

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ, СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ ТА КЕРУВАННЯ

УДК 681.3

Т.А. Рузова, канд. техн. наук,
А.П. Толстопят, канд. техн. наук, ст. научн. сотр.,
В.И. Елисеєв, канд. физ.-мат. наук, ст. научн.
сотр.,
Л.А. Флеєр

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

ДЕКОМПОЗИЦИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ АГРЕГИРОВАННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДИСПЕРСНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ ПО ИХ СТРУКТУРЕ

Т.А. Ruzova, Cand. Sci. (Tech.),
Т.А. Tolstopyat, Cand. Sci. (Tech.), Senior Research
Fellow,
V.I. Yeliseyev, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Senior Re-
search Fellow,
L.A. Fleer

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

DECOMPOSITION OF IMAGES OF AGGREGATED ELEMENTS IN DISPERSIVE FORMATIONS BY THEIR STRUCTURE

К основным проблемам измерения микрообъектов по видеоизображениям относятся низкая контрастность, неоднородность освещения и „зашумленность“ фона, а также наличие агрегированных образований, некорректная обработка которых приводит к существенному искажению результатов измерений.

Цель. Создание метода сегментации агрегированных элементов дисперсных образований сферической формы (капель эмульсий), устойчивого к „шумам“ изображения и позволяющего обрабатывать агрегаты сложной формы.

Методика. Метод включает несколько этапов: фильтрация исходного изображения, перевод в монохромный режим, определение координат точек контура агрегата, построение его скелета на основе алгоритма Зонга-Суня. Точки присоединения капель определяются как наиболее узкие места рассматриваемого агрегата (перешейки). Для их нахождения на каждой ветке скелета предложено введение функции, характеризующей ширину отвечающего ей участка агрегата в данной точке. Точки присоединения частиц определяются как точки локального минимума введенной функции. Для сглаживания указанной функции, с целью уменьшения влияния „шумов“ контура, используются цифровые низкочастотные фильтры. Разработан метод корректировки введенной функции с целью сглаживания погрешностей растрового представления контура объекта.

Работа метода проиллюстрирована как на модельных изображениях, так и на фрагментах изображений реальных эмульсий второго рода (вода в масле).

Результаты. Предложен метод, который позволяет осуществлять декомпозицию агрегатов сложной конфигурации, состоящих из большого числа частиц сферической формы.

Научная новизна. Предложен метод сегментации агрегатов, основанный на информации о структуре и контурах агрегатов.

Практическая значимость. Метод может быть использован при разработке систем измерения и анализа эмульсий, а также других микрообъектов.

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

Введение. В настоящее время диспергирование является основной частью многих технологических процессов в таких отраслях как энергетика (подготовка

топлива), химическая, металлургическая промышленность, разработка новых материалов (нанотехнологии) и других. Развитие компьютерных технологий привело к появлению принципиально нового инструмента контроля качества диспергации – измерению микро-

объектов по видеоизображениям. К основным проблемам указанного метода диагностики относится сложность сегментации изображений изучаемых объектов: низкая контрастность, неоднородность освещения и зашумленность фона, решению которых посвящен ряд работ [1–4]. Другой, не менее важной проблемой является наличие слипшихся частиц – агрегированных образований, некорректная обработка которых приводит к существенному искажению результатов измерений. Ключевым моментом декомпозиции агрегированных объектов, в частности капель эмульсий, является поиск точек их стыковки.

Постановка задачи. Известные методы решения этой задачи [5–7] 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.

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

Методы решения. 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.

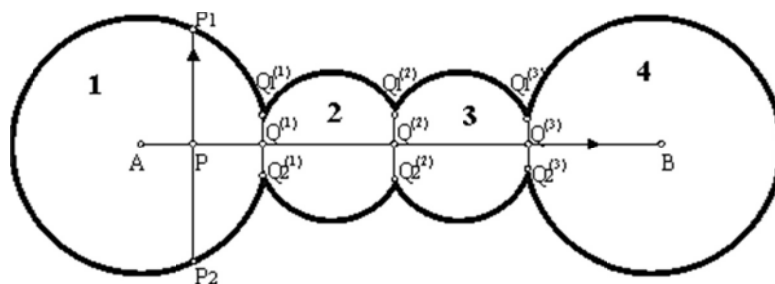


Рис. 1. Общая схема метода декомпозиции агрегатов дисперсных образований: AB – ветка скелета; P – произвольная точка ветки AB ; P_1 , P_2 – точки пересечения контура агрегата с перпендикуляром к AB , проведенным в точке P ; $Q_1^{(1)}, Q_2^{(1)}, Q_1^{(2)}, Q_2^{(2)}, Q_1^{(3)}, Q_2^{(3)}$ – точки минимума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

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 и построение по ним его скелета (рис. 3).

