

systems. *IEEE TSE*, 10(6): 619-628, Nov. 1984. 7. Blanning R.W. A relational theory of model management. In: HOLSAPPLE, C.W. & WHINSTON, A.B. (eds.). *Data base management: theory and applications*. Springer-Verlag, 1987. p. 15-53. 8. MA, J. An object-oriented framework for model management. *Decision Support Systems*, 13(2): 133-149, Feb. 1995. 9. Muhana W.A. An object-oriented framework for model management and DSS development. *Decision Support Systems*, 9(2): 217-229, Feb. 1993. 10. Muhana W.A. Symms: a model management systems that supports model reuse, sharing and integration. *European Journal of Operations Research*, 72(2): 214-242, Jan. 1995.

УДК 004.932.2

М.В. Давидов

Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра інформаційних систем та мереж

ВДОСКОНАЛЕНИЙ МЕТОД СКЕЛЕТОНІЗАЦІЇ ДВОВИМІРНОЇ ОБЛАСТІ, ЩО ВРАХОВУЄ ОСОБЛИВОСТІ КОНТУРУ

© Давидов М.В., 2013

Розглянуто задачу скелетонізації двовимірної області із врахуванням особливостей контуру. Пропонується модифікація методу скелетонізації Чжана–Суна, яка використовує попередній обхід контуру для визначення його особливих пікселів. З використанням нового методу отримано скелети, стійкі до повороту області. Метод застосовано для скелетонізації зображень кисті руки в дактильній абетці.

Ключові слова: скелетонізація, потоншення, розпізнавання дактилю.

The problem of two-dimensional area skeletonization that takes into account boundary features is considered. A modification of Zhang-Suen parallel thinning algorithm is proposed. The modification utilizes boundary tracking for boundary features detection. Skeletons that were obtained by means of the proposed method were found to be persistent to region rotation. The method was utilized for dactyl images skeletonization and processing.

Key words: skeletonization, thinning, dactyl recognition.

Вступ

Скелет двовимірної області має важливе значення для подання і розпізнавання об'єктів у різних областях комп'ютерної графіки. Зокрема, моделі на основі скелета добре зарекомендували себе під час розв'язання задач аналізу рукописного тексту [1], порівняння гнучких об'єктів [2], розпізнаванні перехожих [3]. Також моделі на основі скелета можна використовувати для розпізнавання елементів жестової мови та визначення положення тіла людини, яка жестикулює [4].

Основною властивістю скелета є збереження форми та топологічної структури об'єкта. Однак алгоритми побудови скелета чутливі до шуму та деформації межі об'єкта, що може серйозно змінити результат скелетонізації.

Скелет замкненої двовимірної області – це множина усіх точок області, кожна з яких має не менше ніж дві найближчі рівновіддалені точки контуру цієї області [5]. Такий скелет подають у вигляді відрізків та сегментів кривих.

Відомі методи побудови скелета поділяють на методи, які розглядають контур області як множину багатокутників, та методи, які працюють із растровим поданням області. Растрові методи називають методами *скелетонізації*, або *потоншення*, а побудований за ними скелет складається з множини пікселів та є певним наближенням скелета замкненої двовимірної області. Скелет, побудований методами скелетонізації, повинен бути завтовшки один піксель та має бути зв'язним для зв'язної двовимірної області.

Методи, які розглядають контур області у вигляді множини багатокутників, дають хороші результати з пошуку скелета, але відомі реалізації [6,7] довше працюють у випадку неопуклих областей, які містять діри, та, за дослідженнями автора, іноді дають невірні результати, що може бути зумовлене похибкою арифметичних обчислень.

