

УДК 681.3

Т.А. Рузова

Днепропетровский национальный университет, Украина,
49010, Украина, м. Дніпропетровськ, пр. Гагаріна, 72, E-mail: ruzov1973@bk.ru

СЕГМЕНТАЦИЯ АГРЕГАТОВ СФЕРИЧЕСКИХ ЧАСТИЦ ПО ИХ ИЗОБРАЖЕНИЯМ

Предложено усовершенствование алгоритма разделения агрегатов сферических частиц по данным об их общем контуре. Алгоритм основан на введении информационной функции, выражающей степень отклонения контура агрегата от контура его выпуклой оболочки. Предложен алгоритм определения точек стыковки частиц. Введен критерий целесообразности разделения контура объекта. Результаты исследований могут быть использованы при разработке систем компьютерного анализа дисперсных сред.

МИКРОЧАСТИЦЫ, АГРЕГАТ, ВЫПУКЛАЯ ОБОЛОЧКА, НЕСФЕРИЧНОСТЬ, ДИСПЕРСНАЯ СРЕДА.

ВВЕДЕНИЕ

Появление новых отраслей промышленности, основанных на развитии наукоемких технологий, нанотехнологий требует дальнейшей интенсификации научных исследований, направленных на совершенствование методов работы с микрообъектами, их анализ и измерение. Измельчение объектов – диспергирование используется во многих отраслях промышленности: в металлургии, топливно-энергетической сфере, химической и пищевой промышленности, сельском хозяйстве [1, 2]. Процесс приготовления дисперсий является существенным, а часто и определяющим звеном многих технологий, в связи с чем особенно важным является разработка современных методов контроля их качества.

Появление комплексного научного подхода к проблеме изучения микрочастиц стало возможным в связи с развитием компьютерной техники, совершенствованием методологии изучения микрообъектов по их увеличенным изображениям [3-5].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Основной проблемой при анализе фотографий микрочастиц является сегментация, сложность которой обусловлена зашумленностью фона, неоднородностью освещения объектов, тенями и бликами на поверхности. Решению этой проблемы посвящено большое количество публикаций [6, 7]. Существенно усложняет процесс сегментации наличие большого числа слипшихся частиц. Будучи интерпретированным как одна частица, такой агрегат приводит к значительным ошибкам в анализе, поэтому создание метода сегментации, учитывающего указанную специфику микрофотографий дисперсных образований, является предметом многочисленных исследований. Большинство ранних работ в этой области ориентированы на разделение перекрывающихся хромосом [8]. Методы [9-12] основаны на скелетизации и других морфологических алгоритмах, анализе кривизны контуров объектов. Ввиду того, что рассматриваемые автором объекты – капли эмульсий – сферичны (имеются жесткие требования к форме объекта при возможном варьировании размера в широком диапазоне 5 – 20 мкм), эти методы могут быть существенно оптимизированы.

Зашумленность изображений дисперсных сред, наличие на них объектов, представленных небольшим числом пикселей, может приводить к значительному искажению измеряе-

мых параметров. Поэтому целью работы является разработка на основе упомянутых исследований алгоритма сегментации агрегированных элементов дисперсных образований сферической формы с учетом зашумленности изображения.

МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ

В основу сегментации положен анализ меры выпуклости исследуемого объекта – степени его отклонения от границ его выпуклой оболочки. Выпуклые оболочки используются при решении многих практических задач обработки изображений, распознавания образов, задач раскроя материалов.

Первым шагом алгоритма является фильтрация изображения, перевод его в монохромный режим [4, 7].

Вторым этапом является определение координат точек контура [13].

Следующим шагом является построение выпуклой оболочки по списку координат контура объекта. Предлагаемый алгоритм деления агрегатов сферических частиц основан на алгоритме Грэхема [14], суть которого состоит в просмотре упорядоченной последовательности точек границы объекта и удалении внутренних точек.

Затем осуществляется построение информационного поля исследуемого объекта. В [12] введено понятие меры выпуклости объекта

$$I = \max\{d(z, bcI)/z \in bI\}, \quad (1)$$

где $d(x_1, x_2)$ – Евклидово расстояние между двумя точками; bI – множество точек границы объекта; bcI – ближайшая точка границы выпуклой оболочки.

