

УДК 681.3

Т.А. Рузова, канд. техн. наук

Днепропетровский национальный университет
им. О. Гончара, г. Днепропетровск, Украина,
e-mail: ruzov1973@bk.ru

ПОСТРОЕНИЕ СКЕЛЕТОВ ИЗОБРАЖЕНИЙ АГРЕГИРОВАННЫХ ОБЪЕКТОВ ДИСПЕРСИЙ

T.A. Ruzova, Cand. Sci. (Tech.)

O. Gonchar Dnepropetrovsk National University, Dnipropetrovsk,
Ukraine, e-mail: ruzov1973@bk.ru

DISPERSION AGGREGATED OBJECTS IMAGES SKELETONIZATION

Построение остова является исключительно важным этапом в задачах сегментации элементов дисперсных образований. В связи с чем большое значение имеет корректность его представления – соответствие структуре рассматриваемого объекта и его устойчивость к искажениям формы, которые обусловлены шумами. Основной проблемой известных методов является получение недостаточно тонких (толщиной более одного пиксела) скелетов и чувствительность к шумам границы области.

Целью исследования является создание метода построения скелета изображений агрегированных элементов дисперсных образований, устойчивого к шумам границы объекта и представляющего скелет в виде набора отрезков прямых линий между узлами ветвления, упорядоченных в соответствии с продвижением от внешних узлов к внутренним. Предложенный метод позволяет строить скелет изображений объектов высокой степени сложности, характеризующийся отсутствием избыточных точек, устойчивый по отношению к шумам на границе объекта, позволяющий избежать нарушения связности и излишней детализации объекта.

Метод включает следующие шаги: построение базового скелета на основе алгоритма Зонга-Суня, удаление избыточной связности, нахождение опорных точек и представление скелета в виде набора веток между ними, уточнение структуры скелета с целью представления ветвей отрезками прямых, упорядочивание ветвей соответственно продвижению от периферии агрегата к центру.

Полученные результаты будут полезны при разработке методов и алгоритмов сегментации изображений сложных объектов, а также агрегированных образований.

Ключевые слова: скелет изображения, агрегат, дисперсные образования, сегментация, связность

Введение. Понятие скелета (остова) многоугольника широко используется в теории распознавания образов, так как позволяет получить наиболее полную информацию о геометрии объекта, хорошо отображая его форму [1, 2]. Скелет многоугольника P , согласно [3], можно рассматривать как множество σ его внутренних точек, таких, что каждая точка $p \in \sigma$ равноудалена, по крайней мере, от двух точек на границе многоугольника P . Поэтому скелет многоугольника часто называют срединными осями [4].

Существуют различные подходы к построению скелета. Один из путей состоит в использовании морфологических операций – эрозии и замыкания [1].

Однако, такой метод не предусматривает никаких условий, обеспечивающих связность остова.

Построение скелета многоугольника можно также связать с построением диаграммы Вороного [3].

Для получения связного остова Блюмом было предложено преобразование к срединным осям, имеющее наглядное представление как процесс выгорания травы, если представить себе, что огонь, одновременно загоревшийся на границе области, равномерно движется внутрь, сжигая фигуру. Точки встречи огненных фронтов и являются срединными осями, образующими скелет фигуры [1, 5]. Однако, реализация такого алгоритма не эффективна ввиду большого объема вычислений, в связи с чем разработан ряд алгоритмов, оптимизирующих процесс и ориентированных на утоньшение фигуры путем удаления ее граничных точек при условии, что они не

являються концевими, не порушується зв'язність області і не происходит излишней эрозии объекта [1].

Постановка задачі. Построение остова является исключительно важным этапом в задачах сегментации элементов дисперсных образований, а точнее – структур, образуемых микрочастицами при их агрегировании, так как именно путем анализа остова можно получить наиболее полное представление о структуре образования с целью последующей его декомпозиции. В связи с этим большое значение имеет корректность представления скелета – его соответствие структуре рассматриваемого объекта и его устойчивость к искажениям формы, которые обусловлены шумами в каналах передачи информации при получении изображения. Основной проблемой указанных методов является получение недостаточно тонких (толщиной более одного пиксела) скелетов в произвольном случае и большая чувствительность к шумам границы области, что часто приводит к наличию отдельной ветки для каждой незначительной выпуклости на границе.