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-Суны, удаление избыточной связности, нахождение опорных точек и представление скелета в виде набора веток между ними, уточнение структуры скелета с це-

лью представления ветвей отрезками прямых, упорядочивание ветвей, соответственно, продвижению от периферии агрегата к центру.



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

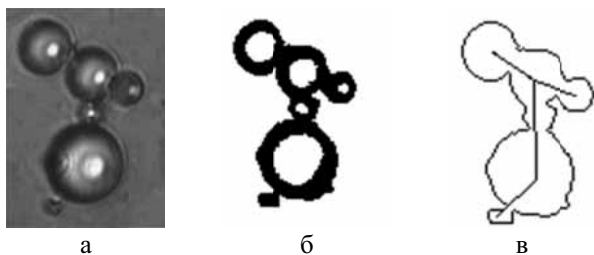


Рис. 3. Первичная обработка изображения водомасляной эмульсии: а – исходное изображение; б – перевод в монохромный режим; в – выделение контура агрегата, построение скелета

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 (A и B), используем какой-либо из алгоритмов построения отрезков, например алгоритм Брезенхема, для разложения рассматриваемой ветви в растр и представления ее в виде последовательности точек.

В каждой точке P растеризованной ветки AB 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 AB (для наблюдателя, находящегося в точке P , лицом к точке B), используя свойства векторного произведения векторов

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

Для точек, расположенных по одну сторону AB , выражение (1) сохраняет знак, а для точек, расположенных по разные стороны – меняет знак 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. 4), 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 .

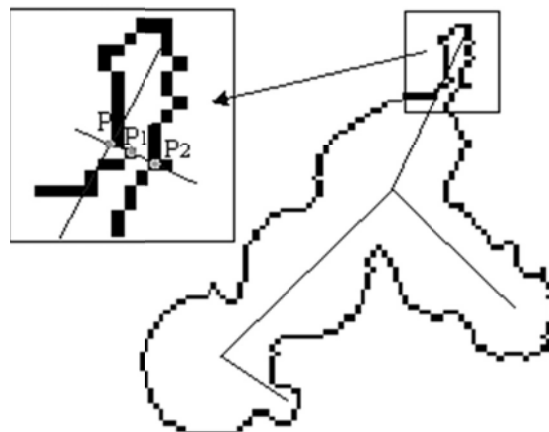


Рис. 4. Расположение граничных точек внутреннего перпендикуляра по одну сторону от ветки скелета: обозначения см. на рис. 1

Результатом этого этапа является построение для каждой точки $P^{(i)}$ ветки AB внутреннего перпендикуляра $P_1^{(i)}P_2^{(i)}$, длина которого $L^{(i)}$ определяет ширину отвечающего AB участка агрегата в точке $P^{(i)}$

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

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 AB , 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 нецелесообразно 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 $[i_c, i_l]$, где $i_0 = k-1, i_l = t+1, i_c = [(i_0 + i_l)/2]$ по схеме 1, приведенной на рис. 5, а. В случаях, когда $k=0$ или $t=M-1$, аппроксимация проводится по схеме 2, представленной на рис 5, б.

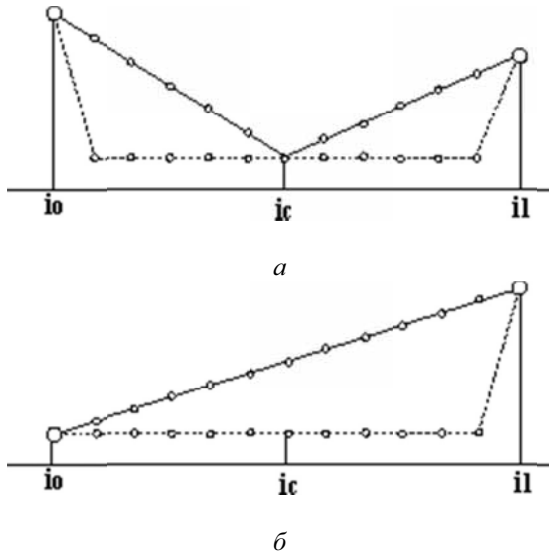


Рис. 5 Схема корректировки функции ширины объекта: а – схема 1; б – схема 2; \cdots – исходное значение функции; --- – аппроксимированное значение функции