Методи, які працюють із растровим поданням, гарантовано дають результат за скінченну кількість кроків та вільні від похибок обчислення. Один із відомих методів – паралельний алгоритм скелетонізації Чжана–Суна (T.Y. Zhang, C.Y. Suen) – добре зарекомендував себе для потоншення бінарних зображень та зручно розпаралелюється для обчислювальних структур з використанням багатоядерного процесора та відеоадаптера [8]. Для невеликих растрових зображень до 640x480 пікселів швидкодія скелетонізації за методом Чжана–Суна приблизно вдвічі вища, ніж швидкодія алгоритму Петра Фелкела та Степана Обдржалека для побудови скелета на основі багатокутника контуру, реалізованого Роджером Джеймсом для бібліотеки Virtual Terrain Project (VTP). Недоліком відомих методів скелетонізації є те, що за цими методами неможливо відрізнити невеликі коливання контуру від значної зміни напрямку обходу контуру. Це зумовлене тим, що для обчислень використовується невеликий окіл розміру 3x3 або 5x5 пікселів. У результаті побудовані скелети областей значно змінюються при повороті двовимірної області відносно системи координат (рис. 1). Для деяких фігур скелет не відтворює кутів фігури, а зміщений до середини (рис. 2).

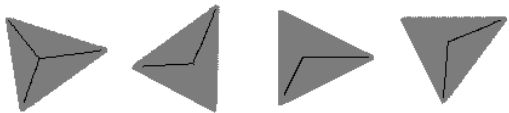


Рис. 1. Зміна результату скелетонізації двовимірної області за методом Чжана-Суна при повороті області



Рис. 2. Результат скелетонізації двовимірних областей за методом Чжана-Суна не враховує видимих кутів двовимірної області

Дослідження різних методів скелетонізації [9–12] показало, що відсутні швидкі та надійні методи скелетонізації, які вирішують усі вищенаведені проблеми.

Постановка проблеми

Розв'язання задач розпізнавання двовимірних образів із використанням скелета вимагає розроблення швидкого, надійного методу скелетонізації області, поданої растровим зображенням. Отриманий скелет двовимірної області повинен бути стійким до повороту області на невеликий кут та стійким до малих змін форми області.

Растрове зображення двовимірної області розглядається як матриця $M = \{m_{ij}\}_{h \times w}$, $1 \leq i \leq h, 1 \leq j \leq w$, де h, w – висота та ширина матриці, відповідно, $m_{ij} \in \{0, 1\}$ – елементи матриці. Елемент матриці, що дорівнює одиниці, позначає точку, яка належить двовимірній області. Окремий елемент матриці m_{ij} будемо називати пікселем із координатами (i, j) .

Контуром області вважатимемо множини пікселів, які межують по вертикалі або горизонталі з пікселями, які не належать області.

Контури областей, які виникають у задачах розпізнавання образів, містять видимі кути, які людина асоціює з певними особливостями форми, та велику кількість нерівностей, які мають локальний характер та вважаються неважливими (рис. 3).

Пікселі контуру, які є вершинами видимих людиною кутів, будемо називати **особливими пікселями контуру**. Визначення особливого пікселя контуру є нечітким, але такий піксель має залишатися особливим при повороті зображення.

У статті подано новий спосіб визначення особливих пікселів контуру та метод побудови скелета, який забезпечує збереження особливих пікселів контуру у вершинах побудованого скелета, що забезпечує стійкість скелета до повороту області.

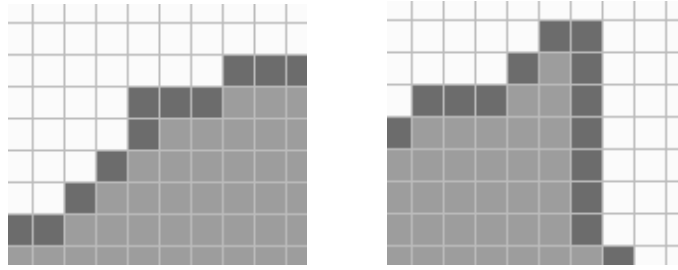


Рис. 3. Малі, несуттєві коливання контуру (ліворуч) та важливий кут (праворуч)

Основна частина

Опрацьовують двовимірну область у два етапи. На першому етапі шукають особливі пікселі контуру, а на другому будують скелетон області із врахуванням знайдених особливих пікселів. Через те, що немає строгого математичного визначення поняття особливого пікселя контуру, введемо евристичну функцію, значення якої вказуватиме, чи формує піксель контуру видимий кут, чи ні. Для побудови такої функції можуть бути використані різноманітні методи оцінювання дискретної кривини [13]. Серед таких показників, які можна швидко обчислити, є кут, побудований із пікселя контуру до пікселів, взятих через певний інтервал s (рис. 4). Інтервал, який найліпше підходить для розв'язання конкретної задачі, задається залежно від розміру області та можливих нерівностей. Більше значення інтервалу використовується для того, щоб ігнорувати більші нерівності контуру.

