворуч, а вісь ординат – вертикально знизу вгору (рис. 3).

Далі формуємо список мінущій у вигляді таблиці, де для кожної із пронумерованих мінущій будуть вказані її координати та тип, наприклад: 1 – закінчення, 2 – роздвоєння.

Для підвищення швидкості порівняння досліджуваного зразка з рисунком вен із тими, що зберігаються в пам’яті, використаємо видозміну методики, описаної у [7], що передбачає перехід від декартової системи координат до полярної. За новий початок координат вибираємо геометричний центр області з малюнком вен.

Оскільки величина малюнка розмірами  $100 \times 100$  мм у пікселях становить  $591 \times 591$ , то центр О матиме декартові координати  $O(296; 296)$ .

Обертаючи проти годинникової стрілки радіус-вектор з центру первинної системи координат (див. рис. 3), послідовно сполучаємо відрізками прямих ключові точки, які нам зустрічаються. Перехід від декартових координат до полярних здійснюється за формулами:

$$\rho_i^2 = (x_i - x_c)^2 + (y_i - y_c)^2,$$

$$\varphi_i = \arctg\left(\frac{y_i - y_c}{x_i - x_c}\right) \quad (5)$$

Квадрат, а не корінь квадратний, для обчислення значення довжини радіус-вектора для певної мінущії береться для прискорення обчислень, оскільки нас не цікавлять точні значення відстаней між мінущіями, а лише порядок зміни їх типу.

Якщо кілька точок зустрічаються в одному напрямку радіус-вектора, то попередня точка сполучається з ближчою до центру (менше значення  $\rho^2$ ), а та – з дальшою від центру, на одному з нею радіус-векторі. Таким чином формується замкнений контур базових відрізків, які утворюють ламану з вершинами у ключових точках. Ми отримали орієнтований граф, або орграф. Кількість вершин і кількість ребер у орграфі співпадають ( $n = m = 53$ ), бо вершини сполучені послідовно. Усі вершини орграфу мають степінь 2, бо кожній вершині графу інцидентні два ребра. [8]

Для отриманого орграфу можна записати матрицю інцидентності А, матрицю суміжності вершин В і матрицю вагових співвідношень С [9].

Матриця інцидентності А показує, яке ребро (правильніше буде говорити про вектор, або дугу) в даній вершині закінчується (індекс “-1”), а яке починається (індекс “1”) [10].

Матриця суміжності вершин В показує, які з вершин орграфу сполучені дугами, а які – ні. Оскільки прохід вершин орграфу дає простий ланцюг, то очевидно, що кожна вершина сполучена дугами тільки із попередньою і наступною. Тому список суміжності для даного орграфу має вигляд [11]:

$$G:$$

$$\begin{aligned} V_1: & V_2 \\ V_2: & V_3 \\ V_3: & V_4 \\ & \dots \\ V_{52}: & V_{53} \\ V_{53}: & V_1. \end{aligned}$$

Ваги ребер для даного орграфу визначаються дуже просто: якщо відрізок сполучав дві мінущії типу “закінчення”, то вага ребра становить 1; якщо мінущії мають різний тип, ребру присвоюємо вагу 2; якщо сполучалися дві ключові точки типу “роздвоєння” – вага 3 (рис. 4).

Після формування матриці вагових співвідношень С залишається перевірити, чи співпадає кількість мінущій у досліджуваному зразку і шаблоні ( $m_C = m_D$ ), оскільки у ізоморфних графів кількість вершин тотожна. Після цього здійснити операцію віднімання двох матриць: С (досліджуваній зразок) і D (шаблон, із яким порівнюється даний відбиток малюнка вен):

$$R(C, D) = (c_{11} - d_{11})^2 + (c_{12} - d_{12})^2 + \dots + (c_{n(n-1)} - d_{n(n-1)})^2 + (c_m - d_m)^2. \quad (6)$$