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

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

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 AB получаем множество точек $Q^{(1)}, Q^{(2)} \dots Q^{(R)}$, соответствующих точкам присоединения капель (рис. 1). Внутренние перпендикуляры $Q_1^{(1)}Q_2^{(1)}, Q_1^{(2)}Q_2^{(2)}, \dots, Q_1^{(R)}Q_2^{(R)}$, построенные в этих точках, разбивают отвечающий AB участок агрегата на отдельные объекты (частицы). Граничные точки этих перпендикуляров являются точками присоединения частиц. По имеющимся точкам стыковки частиц распределяем точки границы агрегата между составляющими его объектами, включая внутренние перпендикуляры в контур

обеих разделяемых ими частиц. Агрегат на рис. 1 разделим следующим образом:

- объект 1: $\cup Q_1^{(1)}Q_2^{(1)} + Q_2^{(1)}Q_1^{(1)}$;
- объект 2: $Q_1^{(1)}Q_2^{(1)} + \cup Q_2^{(1)}Q_2^{(2)} + Q_2^{(2)}Q_1^{(2)} + \cup Q_1^{(2)}Q_1^{(1)}$;
- объект 3: $Q_1^{(2)}Q_2^{(2)} + \cup Q_2^{(2)}Q_2^{(3)} + Q_2^{(3)}Q_1^{(3)} + \cup Q_1^{(3)}Q_1^{(2)}$;
- объект 4: $Q_1^{(3)}Q_2^{(3)} + \cup Q_2^{(3)}Q_1^{(3)}$.

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 –

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

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. 6), а также реальных дисперсных образований – капель эмульсии второго рода (вода в масле) – рис. 7.

На рис. 8 проиллюстрирована обработка модельного агрегата, состоящего из двух сферических частиц одинакового радиуса. Как видно на рис. 8, точность декомпозиции агрегата тем выше, чем более ярко выражен перешеек, соответствующий точкам стыковки объектов. Точность разделения агрегата оценивалась как относительная погрешность определения радиусов составляющих его кругов

$$\varepsilon = \frac{|R - R'|}{R} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где R – точное значение радиуса частиц; R' – значение радиуса, определенное при декомпозиции агрегата. На рис. 9 приведена функция, выражающая зависимость точности разделения агрегата от степени перекрытия составляющих его объектов. Степень перекрытия объектов определялась как

$$D = 2 - \frac{C_1 - C_2}{R},$$

где C_1, C_2 координаты центров частиц.

