

УДК 681.3

Т.А. Рузова

Днепропетровский национальный университет им. Олеся Гончара

МОДЕЛЬНЫЕ АГРЕГАТЫ ДИСПЕРСИЙ. ДЕКОМПОЗИЦИЯ ПО СТРУКТУРЕ

Запропоновано метод сегментації агрегованих елементів дисперсних утворень сферичної форми (крапель емульсій), заснований на інформації про структуру й контури агрегатів. Метод може бути використаний при розробці систем виміру й аналізу емульсій та інших мікрооб'єктів.

Ключові слова: кістяк зображення, агрегат, дисперсні утворення, сегментація, точки приєднання частинок.

Предложен метод сегментации агрегированных элементов дисперсных образований сферической формы (капель эмульсий), основанный на информации о структуре и контурах агрегатов. Метод может быть использован при разработке систем измерения и анализа эмульсий и других микрообъектов.

Ключевые слова: скелет изображения, агрегат, дисперсные образования, сегментация, точки присоединения частиц.

There is developed method for segmentation of aggregated structures of spherical particles (emulsion drops) in dispersive formations. Method is based on information of aggregates structure and contours. Method may be used to design systems for emulsions (and other micro objects) measuring and analyzing.

Key words: image skeleton, aggregate, dispersive structures, segmentation, particles connecting points.

Постановка проблеми. Развитие компьютерных технологий привело к появлению принципиально нового инструмента контроля качества диспергации – измерению микрообъектов по видеоизображениям. К основным проблемам указанного метода диагностики относится сложность сегментации изображений изучаемых объектов: низкая контрастность, неоднородность освещения и зашумленность фона, решению которых посвящены работы [1; 2].

Другой, не менее важной проблемой является наличие слипшихся

частиц – агрегированных образований, некорректная обработка которых приводит к существенному искажению результатов измерений.

Анализ последних достижений и публикаций. Известные методы решения этой задачи [3–7] основаны на анализе геометрии всей области, исследовании кривизны границы агрегата, распознавании перекрывающихся объектов на основе анализа сегментов, движущихся с разными скоростями, использовании морфологических подходов, пороговой сегментации с применением теории графов. Перечисленные подходы, как правило, приводят к излишней детализации объектов, чувствительны к шумам, задаваемым пороговым значениям, требуют значительных вычислительных затрат, вследствие чего не позволяют с достаточной точностью определить положение точек касания для агрегатов, состоящих из большого числа частиц, а также для образований, состоящих из объектов с высокой степенью перекрытия.

Постановка задачи. Целью данной работы является создание метода сегментации модельных агрегированных элементов дисперсных образований сферической формы путем определения точек их стыковки в агрегате по данным о его структуре и контуре, устойчивого к шумам изображения и позволяющего обрабатывать агрегаты сложной формы.

Основной материал. Общая схема метода для монохромного изображения выглядит следующим образом: после определения координат точек контура агрегата строится его скелет, на каждой ветке которого ищем точки присоединения капель – наиболее узкие места рассматриваемого агрегата – перешейки $Q_1^{(1)}Q_2^{(1)}$, $Q_1^{(2)}Q_2^{(2)}$, $Q_1^{(3)}Q_2^{(3)}$ на рис. 1. Для этого в каждой точке P рассматриваемой ветки скелета AB строим перпендикуляр, находим точки P_1, P_2 пересечения его с контуром агрегата. Назовем P_1P_2 – внутренним участком перпендикуляра. Так как перешейки являются наиболее узкими участками агрегата, им соответствуют перпендикуляры с наиболее короткими внутренними участками.

Но невыпуклость агрегата усложняет задачу, так как в общем случае прямая может пересекать контур невыпуклого объекта более чем в двух точках (рис. 2). В этом случае, поиск перешейков требует специальной схемы. Рассмотрим ее более подробно.

Первым шагом метода является фильтрация изображения, перевод его в монохромный режим [8]. Следующими этапами являются

определение координат точек контура агрегата [2] и построение по ним его скелета.