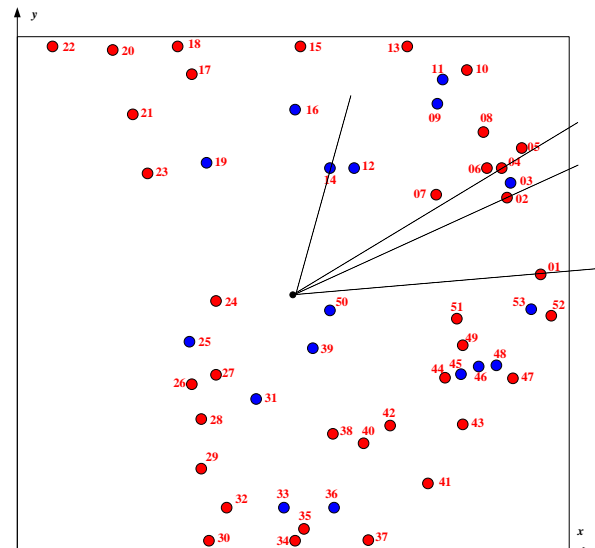


Рис. 3. Подання зображення рисунка вен у вигляді мінущій

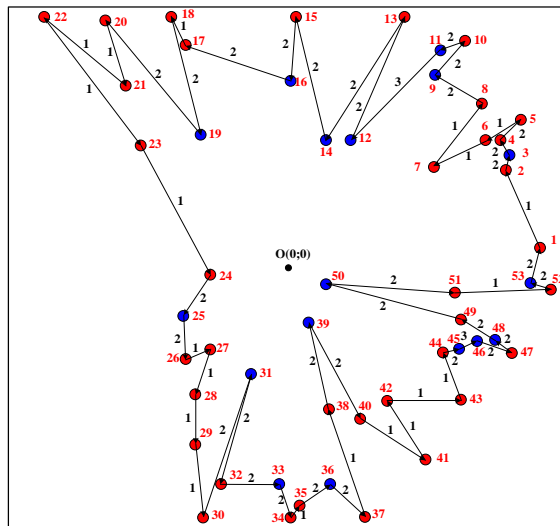


Рис. 4. Орієнтований граф із зазначенням ваг його ребер

Чим меншим буде отриманий результат (близьким до нуля), тим більш схожими будуть орграфи, а отже, і малюнок вен долоні буде більш тотожним шаблонному [11].

Паралельно із попереднім формуємо другий оргграф, вершинами якого є мінущії типу “роздвоєння”, сполучені послідовно ребрами (рис. 5). Для цього зі списку мінущій вибираємо тільки один їх тип, а мінущії типу “закінчення” ігноруємо. В результаті отримуємо оргграф із меншою кількістю вершин і ребер, тому доцільно буде застосовувати для співставлення його із шаблонним координатний метод, проте модифікований для спрощення обрахунків.

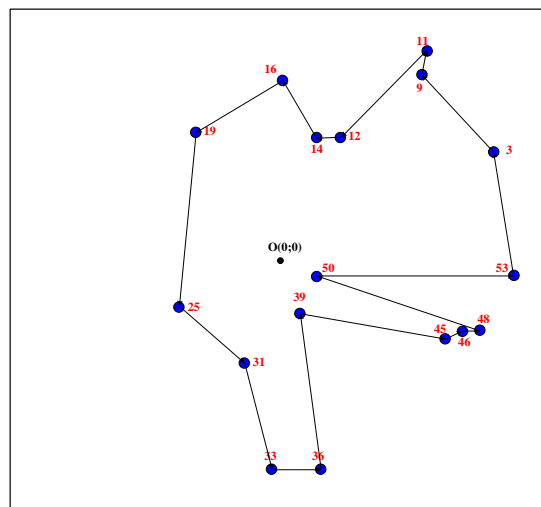


Рис. 5. Орієнтований граф, вершинами якого є мінущії типу “роздвоєння”

Як правило, перевіряючи графи на ізоморфізм, співставляють координати їх вершин (пересвідчившись спершу, що кількість вершин та ребер у двох орграфах співпадає) або довжину ребер між ними. Для цього необхідно обчислювати по черзі як місце вершин на площині, так і геометрію ребер. Інший спосіб ідентифікації графів – обхід вздовж усього ланцюга, обчислюючи довжину маршруту.

Проте ми скористаємося іншим способом перевірки ізоморфізму орграфів, а саме наступним. Оскільки під час переходу від декартових координат до полярних ми обчислили довжину радіус-вектора для кожної з вершин, то доцільно просто скласти матрицю цих довжин для досліджуваного орграфа і шаблонного, а потім здійснити операцію віднімання двох матриць (за формулою 6). Якщо ми отримаємо в результаті значення, нижче за порогове, це означатиме, що ідентифікація пройшла успішно.

Два дані методи можна використовувати як окремо, так і в комплексі: застосувавши обидва методи співставлення двох орграфів, ми отримаємо ще точніший результат, проте витратимо більше часу на перевірку [10].

### Висновки

У роботі здійснено порівняльний аналіз кількох методів ідентифікації людини за малюнком вен долоні і обрано метод із найкращими характеристиками.

Проведено аналіз критичних точок венозного малюнка (мінущій), вирішено використовувати для ідентифікації тільки мінущії типів “роздвоєння” і “закінчення”. Для оптимального зняття даних впроваджено

нову методику сканування руки із використанням фіксаторів, що дозволяє до мінімуму скоротити зсув малюнка вен досліджуваної особи і полегшує його порівняння із шаблоном.

Для скелетизації бінарного зображення обрано метод шаблонів, який дозволяє швидше обробити дані й отримати матрицю даних, – координати мінуцій та їх тип.

Використання графів дозволило уникнути обчислення відстаней між мінуціями та знаходження їх взаємного розташування. Використано ваги ребер у графі, які залежать від того, які саме типи точок сполучає дане ребро. Дана методика раніше не використовувалася під час ідентифікації взагалі.

Для спрощеної ідентифікації ми використовуємо тільки мінуції типу “роздвоєння” та значення довжини радіус-вектора для кожної з них.

В обох методах ідентифікації порівняння двох графів зводиться виключно до віднімання матриць і порівняння результату із пороговим.