Особливі пікселі контуру характеризуються малим значенням кута φ . Шукатимемо ці пікселі за такими критеріями:

- 1) кут φ має бути меншим за задане порогове значення Φ ;
- 2) кут φ має бути зовнішнім, а не внутрішнім кутом контуру;
- 3) в околі s пікселів контуру не повинно бути пікселя з меншим значенням кута φ ;
- 4) піксель контуру повинен лежати на локально опуклій частині контуру. Тобто кут, утворений із попереднім та наступним пікселем контуру, повинен бути зовнішнім кутом контуру (рис. 5).

Введені критерії 3 та 4 є подальшим розвитком відомого методу кутового детектора, описаного Розенфельдом та Азріелем [14]. Ці критерії введено для того, щоб уможливити застосування методу скелетонізації, описаного нижче.

Для пошуку особливих пікселів контуру застосовано обхід контуру за методом правої руки та підрахунок значення косинуса кута φ . Чим більше значення косинуса кута, тим гострішим буде відповідний кут. Двовимірну область, задана растром, не обов'язково повинна бути зв'язною. У випадку, коли область містить декілька зв'язних частин, необхідно перебрати контури їх усіх та застосувати до них визначення особливих пікселів.

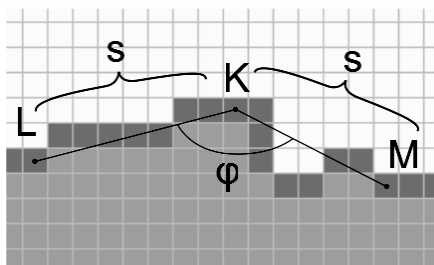


Рис. 4. Кут φ із вершиною в пікселі K контуру, побудований до пікселів L та M , узятих через $s = 8$ пікселів контуру

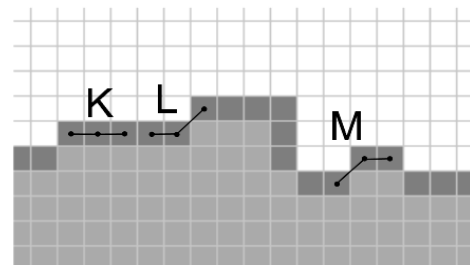


Рис. 5. Локально опуклі (K, M) та локально вгнута (L) частини контуру

Сформулюємо алгоритм визначення особливих пікселів контуру двовимірної області. Алгоритм визначення контуру отримує на вхід матрицю M та повертає множину особливих пікселів $V = \{(i_k, j_k)\}$. Алгоритм складається з таких кроків:

Ініціалізація. Очистити множину особливих пікселів V .

Крок 1. Пошук пікселя, котрий не належить жодному знайденому раніше контуру області, за умови $(m_{ij} = 1) \wedge (j = 1 \vee m_{i, j-1} = 0)$. Пошук здійснюється послідовно для всіх пар (i, j) , $1 \leq i \leq h, 1 \leq j \leq w$. Якщо таких пікселів немає – кінець алгоритму.

Крок 2. Обхід контуру, починаючи з пікселя (i, j) , за методом правої руки. Пікселями контуру вважаються пікселі двовимірної області, які межують по вертикалі або горизонталі з пікселями, які не належать області. При цьому формується список C з n пікселів контуру $C = \langle c_k \rangle, c_k = (i_k, j_k), k = 0, n-1$.