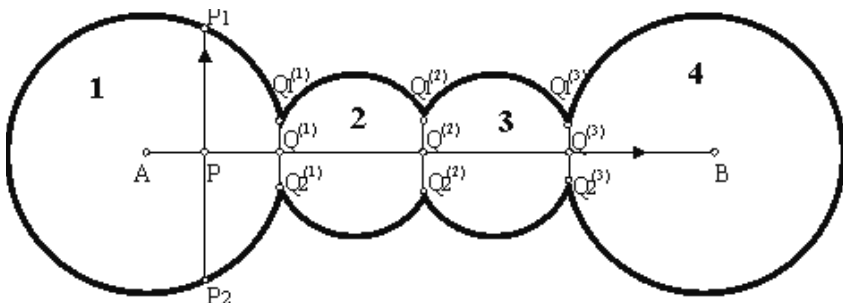


Рис. 1. Общая схема метода декомпозиции агрегатов дисперсных образований: АВ – ветка скелета; Р – произвольная точка ветки АВ; P_1 , P_2 – точки пересечения контура агрегата с перпендикуляром к АВ, проведенным в точке Р; $Q_1^{(1)}, Q_2^{(1)}, Q_1^{(2)}, Q_2^{(2)}, Q_1^{(3)}, Q_2^{(3)}$ – точки минимума функции ширины агрегата; $Q_1^{(1)}Q_2^{(1)}, Q_1^{(2)}Q_2^{(2)}, Q_1^{(3)}Q_2^{(3)}$ – точки присоединения капель

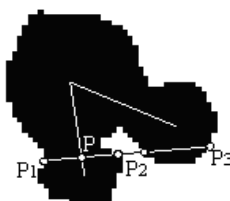


Рис. 2. Пересечение прямой контура невыпуклого объекта: Р – точка линии скелета; P_1, P_2, P_3 – точки пересечения контура агрегата с перпендикуляром к линии скелета, проведенным в точке Р

Предложенный в [9] метод позволяет построить скелет агрегата в виде набора отрезков прямых линий между узлами ветвления и 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.

Последовательно перебирая ветви скелета, анализируем их положение относительно контура агрегата следующим образом. Ввиду того, что ветви скелета, согласно [9], хранятся в виде координат их начальной и конечной точек (А и В), используем какой-либо из алгоритмов построения отрезков [10], например, алгоритм Брезенхема, для разложения рассматриваемой ветви в растр и представления ее в виде последовательности точек. В каждой точке P растеризованной ветки АВ скелета (рис. 1) строим перпендикуляр $y = kx + b$, точки P_1, P_2, \dots, P_N пересечения которого с контуром фигуры определяем, анализируя контур, из условия

$$|y - (kx + b)| \leq \varepsilon,$$

где x, y – координаты точек контура объекта.

Ввиду того, что в общем случае контур является невыпуклым $N \geq 2$. Разделим множество точек пересечения $\bar{P} = \{P_1, \dots, P_N\}$ на два подмножества \bar{P}_+ и \bar{P}_- точек, расположенных, соответственно, справа и слева относительно прямой АВ (для наблюдателя, находящегося в точке P , лицом к точке В), используя свойства векторного произведения векторов

$$\overline{PB} \times \overline{PP_i}, P_i \in \bar{P}. \quad (1)$$

Для точек, расположенных по одну сторону АВ, выражение (1) сохраняет знак, а для точек расположенных по разные стороны – меняет на противоположный. В качестве границ внутреннего участка перпендикуляра выбираем ближайшие с обеих сторон из (\bar{P}_+ и \bar{P}_-) к P точки (P_1 и P_2 на рис. 1 и 2). В случае, когда все точки пересечения перпендикуляра с контуром располагаются по одну сторону от соответствующей ветки скелета, т. е. одно из множеств точек пересечения оказывается пустым $\bar{P}_+ = \emptyset$ либо $\bar{P}_- = \emptyset$ (рис. 3) в качестве границ внутреннего участка перпендикуляра выбираем ближайшие точки из оставшегося множества. В дальнейшем, будем обозначать граничные точки внутреннего перпендикуляра в точке P как P_1 и P_2 .