## Література

1. Царьов Р.Ю. Біометричні технології : навч. посіб. [для вищих навчальних закладів] / Царьов Р.Ю., Лемеха Т.М. – Одеса : ОНАЗ ім. О.С. Попова, 2016. –140 с.
2. Тихонов И.А. Информативные параметры биометрической аутентификации пользователей информационных систем по инфракрасному изображению сосудистого русла / И.А. Тихонов // Безопасность информационных технологий. – 2011. – № 4. – С. 61–68.
3. Обзор существующих методов биометрической идентификации. URL: <http://www.sec4all.net/modules/myarticles/article.php?storyid=1265>.
4. Starink J., Backer E. Finding point correspondences using simulated annealing". Pattern Recognition. Vol. 28, № 2, 1995, p. 231–240.
5. Клубков И.М. Применение волнового алгоритма для нахождения скелета растрового изображения / И.М. Клубков // Вестник Донского государственного технического университета. – 2001. – Т. 1, № 1 (7). – С. 126–133.
6. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений / Гонсалес Р., Вудс Р. – М. : Техносфера, 2005. – 1072 с.
7. Pfalz J.L., Rosenfeld A. Computer Representation of Planar Regions by their Skeletons. Communications of the Association for Computing Machinery, 1967, Vol. 10, № 2, p. 119–125.
8. Огнев А. В. Центрирование отпечатков пальцев при инвариантном распознавании на основе метрики Хаусдорфа / А. В. Огнев, А. П. Типикин // Оптико-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов, обработки изображений и символьной информации : сб. мат. VIII Междунар. конф. “Расознавание – 2008”. Ч. 2. – Курск : КурскГТУ, 2008. – С. 34–35.
9. Трохимчук Р. М. Теорія графів : навчальний посібник для студентів факультету кібернетики / Р. М. Трохимчук. – К. : Редакційно-видавничий центр “Київський університет”, 1998. – 43 с.
10. Карнаух Т. О. Теорія графів у задачах / Карнаух Т. О., Ставровський А. Б. – К., Наука. – С. 23–44.
11. Домнин Л. Н. Элементы теории графов : учеб. Пособие / Домнин Л. Н. – Пенза : Изд-во Пенз. Гос. ун-та, 2007. – С. 13–31.

## References

1. Tsarov R.Iu. Biometrychni tekhnolohii : navch. posib. [dlia vyshchikh navchalnykh zakladiv] / Tsarov R.Iu., Lemekha T.M. – Odesa : ONAZ im. O.S. Popova, 2016. –140 s.
2. Tihonov I.A. Informativnye parametry biometricheskoy autentifikacii polzovatelej informacionnyh sistem po infrakrasnomu izobrazheniyu sosudistogo rusla / I.A. Tihonov // Bezopasnost informacionnyh tehnologij. – 2011. – № 4. – S. 61–68.
3. Obzor sushchestvuyushih metodov biometricheskoy identifikacii. URL: <http://www.sec4all.net/modules/myarticles/article.php?storyid=1265>.
4. Starink J., Backer E. Finding point correspondences using simulated annealing". Pattern Recognition. Vol. 28, № 2, 1995, p. 231–240.
5. Klubkov I.M. Primenenie volnovogo algoritma dlya nahozhdeniya skeleta rastrovogo izobrazheniya / I.M. Klubkov // Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tehniceskogo universiteta. – 2001. – T. 1, № 1 (7). – S. 126–133.
6. Gonsales R. Cifrovaya obrabotka izobrazhenij / Gonsales R., Vuds R. – M. : Tehnosfera, 2005. – 1072 s.
7. Pfalz J.L., Rosenfeld A. Computer Representation of Planar Regions by their Skeletons. Communications of the Association for Computing Machinery, 1967, Vol. 10, № 2, p. 119–125.
8. Ognev A. V. Centrirovaniye otpechatkov palcev pri invariantnom raspoznavanii na osnove metriki Hausdorfa / A. V. Ognev, A. P. Tipikin // Optiko-elektronnye pribory i ustrojstva v sistemah raspoznavaniya obrazov, obrabotki izobrazhenij i simvolnoj informacii : sb. mat. VIII Mezhdunar. konf. “Raspoznavanie – 2008”. Ch. 2. – Kursk : KurskGTU, 2008. – S. 34–35.
9. Trokhymchuk R. M. Teoriia hrafiv : navchalnyi posibnyk dlia studentiv fakultetu kibernetiky / R. M. Trokhymchuk. – K. : Redaktsiino-vydavnychiy tsentr “Kyivskiy universytet”, 1998. – 43 s.
10. Karnaukh T. O. Teoriia hrafiv u zadachakh / Karnaukh T. O., Stavrovskiy A. B. – K., Nauka. – S. 23–44.
11. Domnin L. N. Elementy teorii grafov : ucheb. Posobie / Domnin L. N. – Penza : Izd-vo Penz. Gos. un-ta, 2007. – S. 13–31.

Рецензія/Peer review : 13.11.2019 р.

Надрукована/Printed : 12.01.2020

Стаття рецензована редакційною колегією