На основе введенной меры выпуклости, в [12] предложено заменять рассматриваемый объект полутоновым информационным образом, в котором интенсивность каждого пиксела, представляющего объект, равна значению меры выпуклости объекта в данной точке – разности расстояний от рассматриваемой точки B до границы выпуклой оболочки и до границы объекта $|BC'| - |BC|$. После чего предлагается трассировать полученный образ, принимая во внимание тот факт, что в точке P , лежащей на линии PP' излома контура (линии стыковки частиц), исследуемая величина больше, чем в любой другой точке, лежащей на перпендикуляре BB' к прямой PP' , проходящем через точку P (рис. 1). Информационный образ агрегата, состоящего из двух пересекающихся кругов, представлен на рис. 2.

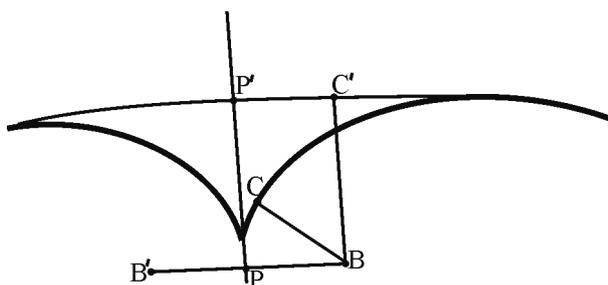


Рис. 1. Схема построения информационного образа агрегата по его площади

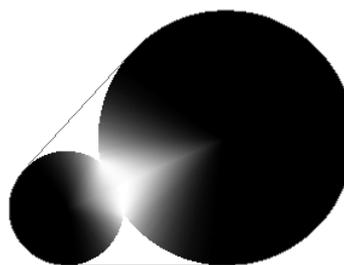


Рис. 2. Пример информационного образа агрегата

Однако такой подход является достаточно трудоемким ввиду необходимости построения информационной структуры, описывающей каждый пиксел объекта, что существенно затрудняет обработку больших изображений, содержащих множество фигур, и, кроме того, дискретность растровой графики вносит погрешность в результаты расчетов, что приводит к ошибкам трассировки. В связи с этим представляется целесообразным построение информационного поля объекта по данным о его контуре. На основании (1) введем информационную функцию объекта:

$$I(z) = d(z, bcI) / z \in bI. \quad (2)$$

Для каждой точки контура B вычисляем величину, равную кратчайшему расстоянию от нее до контура оболочки – величину $|BB'|$ (рис. 3). Таким образом, получаем одномерную информационную функцию, значение которой $|BB'|$ будет максимальным в точке B_1 излома контура, точке, где контур наиболее отклоняется от контура оболочки. И, напротив, значение будет равным нулю на участках контура, совпадающих с контуром оболочки (точка B_2). Таким образом, введенная информационная функция (2) выражает степень отклонения контура объекта в каждой точке от контура его выпуклой оболочки – степень выпуклости контура.

В простейшем случае соединения двух сферических частиц линия, соединяющая точки с наибольшим значением информационной функции, является линией стыковки частиц. Однако на практике слипшиеся объекты, как правило, образуют сложные структуры, часто несимметрично располагающиеся внутри выпуклой оболочки (рис. 4).