Крок 3. Обхід контуру C з обчисленням функцій

$$G_1(k) = [(c_k - c_{k-1 \bmod n}) \times (c_{k+1 \bmod n} - c_k)]_z$$

$$G_s(k) = [(c_k - c_{k-s \bmod n}) \times (c_{k+s \bmod n} - c_k)]_z$$

та

$$F(k) = \begin{cases} 0, \text{ якщо } G_1(k) < 0 \vee G_s(k) < 0 \\ \frac{(c_{k-s \bmod n} - c_k) \cdot (c_{k+s \bmod n} - c_k)}{\|c_{k-s \bmod n} - c_k\| \|c_{k+s \bmod n} - c_k\|}, \text{ якщо } G_1(k) \geq 0 \wedge G_s(k) \geq 0 \end{cases}$$

для $k = \overline{0, n-1}$. Значення функції $G_s(k)$ є z -компонентою векторного добутку двовимірних векторів $(c_k - c_{k-s \bmod n})$ та $(c_{k+s \bmod n} - c_k)$, доповнених знизу нулем. Її значення показує, чи відповідний кут є зовнішнім (рис. 6). Якщо значення $G_s(k) < 0$, то кут є внутрішнім, і значення $F(k)$ для нього прирівнюється до нуля. Якщо $G_1(k) < 0$, то піксель c_k лежить на локально вгнутій частині контуру. Якщо $G_1(k) \geq 0 \wedge G_s(k) \geq 0$, то кут є зовнішнім, і значення функції $F(k)$ є косинусом кута, побудованого з пікселя контуру c_k до точок, які лежать через s точок до та після пікселя c_k , де s – параметр алгоритму, який задає кількість пікселів контуру, які пропускають. Що більший косинус кута, то гостріший побудований кут.

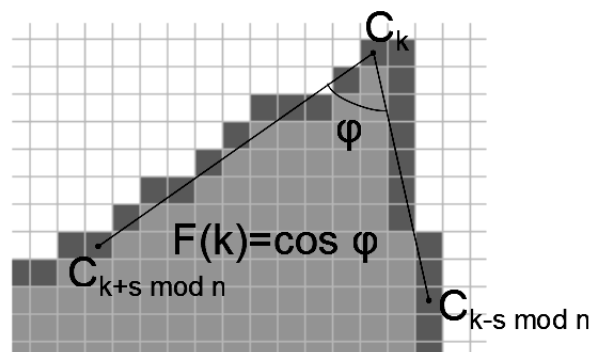


Рис. 6. Геометричний зміст функції $F(k)$.

Для прикладу $s = 10$

Крок 4. Пошук хороших локальних максимумів функції $F(k)$. Максимум вважається хорошим, якщо піксель (i_k, j_k) є локально опуклим пікселем контуру, значення $F(k)$ більше за задане порогове значення $\cos\Phi$, а також більше за значення функції $F(k)$ або дорівнює йому, в околі s точок контуру. Якщо в околі s точок контуру є максимумами з однаковим значенням $F(k)$,

то серед них обирається перший за напрямом обходу контуру. Як варіант можливо обирати максимум, який є медіаною серед інших в околі.

Такий вибір максимумів забезпечує опуклість контуру в особливих пікселях та найгостріший видимий кут. Параметр, який керує околом s , забезпечує відкидання нерівностей контуру, зумовлених зашумленістю та неточністю методів попереднього опрацювання зображення.

Крок 5. Позначити пікселі контуру C у матриці M значенням $m[i_k, j_k] = 2$ та перейти до кроку 1.

Кінець. Повернути множину особливих пікселів контуру $V = \{(i_k, j_k)\}$.

Розроблений алгоритм вимагає перебору усіх пікселів матриці M та по одному обходу кожного контуру. Оскільки сумарна кількість пікселів усіх контурів менша за кількість елементів матриці M , складність алгоритму лінійно залежить від кількості елементів матриці M та складає $O(w \cdot h)$, де w, h – ширина та висота матриці відповідно.

Визначення особливих пікселів виконується один раз перед застосуванням відомого алгоритму скелетонізації. Після визначення особливих пікселів контуру виконується класичний алгоритм скелетонізації з урахуванням визначених особливих пікселів. Це можливо реалізувати двома способами:

- 1) зі зміною класичного алгоритму скелетонізації для урахування позначених пікселів;
- 2) зі зміною форми області для запобігання відкидання особливих пікселів.