Целью данного исследования является создание метода построения скелета изображений агрегированных элементов дисперсных образований, устойчивого к шумам границы объекта и представляющего скелет в виде набора отрезков прямых линий между узлами ветвления, упорядоченных в соответствии с продвижением от внешних узлов к внутренним.

Методы решения. Одним из наиболее эффективных алгоритмов построения скелетов бинарных изображений является алгоритм Зонга-Суня, который используется для формирования первоначального варианта скелета. Алгоритм Зонга-Суня состоит в следующем [1, 6]: обозначим точки изображения, принадлежащие объекту – 1, фону – 0. Тогда для каждой точки p контура объекта вводится матрица, описывающая ее окрестность

$$P = \begin{bmatrix} p_1 & p_2 & p_3 \\ p_8 & p & p_4 \\ p_7 & p_6 & p_5 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Точка p считается кандидатом на удаление при выполнении следующих условий

$$2 \leq B(p) \leq 6; \quad (2)$$

$$A(p) = 1; \quad (3)$$

$$p_2 \times p_4 \times p_6 = 0; \quad (4)$$

$$p_4 \times p_6 \times p_8 = 0, \quad (5)$$

где $B(p) = \sum_{i=1}^8 p_i$ в матрице (1), а $A(p)$ – число пере-

ходов $0 \rightarrow 1$ в окрестности (1) рассматриваемой точки. Выполнение условия (2) гарантирует, что рассматриваемая точка не является конечной. Условие (3) нарушается в том случае, если p находится на участке контура толщиной в один пиксел и ее удале-

ние в этом случае привело бы к нарушению связности скелета. Условия (4) и (5) позволяют удалить северо-западные и юго-восточные точки, так как их одновременное выполнение возможно при $p_2 = 0$, $p_8 = 0$, или $p_4 = 0$, $p_6 = 0$.

Таким образом, на первом шаге помечаем для удаления точки контура, для которых выполняются условия (2) – (5), при этом удаление как таковое не производится, чтобы не нарушалась структура объекта. Удаление помеченных точек производится только после проверки всех точек границы. Аналогично выполняется второй шаг, но условия (4), (5) заменяются на следующие

$$p_2 \times p_4 \times p_8 = 0,$$

$$p_2 \times p_6 \times p_8 = 0.$$

Процедура повторяется, пока не прекратится процесс удаления точек.

Однако, этот алгоритм охватывает не все случаи. Так в ситуации, представленной на рис. 1, а, условие (3) для точки r_0 (при $r_0 = 1$) не выполняется, ввиду чего эта точка не подлежит удалению и у скелета появляется избыточная связность – скелет получается недостаточно тонким. В случае, представленном на рис 1, б, концевая точка r_1 , напротив, будет удалена, ввиду того, что условие (2), обеспечивающее сохранение концевых точек, выполняется: r_1 имеет двух соседей, хотя и является концевой. После удаления r_1 , кандидатом на удаление становится r_2 и т.д, вследствие чего происходит частичное разрушение скелета.

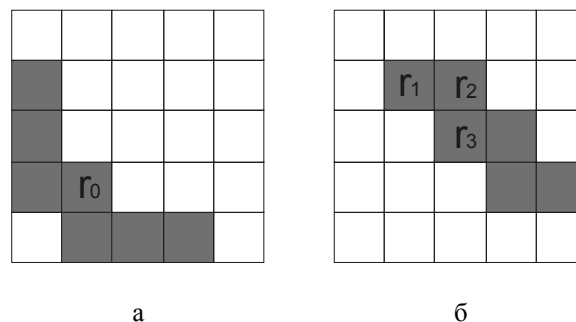


Рис. 1. Случаи некорректной работы алгоритма Зонга-Суня: а – случай избыточной связности; б – случай разрушения скелета; r_0, r_1, r_2, r_3 – точки скелета

Построенный таким образом скелет модельной структуры приведен на рис. 2. В левой части рисунка приведен увеличенный фрагмент скелета. Как видно, эта кривая характеризуется избыточной связностью. Согласно [7] множество называется связным, если любые его две точки можно соединить ломаной линией, все точки которой также принадлежат этому множеству. При построении скелета актуальным является получение не просто связной, а предельно тонкой кривой, лишенной „лишних“ точек. Будем считать множество точек, составляющих остовную

кривую, избыточно связным, если существуют хотя бы две его точки, которые можно соединить двумя или более несовпадающими ломаными. В этом случае скелет содержит избыточные точки, утолщающие кривую, при удалении которых его связность не нарушается.