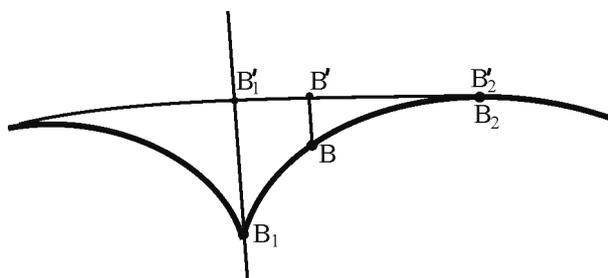


Рис. 3. Схема построения информационной функции агрегата по его контуру

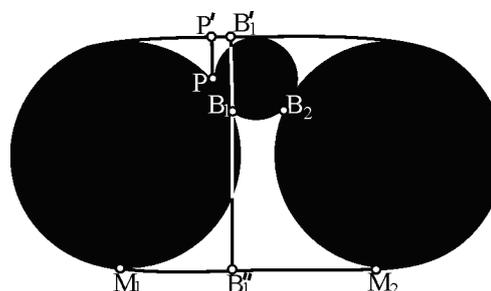


Рис. 4. Схема построения информационного образа агрегата по его контуру

В этом случае возможно неправильное вычисление информационной функции в некоторых точках контура. Так, мера выпуклости объекта, изображенного на рис. 4, в точке P будет равна величине отрезка PP' , а в точке B_1 – B_1B_1' , что не является корректным, так как вогнутый участок $M_1B_1B_2M_2$ контура объекта опирается на участок M_1M_2 контура выпуклой оболочки ($M_1B_1B_2M_2$ может быть получен из M_1M_2 путем его деформирования). Таким образом, для корректного определения меры выпуклости контура объекта (2) необходимо для каждого участка контура, несовпадающего с контуром выпуклой оболочки, определить соответствующий ему опорный участок контура выпуклой оболочки, т.е. такой участок, который может быть преобразован в рассматриваемый участок контура путем непрерывных деформаций. Тогда значение функции (2) в каждой точке контура будем определять как расстояние до участка контура выпуклой оболочки, на который опирается содержащий эту точку участок контура. Таким образом $I(B_1) = |B_1B_1''|$.

При обходе контура поставим в соответствие каждой точке ее порядковый номер n ($n = \overline{0, N}$, где $N+1$ – общее число точек контура объекта) и представим информационную функцию функцией аргумента n . $I(n)$, заданную таким образом, можно представить в виде графика. В силу дискретности объектов растровой графики представляется целесообразным провести сглаживание функции.

Автором использовался фильтр скользящего среднего с окном усреднения $(n-10, n+10)$ для каждой точки n . На рис. 5 и 6 представлены тестовая фигура и ее отфильтрованная информационная функция.

Для нахождения максимумов этой функции, соответствующих точкам присоединения капель, вычисляем производную dI/dn (рис. 6). Максимумы находим из одновременного выполнения условий:

$$I'(n) > 0$$

$$I'(n+1) < 0$$

$$I(n) > 0.2 \text{ Max}(I(n)), \quad n = \overline{1, N}.$$

Точкам стыковки B_1 и B_2 частиц, изображенных на рис. 5, соответствуют максимумы информационной функции на графике 6, помеченные соответственно. B_0 – начальная точка обхода контура.

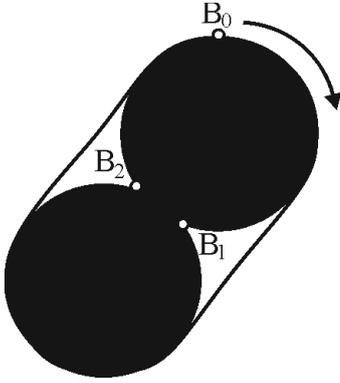


Рис. 5. Тестовый объект

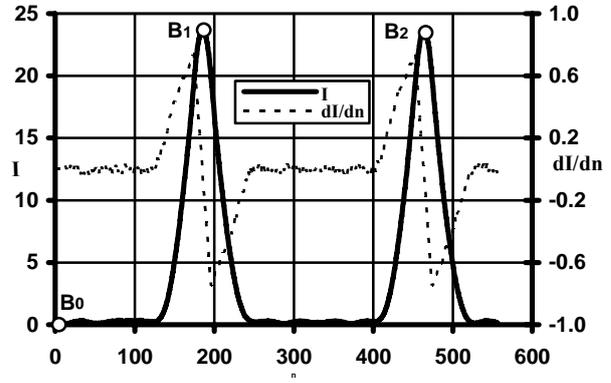


Рис. 6. Информационная функция объекта на рис. 5

Определив точки стыковки объектов, распределяем точки границы агрегата между двумя объектами (рис. 7 а,б), включая отрезок B_1B_2 в контур обоих объектов. Так, агрегат, изображенный на рис. 7а, будет разделен на два объекта следующим образом:

объект 1 – $B_0B_1 + B_1B_2 + B_2B_0$;

объект 2 – $B_2B_3 + B_3B_1 + B_1B_2$.

При этом нужно учесть, что если ориентация контура первого объекта совпадает с ориентацией контура агрегата, то контур второго объекта меняет ее на противоположную. Так контур частицы 2 на рис. 7 обходится в противоположном направлении.