Результатом этого этапа является построение для каждой точки $P^{(i)}$ ветки АВ внутреннего перпендикуляра $P_1^{(i)}P_2^{(i)}$, длина которого

$L^{(i)}$ определяет ширину отвечающего АВ участка агрегата в точке $P^{(i)}$

$$L_i = L(P^{(i)}) = |P_1^{(i)} P_2^{(i)}|.$$

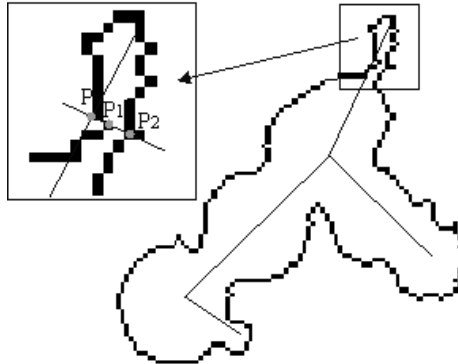


Рис. 3. Расположение граничных точек внутреннего перпендикуляра по одну сторону от ветки скелета: обозначения см. на рис.1

Места присоединения капель соответствуют локальным минимумам функции L . Назовем ее функцией ширины объекта. Постоянство функции L свидетельствует об отсутствии перешейков на рассматриваемом участке агрегата. Будем считать функцию L , определенную на отрезке АВ, постоянной, если выполняется условие

$$\text{Max}(L) - \text{Min}(L) \leq 0,1\bar{L},$$

где $\bar{L} = \frac{\sum_{i=0}^{M-1} L_i}{M}$.

Для сглаживания функции L с целью уменьшения влияния шумов контура целесообразно использовать цифровые низкочастотные фильтры. Процедуру сглаживания не целесообразно проводить при рассмотрении коротких веток скелета ($M < 50$), чтобы не допустить потери элементов рельефа контура на участках, соответствующих местам присоединения капель малого (относительно всего агрегата) размера.

Ввиду того, что значения координат точек контура в растровой графике представлены целыми числами, идущие последовательно значения функции L часто совпадают. Чтобы упростить алгоритм поиска локальных минимумов этой функции, проведем ее корректировку, линейно аппроксимируя функцию на участках, где ее значения совпадают. Так, если значения функции L совпадают на некотором участке $[k, t]$, $L(k-1) \neq L[t+1]$ ($k > 0$, $t < M-1$) аппроксимируем ее прямыми на отрезках $[i_0, i_c]$ и $[i_c, i_1]$, где $i_0 = k-1$, $i_1 = t+1$, $i_c = [(i_0 + i_1)/2]$ по схеме 1, приведенной на рис. 4, а. В случаях, когда $k=0$ или $t=M-1$ аппроксимация проводится по схеме 2, представленной на рис 4, б.

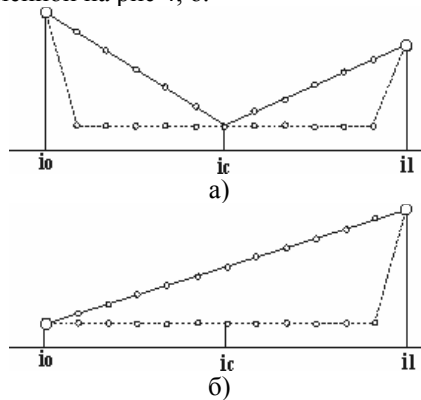


Рис. 4 Схема корректировки функции ширины объекта: а – схема 1; б – схема 2; $\circ \cdots \circ \cdots \circ$ – исходное значение функции; $\square \text{---} \square \text{---} \square$ – аппроксимированное значение функции

Точку j_0 функции L будем считать точкой перешейка, если выполняются следующие условия:

$$L_{j_0} < \bar{L}, \quad L_{j_0} < L_{j_0+i},$$

где $i = [-s/2; s/2]$; s – минимальный размер окрестности точки j_0 $\{i : L_i < L_{j_0}\}$. Значение s выбираем, исходя из величины ветки скелета.