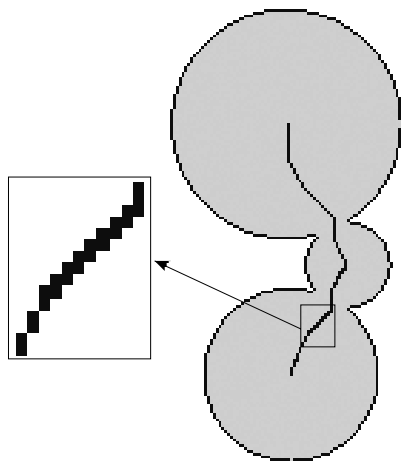


Рис. 2. Построение скелета модельного объекта стандартным алгоритмом Зонга-Суня

Для устранения этого недостатка автором предлагается поступать следующим образом: для каждой точки p скелета, полученного алгоритмом Зонга-Суня, анализируем окрестность (1) и проверяем, сохраняется ли связность скелета во всех существующих из p направлениях при удалении p . Другими словами, для каждой точки p_i ($p_i \in P$; $p_i = 1$; $i = \overline{1,8}$) проверяем выполнение одного из следующих условий

- $i = 1: p_2 \vee p_8 = 1$;
- $i = 2: p_1 \vee p_3 \vee p_4 \vee p_8 = 1$;
- $i = 3: p_2 \vee p_4 = 1$;
- $i = 4: p_2 \vee p_3 \vee p_5 \vee p_6 = 1$;
- $i = 5: p_6 \vee p_4 = 1$;
- $i = 6: p_4 \vee p_5 \vee p_7 \vee p_8 = 1$;
- $i = 7: p_6 \vee p_8 = 1$;
- $i = 8: p_6 \vee p_7 \vee p_1 \vee p_2 = 1$,

где $p_i \vee p_j$ – операция логического сложения.

Например, если $p_1 = 1$, то для того, чтобы в p_1 не возник разрыв скелета при ее удалении, достаточно, чтобы $p_8 = 1$ или $p_2 = 1$. Если связность скелета в каждом из существующих направлений при удалении точки p сохраняется, значит эта точка является избыточной и подлежит удалению. На рис. 3 приведен результат применения указанного подхода к фигуре, изображенной на рис. 2. В отличие от скелета, представленного на рис. 2, откорректированный предложенным образом скелет представляет собой кривую толщиной в один пиксел.

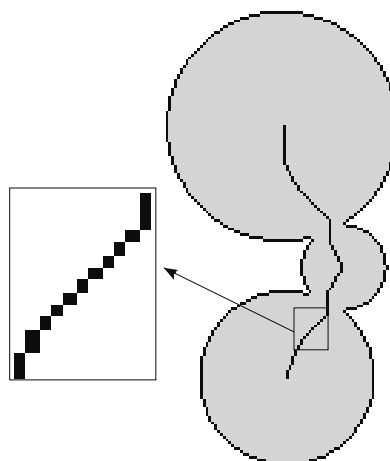


Рис. 3. Исключение избыточных точек скелета модельного объекта

Однако такая кривая не имеет аналитического представления, что неудобно для дальнейших операций по сегментации объектов. Представим скелет в виде набора ветвей. Введем опорные точки. После удаления точек, придающих избыточную связность, скелет представляет собой кривую толщиной в один пиксел. Поэтому признаком того, что p – точка ветвления (точка B_3 на рис. 4) является наличие трех и более ненулевых точек в ее окрестности P

$$B(p) \geq 3. \tag{6}$$

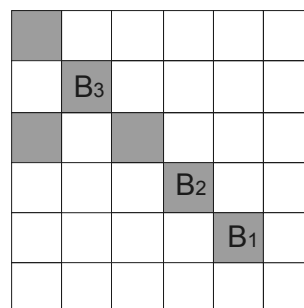


Рис. 4. Классификация точек скелета: B_1, B_2, B_3 – точки скелета

Признак тупиковой точки – одна ненулевая точка в окрестности P (точка B_1 на рис. 4)

$$B(p) = 1. \tag{7}$$

При $B(p) = 2$ имеем промежуточную точку ветви (точка B_3 на рис. 4). На данном начальном этапе будем считать опорными точки скелета, удовлетворяющие условиям (6)–(7).