Через те, що перший спосіб уповільнює роботу класичного методу скелетонізації, доцільно використати спосіб зі зміною форми області. Для цього до області додавалися два пікселі, які не давали алгоритму скелетонізації відкинути особливі пікселі контуру. Ці пікселі додавалися так, щоб вони контактували з контуром лише в особливому пікселі (рис. 7). Це було можливим, оскільки такі особливі пікселі обиралися на локально опуклих ділянках контуру.

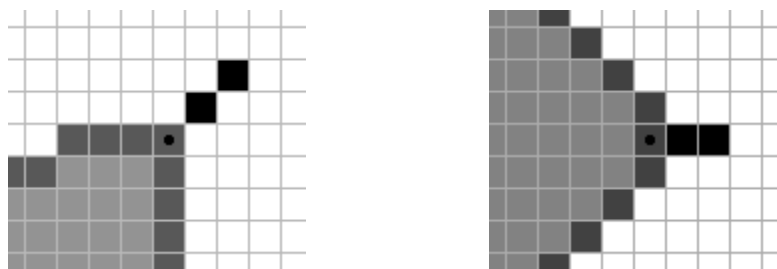


Рис. 7. Додавання пікселів до області по діагоналі (ліворуч) та до сторони (праворуч). Чорним показано додані пікселі, точкою позначено особливий піксель контуру

Опрацьовувані зображення давали змогу внести такі зміни до двовимірної області без спотворення її топології. Після внесення змін до області застосовували класичний алгоритм Чжана–Суна.

Результати експериментів

Для тестування розробленого алгоритму скелетонізації з урахуванням особливих пікселів контуру проведено експерименти зі скелетонізацією геометричних фігур та зображень кисті руки при виконанні дактильної абетки.

Врахування особливих пікселів контуру дало змогу отримати повніші скелети геометричних фігур (рис. 8) та забезпечило стійкість результату скелетонізації до повороту (рис. 9).

Для тестування застосовності розробленого алгоритму скелетонізації для опрацювання елементів жестової мови обрано 40 кадрів дактильної абетки. Абетка містить по одному кадру зображення кисті руки при дактилюванні літер української алфавіту та додатково для літер 'Д', 'Є', 'Й', 'Я', які показують у динаміці, обрано по декілька кадрів із різним зображенням кисті руки. Для літери 'Р' так само обрано декілька кадрів, оскільки не на всіх кадрах чітко видно проміжок між вказівним та безіменним пальцем.

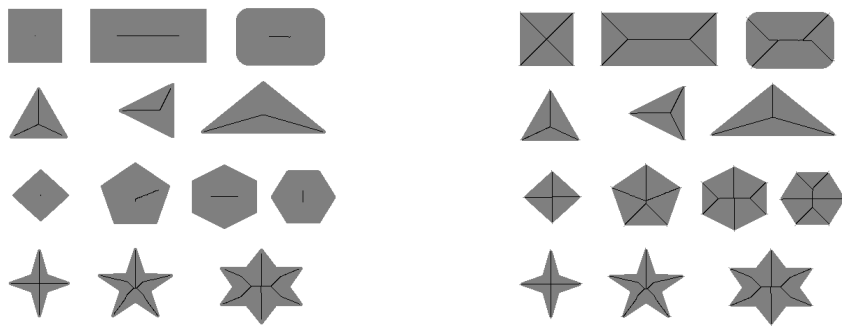


Рис. 8. Скелети геометричних фігур, отримані методом скелетонізації Чжана–Суна (ліворуч) та розробленим методом (праворуч)