Так,

$$\begin{aligned} M \leq 10, & \quad s = 3; \\ 10 < M \leq 50, & \quad s = 10; \\ M > 50, & \quad s = 0,2M. \end{aligned}$$

Таким образом, для рассматриваемой ветки скелета АВ получаем множество точек $Q^{(1)}, Q^{(2)} \dots Q^{(R)}$, соответствующих точкам присоединения капель (рис. 1). Внутренние перпендикуляры $Q_1^{(1)}Q_2^{(1)}$, $Q_1^{(2)}Q_2^{(2)}$, ..., $Q_1^{(R)}Q_2^{(R)}$, построенные в этих точках, разбивают отвечающий АВ участок агрегата на отдельные объекты (частицы). Граничные точки этих перпендикуляров являются точками присоединения частиц. По имеющимся точкам стыковки частиц определяем точки границы агрегата между составляющими его объектами, включая внутренние перпендикуляры в контур обеих разделяемых ими частиц. Агрегат на рис. 1 разделим следующим образом:

$$\begin{aligned} \text{объект 1: } & \cup Q_1^{(1)}Q_2^{(1)} + Q_2^{(1)}Q_1^{(1)}; \\ \text{объект 2: } & Q_1^{(1)}Q_2^{(1)} + \cup Q_2^{(1)}Q_2^{(2)} + Q_2^{(2)}Q_1^{(2)} + \cup Q_1^{(2)}Q_1^{(1)}; \\ \text{объект 3: } & Q_1^{(2)}Q_2^{(2)} + \cup Q_2^{(2)}Q_2^{(3)} + Q_2^{(3)}Q_1^{(3)} + \cup Q_1^{(3)}Q_1^{(2)}; \\ \text{объект 4: } & Q_1^{(3)}Q_2^{(3)} + \cup Q_2^{(3)}Q_1^{(3)}. \end{aligned}$$

По информации о координатах точек контурах частиц (x_n, y_n) , $n = \overline{1, N}$, составляющих агрегат, вычисляем для каждой из восстановленных частиц площадь S и периметр P. Радиус каждой частицы определяем как

$$R = (R_1 + R_2)/2,$$

где $R_1 = \sqrt{S/\pi}$, $R_2 = P/2\pi$ – радиусы окружностей, соответственно, той же площади и периметра, что и анализируемая фигура. Центр –

$$x_c = \sum_{n=0}^{N-1} x_n / N; \quad y_c = \sum_{n=0}^{N-1} y_n / N.$$

Окружности, соответствующие контурам капель, составляющих агрегат, могут быть восстановлены по известным параметрам. Таким образом, последовательно анализируем все ветки скелета агрегата.

Описанный метод разделения агрегатов проиллюстрирован на примере изображений аналитических фигур (рис. 5).