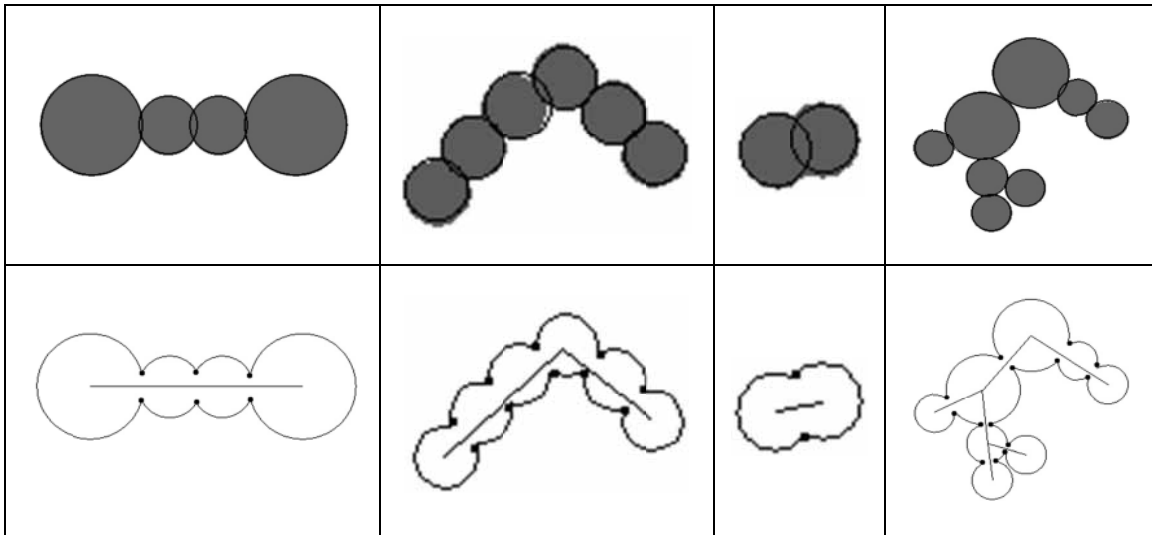


Рис. 6. Декомпозиція модельних об'єктів: лініями обозначены скелеты агрегатов, точками – точки стыковки частиц

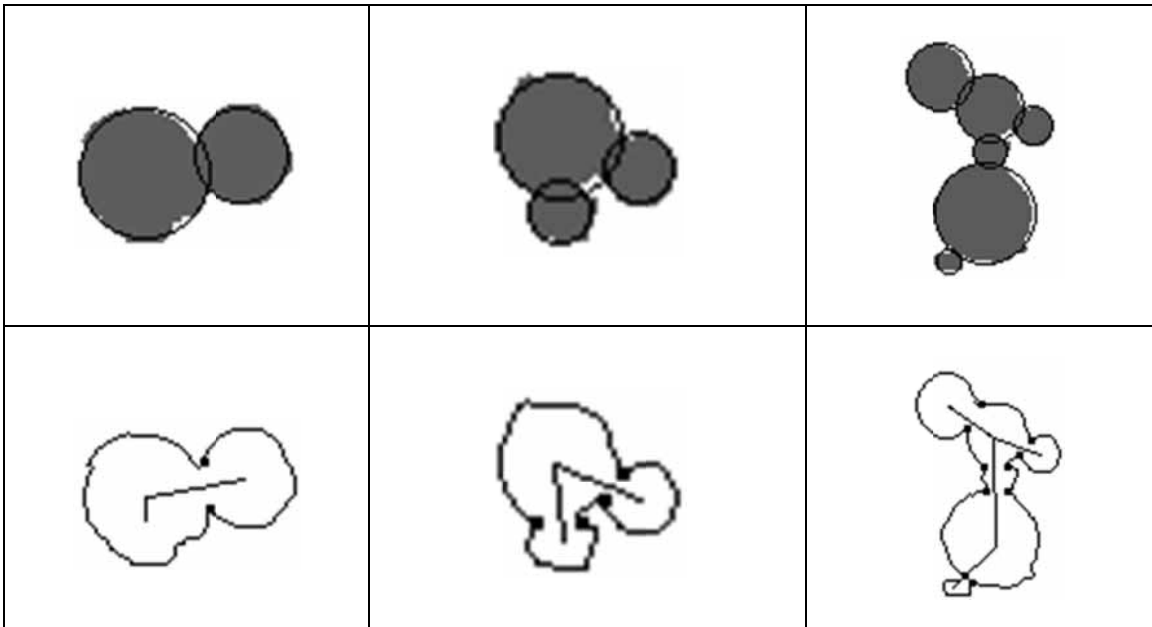


Рис. 7. Декомпозиция агрегатов реальных дисперсных образований: обозначения см. на рис. 6