Под веткой будем понимать участок скелета между двумя опорными точками (B_1B_3). Для представления скелета в виде набора ветвей будем последовательно перебирать множество опорных точек и трассировать все направления, исходящие из каждой точки. Т.е. для каждой опорной точки B_0

(рис. 5) будем перебирать все ненулевые точки ее окрестности P и продвигаться по каждому из направлений (1, 2, 3), занося текущие точки в структуру памяти, созданную для формирования соответствующей ветви, до достижения опорной точки (B_1, B_2, B_3). Полученный участок кривой скелета между двумя опорными точками (B_0B_1, B_0B_2, B_0B_3) маркируем как ветвь.

Однако такое представление не учитывает форму кривой скелета, ее изломы. Так скелет, изображенный на рис. 6, будет представлен в виде одной ветки B_1B_2 , узел в точке B_3 будет отсутствовать, так как эта точка не является опорной, ввиду не выполнения условий (6)–(7).

Поэтому описание остова, при котором каждая ветвь является кривой, представленной набором точек, неудобно как для хранения в памяти ПК, так и для анализа объекта.

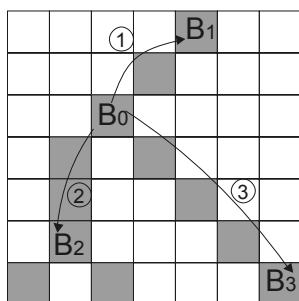


Рис. 5. Трассирование ветвей скелета: B_0, B_1, B_2, B_3 – опорные точки скелета; 1, 2, 3 – направления трассировки

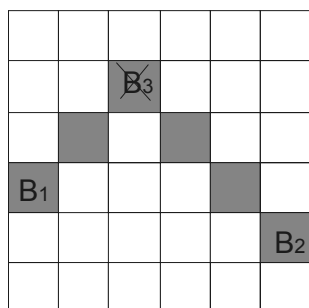


Рис. 6. Особенности представления ветвей скелета в виде списка точек: обозначения см. на рис. 5

Целесообразным является представление скелета в виде набора отрезков прямых, которые несложно хранить в параметрическом виде. Для этого из каждой точки p рассматриваемой ветки L скелета опускаем перпендикуляр pp' к прямой AB , проведенной через концы ветки L (рис. 7), и вычисляем $\Delta = |pp'|$ – отклонение ветки от прямой AB в точке p . Тогда среднее отклонение ветки от аппроксимирующего ее отрезка

$$\bar{\Delta} = \frac{\sum_{i=1}^N \Delta_i}{N},$$

где N – число точек рассматриваемой ветки.

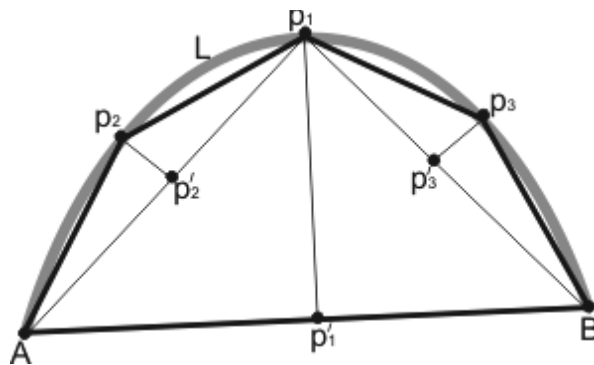


Рис. 7. Схема представления ветки остова в виде набора отрезков: L – исходная ветка; A, B – концы ветки L ; p_1, p_2, p_3 – точки с максимальным отклонением ветки от прямой AB ; p'_1, p'_2, p'_3 – основания перпендикуляров из этих точек

В качестве меры точности представления ветки остова при помощи отрезка, соединяющего ее концы, введем величину

$$\sigma = \frac{\bar{\Delta}}{|L|},$$

где $|L| = N$ – длина ветки.