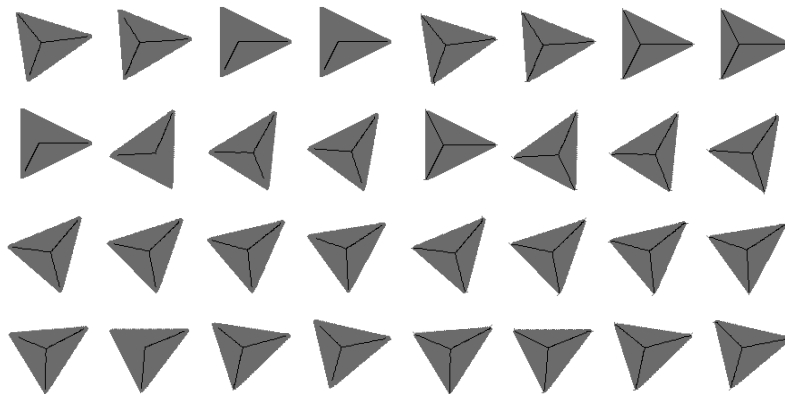


Рис. 9. Скелети повернутих трикутників, отримані методом скелетонізації Чжана–Суна (зліва) та розробленим методом (справа)

До кадрів абетки застосовано алгоритми визначення кольору шкіри з використанням неймережі [15]. Отримані двовимірні області піддавалися скелетонізації для подальших порівняння та опрацювання.

Дослідження стійкості отриманих скелетів до повороту кисті руки в кадрі показало, що в семи з 40 форм руки скелет значно змінюється під час повороту. Приклад такої зміни наведено на рис. 10. Для скелетонізації за методом Чжана–Суна значна зміна скелета спостерігалася для літер Й, К, П, С, Т, Ч, Ђ. При застосуванні нового методу за добре підібраних параметрів зміна скелета відбувалася лише у двох із 40 форм (літери дактильної абетки Й та Ђ). Найліпший результат отримано при значеннях параметрів $\Phi = 65^\circ$ та $s = 10$. Підбирали параметри методу за допомогою програмного засобу Video Recognition Toolkit.

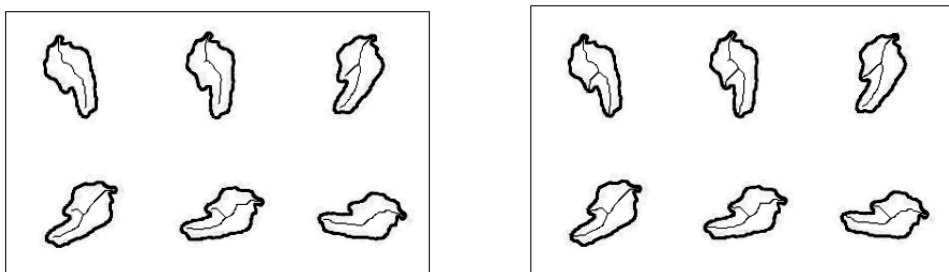


Рис. 10. Результат скелетонізації за методом Чжана–Суна (ліворуч) та за новим методом (праворуч)

Для розрахунку часових показників роботи алгоритму використано комп'ютер із чотириядерним процесором Intel Core-i5 3,1 ГГц. На такому обладнанні час скелетонізації 40 кадрів кисті руки розміром 180x136 пікселів запропонованим методом складає 77 мс, класичним методом Чжана–Суна – 73 мс. Отри-

маний час скелетонізації одного кадру менший за 2 мс, що дає змогу використовувати розроблені алгоритми для розв'язання задач у реальному часі, якими, зокрема, є задачі розпізнавання жестової мови.

Висновки

За запропонованим алгоритмом вдалося усунути проблеми стійкості методів скелетонізації до повороту області та коливань контуру. Розроблений метод добре зарекомендував себе при побудові скелета кисті руки при показі дактильної абетки. Аналіз отриманих скелетів показав, що скелет області кисті руки не завжди відповідає конфігурації пальців. Це зумовлено тим, що двовимірна область не містить інформації про освітлення кисті руки, яке несе додаткову інформацію про конфігурацію пальців руки в просторі. Розроблення методів, які враховуватимуть фактори освітлення, буде предметом подальших досліджень автора.