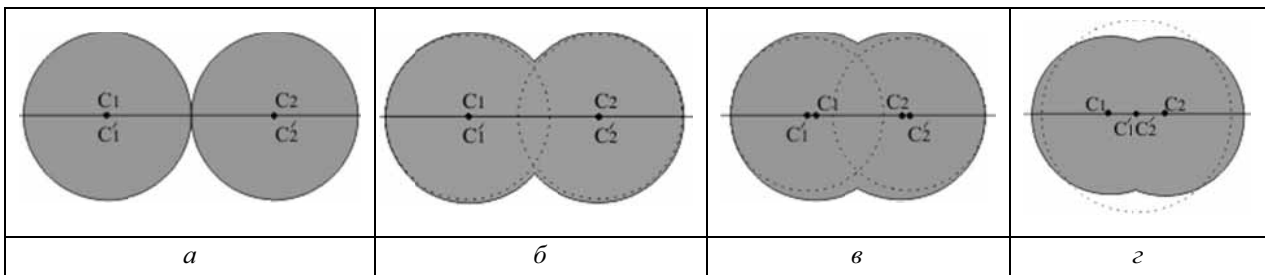


Рис. 8. Изменение перекрытия объектов модельного агрегата для оценки точности его разделения: а – $C_1C_2 = 2R, D = 0$; б – $C_1C_2 = 1,5R, D = 0,5$; в – $C_1C_2 = R, D = 1$; г – $C_1C_2 = 0,7R, D = 1,3$; C_1, C_2 – истинные центры окружностей, C_1', C_2' – центры восстановленных окружностей; R – радиус окружностей; ———— – контур агрегата; – контуры восстановленных окружностей

Как видно на рис. 9, погрешность разделения возрастает с увеличением степени перекрытия частиц. Наиболее точно ($\varepsilon = 0,2\%$) задача решается в случае касания частиц ($D = 0$). По мере сближения частиц ошибка нарастает, так как перешейки становятся менее выраженными. Так, при $D = 1,1$ $\varepsilon = 9,95\%$.

При более высокой степени перекрытия рассматриваемый агрегат, состоящий из двух частиц, идентифицируется алгоритмом как одна частица, что не соответствует реальной физической картине

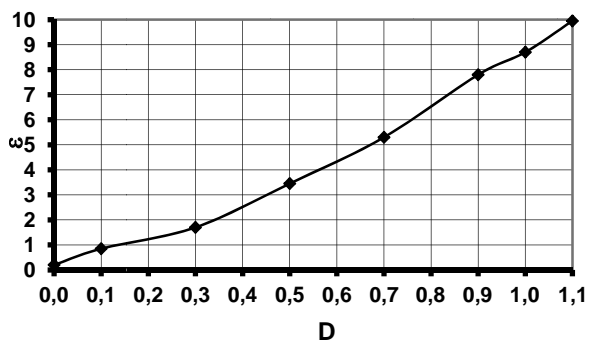


Рис. 9. Зависимость точности разделения модельного агрегата на рис. 8 от степени перекрытия составляющих его объектов

На рис. 11 проиллюстрирован результат обработки другого модельного агрегата, состоящего из двух сферических частиц, касающихся друг друга ($D = 0$), радиусы которых различны (рис. 10).

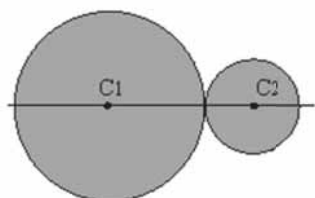


Рис. 10. Модельный агрегат, состоящий из двух сферических частиц, касающихся друг друга

На рис. 11 приведена функция, выражающая зависимость точности определения радиуса меньшей частицы (2) от соотношения радиусов частиц, составляющих агрегат

$$R' = \frac{R_1}{R_2},$$

где R_1, R_2 – радиусы частиц агрегата ($R_1 \geq R_2$) при их постоянной степени перекрытия ($D = 0$).

Как видно на рис. 11, при нулевой степени перекрытия частиц погрешность не превышает 1% при соотношении диаметров капель модельного агрегата 5:1, а при соотношении 10:1 – 3%. Полученная погрешность является удовлетворительной для оценки размеров большинства дисперсных образований, включая эмульсии типа вода – масло.

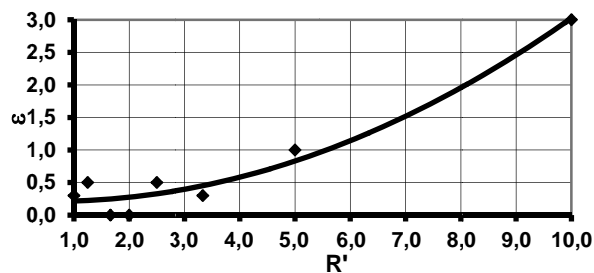


Рис. 11. Зависимость точности измерения радиуса меньшей частицы агрегата на рис. 10 от соотношения радиусов частиц ($D = 0$)

Выводы. Проведенный анализ методов и алгоритмов обработки изображений микробъектов показал, что одной из основных проблем сегментации, наряду с низкой контрастностью и зашумленностью фона, является разделение агрегированных объектов.