Если $\sigma < \varepsilon$, где ε – некоторое пороговое значение, приближение считаем удовлетворительным, в противном случае – разбиваем ветку L на две в точке с максимальным отклонением Δ (на рис.7 точка p_1). Процесс продолжаем до достижения заданной точности приближения ε . Другим критерием окончания процесса может быть ограничение на минимальную длину ветки.

В рассмотренных автором случаях ε принималось равным 0,05, минимальная длина ветки – 7% от общей длины линии скелета для скелетов, содержащих более 100 точек, и 20% для скелетов меньшей длины. Для хранения ветвей, представленных указанным образом, достаточно двух точек – начальной и конечной. Промежуточные точки ветки могут быть удалены из памяти ПК.

Ввиду того, что элементы дисперсных образований являются выпуклыми фигурами, короткие ветки скелета, как правило, порождаются шумами на границе и соответствуют даже незначительным ее особенностям. В этом случае целесообразно исключать из структуры остова ветки, длина которых менее заданного порогового значения.

При анализе агрегированных объектов удобным является такое представление скелета, при котором ветки упорядочены соответственно продвижению от периферии агрегата к центру, т.е. в порядке, обратном налипанию частиц, что делает менее трудоемким процесс декомпозиции агрегата путем последовательного отделения от него объектов. Для этого перебираем ветви скелета и переносим в другую структуру те ветки, у которых хотя бы один

из узлов является тупиковым, удаляя их из исходной структуры скелета. С учетом этого в исходной структуре корректируем значения функции B для оставшихся узлов, после чего процедуру повторяем для оставшихся ветвей. Порядок размещения ветвей скелета при проведении сортировки, в соответствии с указанным принципом, проиллюстрирован на рис. 8

Примеры скелетов изображений аналитических фигур, построенных рассмотренным методом, приведены на рис. 9, а реальных дисперсных образований – капель эмульсии второго рода (вода в масле) – на рис. 10. Как видно, построенные остовы представляют собой связные структуры толщиной в один пиксел без излишней детализации и устойчивые к шумам границы, что особенно важно для изображений реальных объектов.

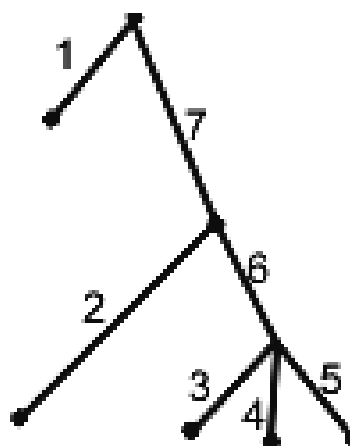


Рис. 8. Схема сортировки ветвей остова: 1–7 – порядок размещения ветвей скелета после сортировки