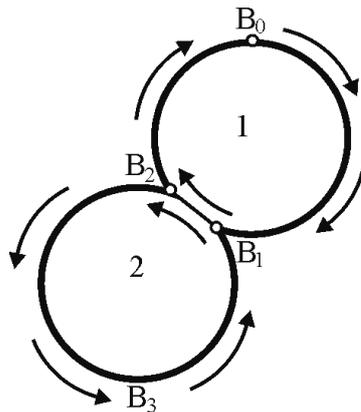


Рис. 7. Разделение контура агрегата

Для того, чтобы восстановить первоначальное направление обхода, что необходимо для стабильной работы алгоритма, назначаем левую верхнюю точку контура второго объекта начальной – B_0 . Проверяем выполнение условия $x_{n+1} > x_n$, $n = \overline{0, N-1}$. Если это условие не выполняется – инвертируем контур.

Для того чтобы определить, является ли автоматически выделенный объект агрегатом или отдельной частицей необходим критерий, определяющий целесообразность разделения контура. В основу такого критерия можно положить информацию о сферичности капель. Введем коэффициент несферичности объекта следующим образом:

$$Asp = \frac{R_1}{R_2}, \quad (3)$$

где $R_1 = \sqrt{S/\pi}$, $R_2 = P/2\pi$ – радиусы окружностей, соответственно, той же площади и периметра, что и анализируемая фигура. Для круга, представленного посредством растровой, графики $Asp \rightarrow 1$. В данном исследовании объект считался имеющим форму шара, если условие $Asp = 1$ выполнялось с погрешностью, не превышающей 10%.

В случае соединения не двух, а большего числа частиц в цепочку (рис. 8), точек максимума информационной функции контура будет больше двух.

Учитывая, что число слипшихся частиц наперед неизвестно, будем определять объекты поочередно, начиная с того, который первым встречается при обходе контура. Для этого из множества точек максимума информационной функции (рис. 9) возьмем первую (B_1) и последнюю (B_4), что соответствует точкам присоединения частицы 1 к агрегату.

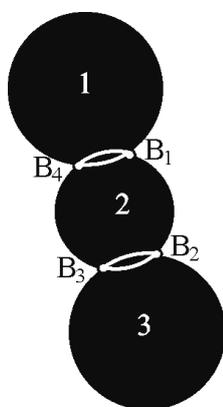


Рис. 8. Агрегат, состоящий из трех частиц

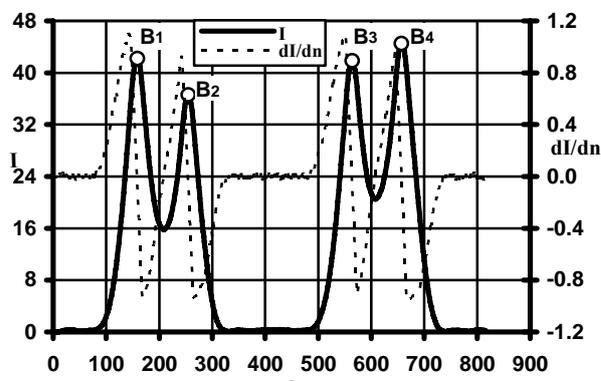


Рис. 9. Информационная функция объекта на рис. 8

После чего проводим отделение объекта 1 посредством выполнения описанной выше процедуры распределения точек контура между объектом 1 и оставшейся части агрегата, состоящей из объектов 2 и 3. После отделения первого объекта проводим проверку оставшейся части агрегата на сферичность и, если условие сферичности выполняется, то оставшаяся часть агрегата тоже представляет собой одиночную частицу. На этом процесс разделения заканчивается. В противном случае вся описанная процедура повторяется. График информационной функции оставшейся части агрегата аналогичен графику, приведенному на рис. 6.

Таким образом, из вычисленного коэффициента несферичности для каждого из идентифицированных объектов агрегата известны радиус и центр

$$R = (R_1 + R_2)/2; \quad x_c = \sum_{n=0}^N x_n / (N+1); \quad y_c = \sum_{n=0}^N y_n / (N+1).$$

Окружности, соответствующие контурам капель, составляющих агрегат, могут быть восстановлены по известным параметрам.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ существующих методов обработки изображений дисперсных сред позволил выделить комплекс проблем, связанных с сегментацией микрочастиц. Наиболее сложной среди них является задача разделения слипшихся частиц, которая до сих пор не имеет универсального решения. Автором предложено усовершенствование алгоритма разделения агрегатов

сферических частиц по данным об их общем контуре.