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.

Работа метода проиллюстрирована как на модельных изображениях, так и на фрагментах изображений реальных эмульсий второго рода (вода в масле).

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 микробъектов.

Список литературы / References

1. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс – М.: Техносфера, 2005. – 1072 с.
Gonzales, R.C. and Woods, R.E. (2008), *Digital image processing*, Upper Saddle River, Nj: Pearson Prentice Hall.
2. Singh, V., Marinescu, D.C. and Baker T.S. (2004), "Image segmentation for automatic particle identification in electron micrographs based on hidden Markov random field models and expectation maximization", *Journal of Structural Biology*, no. 145. pp. 123–141.
3. Кравцов А.А. Модифицированный рэлеевский детектор слабоконтрастных границ двумерных объектов на изображении / А.А. Кравцов, О.С. Сидоркина, Д.В. Юрин // 16-я международная конференция по компьютерной графике и ее приложениям ГрафиКон'2006. – Новосибирск: Академгородок. – 2006. – С. 351–354.

Kravtsov, A.A., Sidorkina, O.S. and Yurin, D.V. "Modified Rayleigh Detector of Low Contrast 2D Objects Boundaries on Image", *The 16th International Conference "Computer Graphics and Applications (GraphiCon'2006)"*, Akademgorodok, Novosibirsk, Russia, pp. 351–354.

4. Хисамутдинов М.В. Фильтрация изображений с целью выделения эллипсов / М.В. Хисамутдинов // Искусственный интеллект. – 2008. – № 4. – С. 429–437.

Hisamutdinov, M.V. (2008), "The filtration of images for the purpose of the isolation of ellipses", *Iskusstvenniy intellekt*, no. 4, pp. 429–437.

5. Honkanen, M. (2007), "Analysis of the overlapping images of irregularly-shaped particles, bubbles and droplets", *The International Conference on Multiphase Flow*, Leipzig, pp. 370–382.

6. Kutalik, Z., Razaz, M. and Baranyi, J. (2004), "Occluding convex image segmentation for e.coli microscopy images", *XII European Signal Processing Conference EUSIPCO*, Viena, pp. 937–940.

7. Ritter, N., and Cooper, J. (2007), "Segmentation and Border Identification of Cells in Images of Peripheral Blood Smear Slides", *Proceedings of the 30th Australasian Computer Science Conference (ACSC2007)*, Ballarat, pp. 161–169.

8. Рузова Т.А. Модель пороговой классификации видеоизображений дисперсных образований / Т.А. Рузова // Збірник наукових праць НГУ. – 2007. – С. 162–167.

Ruzova, T.A. (2007), "Thresholding model of dispersive structures videoimages", *Zbirnyk naukovykh prats NGU*, Dnipropetrovs: RVK NGU, pp. 162–167.

9. Рузова Т.А. Построение скелетов изображений агрегированных объектов дисперсий / Т.А. Рузова // Науковий вісник Національного гірничого університету. – 2012. – № 1(127). – С. 107–112.

Ruzova, T.A. (2012), "Dispersion aggregated objects images skeletonization", *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, Dnipropetrovsk, no. 1(127), pp. 107–112.

До основних проблем виміру мікрооб'єктів за відеозображеннями належать низька контрастність, неоднорідність освітлення й „зашумленість“ фону, а також наявність агрегованих утворень, некоректна обробка яких приводить до істотного перекручування результатів вимірів.

Мета. Створення методу сегментації агрегованих елементів дисперсних утворень сферичної форми (крапель емульсій), стійкого до „зашумленості“ зображення та такого, що дозволяє обробляти агрегати складної форми.

Методика. Метод включає кілька етапів: фільтрація вихідного зображення, переведення в монохромний режим, визначення координат точок контуру агрегату, побудову його кістяка на основі алгоритму Зонга-Суня. Точки приєднання крапель визначаються як найбільш вузькі місця розглянутого агрегату (перешийки). Для їх знаходження на кожній гілці кістяка запропоноване

введення функції, яка характеризує ширину ділянки агрегату, що їй відповідає, у даній точці. Точки приєднання частинок визначаються як точки локального мінімуму введеної функції. Для згладжування зазначеної функції, з метою зменшення впливу „шумів“ контуру, використовуються цифрові низькочастотні фільтри. Розроблено метод коректування введеної функції з метою згладжування похибок растрового представлення контуру об'єкта.