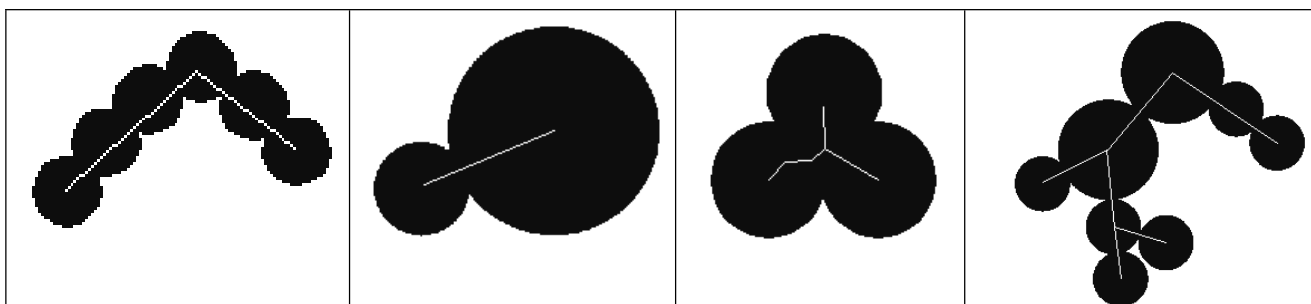


Рис. 9. Примеры скелетов аналитических объектов

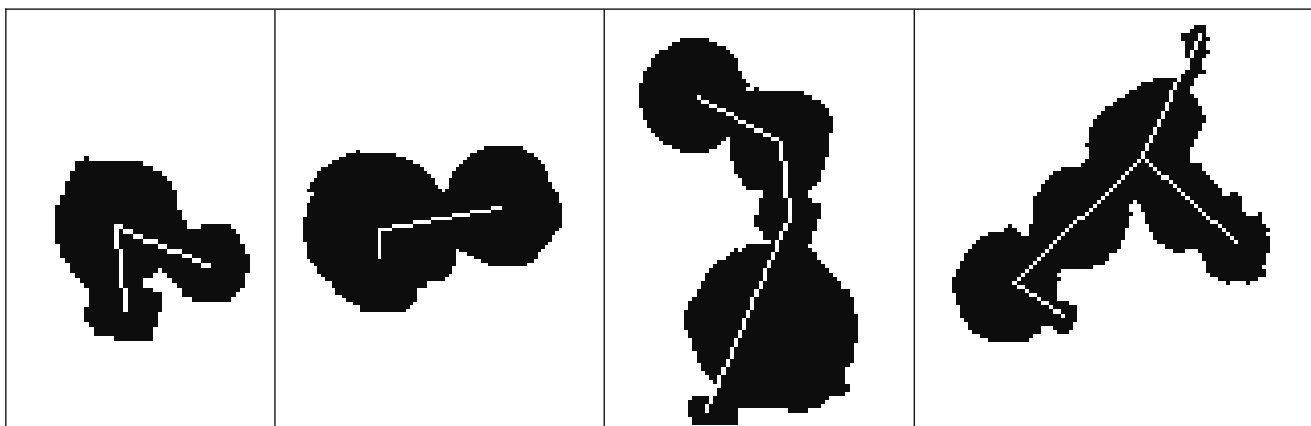


Рис. 10. Скелеты изображений реальных дисперсных образований

Выводы. Проведенный анализ публикаций, посвященных методам построения скелета изображений, позволил выделить ряд проблем в этой области. Предложенный автором метод позволяет строить скелет изображений объектов высокой степени сложности, характеризующийся отсутствием избыточных точек, устойчивый по отношению к шумам на границе объекта, позволяющий избежать нарушения связности и излишней детализации объекта.

Метод включает следующие шаги: построение базового скелета, удаление избыточной связности, нахождение опорных точек и представление скелета в виде набора веток между ними, уточнение структуры скелета с целью представления ветвей отрезками прямых, упорядочивание ветвей соответственно продвижению от периферии агрегата к центру.

Полученные результаты будут полезны при разработке методов и алгоритмов сегментации изображений.

жений сложных объектов, а также агрегированных образований.