1. Местецкий Л. М. Анализ рукописного текста на основе непрерывного гранично-скелетного представления / Л. М. Местецкий, И. А. Рейер, Т. У. Седерберг // Искусственный интеллект: Журнал НАН Украины. – 2002. – №2. – С. 501–509. 2. Mestetskiy L. Shape comparison of flexible objects - similarity of palm silhouettes / L. Mestetskiy // VISAPP 2007: Proceedings of the Second International Conference on Computer Vision Theory and Applications, Barcelona, Spain, March 8-11, 2007. – Volume 1. – isbn 978-972-8865-73-3. – 2007. – P. 390–393. 3. Yogameena B. RVM-based human action classification in crowd through projection and star skeletonization / B. Yogameena, S. Veeralakshmi, E. Komagal, S. Raju, V. Abhaikumar // Hindawi Publishing Corp: EURASIP Journal on Image and Video Processing. – №1. – 2009. – P. 4:3–4:3. 4. Вербич О. Визначення положення тіла людини у комп'ютерному тренажері української жестової мови / О. Вербич, М. Давидов, Ю. Нікольський, В. Пасічник // Вісник Національного університету “Львівська політехніка”, Інформаційні системи та мережі, Львів. – №715(2011). – С. 24–39. 5. Местецкий Л. Скелет многосвязной многоугольной фигуры / Л. Местецкий // Труды 15 междунар. конф. ГРАФИКОН-2005. – Новосибирск. – С. 242-249. 6. Alliez P. Computational Geometry Algorithms Library / Pierre Alliez, Eric Berberich, Andreas Fabri et al // ел. ресурс. – реж. доступу <http://www.cgal.org>. – August 17, 2012. 7. Felkel P. Straight Skeleton Implementation / Petr Felkel and Stepan Obdrzalek // Proceedings of Spring Conference on Computer Graphics. – 1998. – P. 210–218. 8. Zhang T.Y. A fast parallel algorithm for thinning digital patterns / T. Y. Zhang, C. Y. Suen // ACM: Commun ACM. – March 1984. – Vol. 27. – №3. – P. 236–239. 9. Lam L. Thinning Methodologies – A Comprehensive Survey / L. Lam, S.W. Lee, C.Y. Suen // IEEE Computer Society: IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – Vol. 14. – issn 0162-8828. – 1992. – P. 869–885. 10. Latecki L.J. Skeletonization using SSM of the Distance Transform / L.J. Latecki, L. Quan-nan, B. Xiang L. Wen-yu // Image Processing, 2007. ICIIP 2007. IEEE International Conference on. – 16-19 oct. 2007. – Vol. 5. – P. 349–352. 11. Kardos P. Sufficient Conditions for Order-Independency in Sequential Thinning / Peter Kardos // Acta Cybernetica: Szeged, Hungary, Hungary. – Vol. 20. – № 1. – 2011. – P. 87–100. 12. Кораблев Н.М. Гибридный метод скелетонизации изображений с использованием искусственных иммунных систем / Н.М. Кораблев, А.В. Легедина // Информатика, математическое моделирование, экономика: Сборник научных статей по итогам Второй Международной научно-практической конференции, г. Смоленск, 20 апреля 2012 г. В 3-х томах. – Смоленск: Смоленский филиал АНО ВПО ЦС РФ “Российский университет кооперации”. – Том 2. – 2012. – С. 100–106. 13. Kerautret B. Comparison of Discrete Curvature Estimators and Application to Corner Detection / B. Kerautret, J.-O. Lachaud, B. Naegel // In Proceedings of the 4th International Symposium on Advances in Visual Computing (ISVC '08), George Bebis, Richard Boyle, Bahram Parvin, Darko Koracin, Paolo Remagnino, Fatih Porikli, Jörg Peters, James Klosowski, Laura Arns, Yu Ka Chun, Theresa-Marie Rhyne, and Laura Monroe (Eds.). — Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg. — 2008. — pp. 710-719. 14. Rosenfeld A. Angle Detection on Digital Curves / A. Rosenfeld, E. Azriel // in Computers, IEEE Transactions on Computer Science Center, University of Maryland, College Park, Md. 20742. – 1973. – Volume: C-22. – Issue: 9. – pp. 875-878. 15. Давидов М. В. Неіпромережний класифікатор елементів відеозображень реального часу / М. В. Давидов, Ю. В. Нікольський // Вісник Нац. ун-ту “Львівська політехніка” “Комп'ютерні системи проектування. Теорія і практика”. – Львів, 2006. – №564. – С. 18–25.