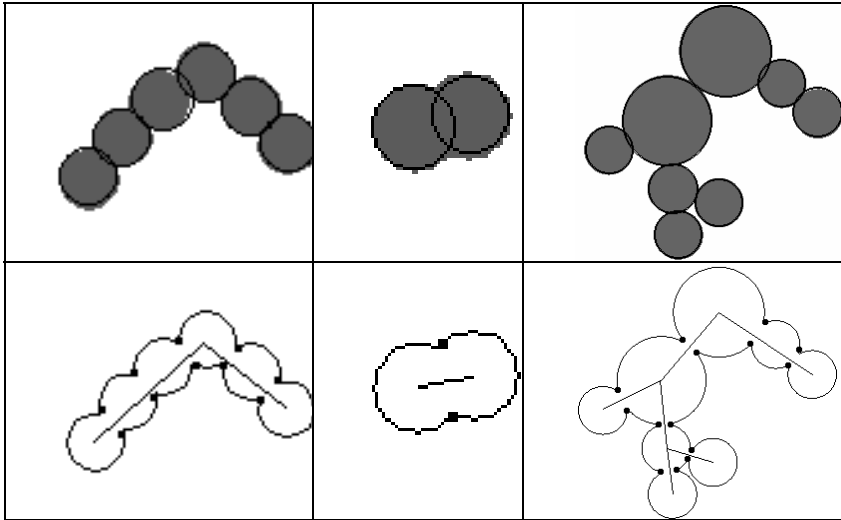


Рис. 5 Декомпозиция модельных объектов: линиями обозначены скелеты агрегатов, точками – места стыковки частиц

Выводы. В данной работе предложен метод сегментации агрегатов, состоящих из частиц сферической формы, каковыми являются, например, капли эмульсий и многих дисперсных образований. Метод основан на информации о структуре и контурах агрегатов.

Метод включает несколько этапов: фильтрация исходного изображения, перевод в монохромный режим, определение координат точек контура агрегата, построение его скелета, введение функции для каждой ветки скелета, характеризующей ширину отвечающего ей участка агрегата, определение точек присоединения частиц как точек локального минимума введенной функции.

Предложенный метод позволяет осуществлять декомпозицию агрегатов сложной конфигурации, состоящих из большого числа частиц сферической формы. Метод может быть использован при

разработке систем измерения и анализа эмульсий и других микрообъектов.

Библиографические ссылки

1. **Гонсалес Р.** Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс. – М., 2005. – 1072 с.
2. **Рузова Т. А.** Оперативный контроль параметров частиц дисперсных образований / Т. А. Рузова, О. Н. Карпов, Л. А. Флеер // *Наук. вісник Нац. Гірнич. ун-ту.* – 2004. – № 2. – С. 83–88.
3. **Honkanen M.** Analysis of the overlapping images of irregularly-shaped particles, bubbles and droplets / M. Honkanen // *International Conference on Multiphase Flow.* – Leipzig, 2007. – P. 370–382.
4. **Kutalik Z.** Occluding convex image segmentation for e.coli microscopy images / Z. Kutalik, M. Razaz, J. Baranyi // *XII European Signal Processing Conference EUSIPCO.* – Viena, 2004. – P. 937–940.
5. **Ritter N.** Segmentation and Border Identification of Cells in Images of Peripheral Blood Smear Slides / N. Ritter, J. Cooper // *Proceedings of the Thirtieth Australasian Computer Science Conference (ACSC2007).* – Ballarat, – 2007. – P. 161–169
6. **Young C.N.** A Method to Anchor Displacement Vectors to Reduce Uncertainty and Improve Particle Image Velocimetry Results / C.N.Young, D.A. Johnson, E.J. Weckman // *Measurement Science and Technology.* – 2004. – Vol. 15.– P. 9-20.
7. Unsupervised morphological segmentation of objects in contact / E. Martínez, X. Jové, F. Torre, E. Santamaría E. // *Seizieme colloque Grets.* – Grenoble, 1997. – P. 1379–1382.
8. **Рузова Т. А.** Модель пороговой классификации видеоизображений дисперсных образований // *Зб. наук. праць НГУ.* – 2007. – С. 162–167.
9. **Рузова Т.А.** Построение скелетов изображений агрегированных объектов дисперсий// *Наук. вісник Нац. Гірнич.ун-ту.* – 2012. – № 1. – С. 107–112.
10. Алгоритмические основы растровой машинной графики / Д.В. Иванов, А.С. Карпов, Е.П. Кузьмин, В.С. Лемпицкий и др. – Интернет-университет Информационных Технологий / Бином. Лаборатория Знаний. – 2007.– С. 283.

Надійшла до редколегії 20.06.2012