Список литературы / References

1. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений. / Гонсалес Р., Вудс Р. – М.: Техносфера, 2005. – 1072 с.
Gonzales, R.C. and Woods, R.E., (2005), *Tsyfrovaya obrabotka izobrazheniy* [Digital Image Processing], Tekhnosfera, Moscow, Russia, 1072 p.
2. Рогов А.А. Некоторые методы классификации и поиска в электронной коллекции графических документов / Рогов А.А., Кириков П.В. // Труды 12-й Всероссийской научной конференции „Электронные библиотеки: перспективные методы и технологии, электронные коллекции“. – Казань: 2010. – С. 409–414.
Rogov, A.A. and Kirikov, P.V. (2010), “Some methods of classification and search at graphics documents electronic collection”, *Materials of 12th All-Russian Sci. Conf. “Electronic libraries: perspective methods and technologies, electronic collections”*, Kazan, Russia, pp. 409–414.
3. Ласло М. Вычислительная геометрия и компьютерная графика на C++ / Ласло М. – М.: Бинум, 1997. – 301 с.
Laszlo, M. (1997), *Vychislitel'naya geometriya i kompyuternaya grafika na C++* [Computational Geometry and Computer Graphics in C++], Binom, Moscow, Russia, 301 p.
4. Местецкий Л.М. Непрерывная морфология бинарных изображений. Фигуры, скелеты, циркуляры. / Местецкий Л.М. – М.: Физматлит, 2009. – 288 с.
Mestetskiy, L.M. (2009), *Nepreryvnaya morfologiya binarnykh izobrazheniy. Figury, skelety, tsyrkulyary* [Continuous morphology of binary images. Figures, skeletons, circular], Fizmatlit, Moscow, Russia, 288 p.
5. Batchelor, B.G. and Whelan, P.F. (1997), *Intelligent vision systems for industry*, Springer-Verlag, 457 p.
6. Темнов К.А. Алгоритм скелетизации растрового монохромного изображения / Темнов К.А., Кириллов А.В. // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2009. – №8. – С. 45–49.
Temnov K.A. and Kirillov, A.V. (2009), “Raster monochrome images thinning algorithm”, *Informatsionno-izmeritelnie i upravlayu shchie sistemy*, no.8, pp. 45–49
7. Демидович Б.П. Краткий курс высшей математики / Демидович Б.П., Кудрявцев В.А. – М.: АСТ, Астрель. – 2001. — 656 с.
Demidovich, B.P. and Kudravtsev, V.A. (2001), *Kratkiy kurs vysshey matematiki* [Short course in high mathematics], AST, Astrel, Moscow, Russia, 656 p.

Побудова кістяка є надзвичайно важливим етапом у задачах сегментації елементів дисперсних утворень. У зв'язку з чим велике значення має коректність його представлення – відповідність структурі розглянутого об'єкта і його усталеність до викривлень форми, які обумовлені шумами. Основною проблемою відомих методів є одержання недостатньо тонких (товщиною більше одного пікселя) кістяків і чутливість до шумів границі області.

Метою дослідження є створення методу побудови кістяка зображень агрегованих елементів дисперсних утворень, усталеного до шумів границі об'єкта та такого, що представляє кістяк у вигляді набору відрізків прямих ліній між вузлами розгалуження, які впорядковані відповідно до просування від зовнішніх вузлів до внутрішніх.

Запропонований метод дозволяє будувати кістяк зображень об'єктів високого ступеня складності, який характеризується відсутністю надлишкових точок, стійкий стосовно шумів на границі об'єкта, що дозволяє уникнути порушення зв'язності й зайвої деталізації об'єкта.

Метод включає наступні кроки: побудова базового кістяка на основі алгоритму Зонга-Суня, видалення надлишкової зв'язності, знаходження опорних точок і представлення кістяка у вигляді набору гілок між ними, уточнення структури кістяка з метою представлення гілок відрізками прямих, упорядкування гілок відповідно просуванню від периферії агрегату до центру.

Отримані результати будуть корисні при розробці методів і алгоритмів сегментації зображень складних об'єктів, а також агрегованих утворень.

Ключові слова: кістяк зображення, агрегат, дисперсні утворення, сегментація, зв'язність

Skeletons making is extremely important step in the problem of segmentation elements in dispersed formations. Therefore, the correctness of skeleton representation, matching the structure of examined object and skeleton rezistance to form distortion caused by noises is essential. The main problem of usual methods is receiving skeletons which are not thin enough (thickness is more then one pixel). Also, they are sensitive to boundary noises.

The purpose of the research is designing of the metod of aggregated elements in dispersed formations skeleton making resisting boundary noises and represented by a set of straight line segments between the branch nodes, sorted from external nodes to internal.

Suggested method allows to build skeletons of high complex objects. Among its advantages are the absence of unnecessary points and rezistance to boundary noises allowing to avoid continuity violation and object unnecessary refinement.

Method includes next steps: base skeleton making by Zhang-Suen method; exclusion of unnecessary details; pole determination and representation skeleton as a set of branches between poles; skelet improvement in order to represent branches as straight line segments; arranging the branches according to location relative to center.

Obtained results will be useful for designing methods and algorithms for segmentation images of complex objects and aggregated formations.

Keywords: image skeleton, aggregate, dispersed structure, segmentation, continuity

Рекомендовано до публікації докт. техн. наук В.І. Корсунюм. Дата надходження рукопису 07.09.11