Алгоритм включает следующие шаги: фильтрацию изображения, определение контура объекта, построение выпуклой оболочки агрегата, вычисление информационной функции контура, определение точек стыковки слипшихся капель и разделение их контуров, определение центров и радиусов частиц, составляющих агрегат.

Предложенный алгоритм может быть использован при разработке систем компьютерного анализа эмульсий и других дисперсных сред, состоящих из сферических частиц.

Полученные результаты имеют большое значение при разработке эмульгаторов, так как предоставляют возможность оценивать их характеристики по дисперсности производимой эмульсии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Шестаков С.Д.** Кавитационный реактор как средство приготовления и стабилизации эмульсий для хлебопекарной промышленности // *Хранение и переработка сельскохозяйственного сырья.* – 2003. – №3. – С. 40-44.
2. **Глуценко В.Н.** Обратные эмульсии и суспензии в нефтегазовой промышленности. – М.: Интерконтакт, 2008. – 725 с.
3. **Singh V., Marinescu D.C., Baker T.S.** Image segmentation for automatic particle identification in electron micrographs based on hidden Markov random field models and expectation maximization // *Journal of Structural Biology.* – 2004. – №145. – P. 123-141.
4. **Рузова Т.А.** Обработка видеоизображений микрообъектов методом иррегулярных пирамид // *Обогащение полезных ископаемых: Научн.-техн. сб.– Днепропетровск, 2007.– Вып. 31 (72).* – С. 86– 92.
5. **Adjouadi M., Fernandez N.** An orientation-independent imaging technique for the classification of blood cells // *Particle & Particle Systems Characterization.* –2001. – №18(2). P 91–98.
6. **Loo P.K., Tan C.L.** Using Irregular Pyramid for Text segmentation and Binarization of Gray Scale images // *Proceedings of the 7th International Conference on Document Analysis and Recognition.* – 2003. – Vol. 1. – P. 594-598.
7. **Рузова Т.А.** Модель пороговой классификации видеоизображений дисперсных образований // *Збірник наукових праць НГУ. – Дніпропетровськ: РВК НГУ, 2007. – С. 162–167.*
8. **Charters G., Graham J.** Disentangling chromosome overlaps by combining trainable shape models with classification evidence // *IEEE Transactions on Signal Processing.* – 2002. – Vol 50. – P. 2080–2086.
9. **Martínez E., Jové X.** Unsupervised morphological segmentation of objects in contact // *Seizieme colloque Gretsi. – Grenoble. – 1997. – P. 1379–1382.*
10. **Honkanen M.** Analysis of the overlapping images of irregularly-shaped particles, bubbles and droplets // *International Conference on Multiphase Flow. – Leipzig.– 2007. – P. 370–382.*
11. **Honkanen M.** PTV metod for overlapping bubble images // *Fachtagung “Laser methoden in der Strömungsmesstechnik”. – Karlsruhe. – 2004. – P. 533–570.*
12. **Kutalik Z. Razaz M.** Occluding convex image segmentation for e.coli microscopy images // *XII European Signal Processing Conference EUSIPCO. – 2004. – P. 937–940.*
13. **Рузова Т. А., Карпов О.Н., Флеер Л.А.** Оперативный контроль параметров частиц дисперсных образований // *Науковий вісник НГУ.– 2004. – № 2. - С. 83-88.*
14. **Graham R.L.** An efficient algorithm for determining the convex hull of finite planar set // *Information Processing Letters.* – 1:132-133. – 1972.

T.A. Ruzova

*Dnepropetrovsk national university, Ukraine,
49010, Ukraine, Dnepropetrovsk, Gagarin av., 72, E-mail: ruzov1973@bk.ru*

SEGMENTATION OF SPHERICAL PARTICLES AGGREGATES BY THE IMAGES

The article deals with algorithm improvement for spherical particles aggregates separation by information of their common outline. Algorithm is based on designing information function to evaluate deviation between contour aggregate and convex hull contour. There is developed algorithm for evaluation connecting points of particles. There is proposed criteria of object's contour partition suitability. The results of researches may be used to develop the software for dispersive environments analysis.

MICROPARTICLE, AGGREGATE, CONVEX HULL, NONSPHERICITY, DISPERSIVE ENVIRONMENT.