Робота методу проілюстрована як на модельних зображеннях, так і на фрагментах зображень реальних емульсій другого роду (вода в маслі).

Результати. Запропоновано метод, який дозволяє здійснювати декомпозицію агрегатів складної конфігурації, що складаються з великої кількості частинок сферичної форми.

Наукова новизна. Запропоновано метод сегментації агрегатів, заснований на інформації про структуру й контури агрегатів.

Практична значимість. Метод може бути використаний при розробці систем виміру й аналізу емульсій, а також інших мікрооб'єктів.

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

The main problems of the micro objects measuring by their video images are: low contrast, lack of lighting, background noisiness, and the presence of aggregated structures. The incorrect processing leads to substantial distortion of the measuring results.

Purpose. To create the method for segmentation of aggregated structures of spherical particles (emulsion drops) in dispersive formations. The method is to be resistant to image noises and to allow processing aggregates of complex shape.

Methodology. The method includes several steps: source image filtering, converting it to monochrome mode, evaluating coordinates of aggregate's boundary points, and making skeleton on the base of Zhang-Suen algorithm. The connecting points are defined as the narrowest places of examined aggregate (necks). To find connecting points, we propose to work in special function on each skeleton branch. This function characterizes the width of aggregate area corresponding to the examined branch in given point. The particles connecting points are defined as points of local minimum for mentioned function. Low-frequency filter have been used for smoothing function and decrease boundary noises influence. We have developed the method for correcting this function in order to smooth errors of object's boundary raster representation.

The effect of the method is illustrated at model images as well as at the images of real emulsion fragments (type II emulsions, water in oil).

Findings. The developed method allows realizing decomposition of complex structured aggregates, consisting of many spherical particles.

Originality. We have proposed the method for aggregates segmentation based on information of their structure and aggregates contours.

Practical value. Method may be used to design systems for emulsions (and other micro objects) measuring and analyzing.

Keywords: *image skeleton, aggregate, dispersive structures, segmentation, particles connecting points*

Рекомендовано до публікації докт. техн. наук В.І. Корсуном. Дата надходження рукопису 22.03.13.

УДК 621.72:004.724.4

**В.І. Корнієнко, д-р техн. наук, доц.,
І.Г. Гуліна, Л.В. Будкова**

Державний вищий навчальний заклад „Національний гірничий університет“, м. Дніпропетровськ, Україна,
e-mail: Budkovalv@i.ua

КОМПЛЕКСНА ОЦІНКА, ІДЕНТИФІКАЦІЯ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ СКЛАДНИХ НЕЛІНІЙНИХ ПРОЦЕСІВ

**V.I. Kornienko, Dr. Sci. (Tech.), Associate Professor,
I.G. Gulina, L.V. Budkova**

State Higher Educational Institution “National Mining University”, Dnipropetrovsk, Ukraine, e-mail: Budkovalv@i.ua

COMPLEX ESTIMATION, IDENTIFICATION AND PREDICTION OF DIFFICULT NONLINEAR PROCESSES

Мета. Підвищення точності динамічних моделей складних нелінійних процесів для розв’язання задач керування цими процесами.

Методика. Комплексна оцінка характеристик, вибір структури моделей та параметрична ідентифікація складних нелінійних процесів на прикладі технологічних процесів гірничо-металургійного виробництва та процесів в інформаційних мережах.

Результати. Розроблені прогнозуючі моделі показників процесу крупного дроблення руди та теплового стану доменного процесу, а також отримані фрактальні моделі трафіків в інформаційних мережах. Відносні похибки апроксимації та прогнозу за отриманими моделями складають від 3 до 4,6%. Підтверджена адекватність експериментальних та модельних даних.

Наукова новизна. Запропонований комплексний метод оцінки та ідентифікації складних нелінійних процесів, що включає оцінку їх характеристик на основі комплексного використання час-частотного, статистичного й фрактального аналізів, вибір структури моделі відповідно до отриманих якісних і числових значень характеристик процесу та його параметричну ідентифікацію на основі методів локальної або глобальної оптимізації, що дозволяє отримати адекватні моделі процесів підвищеної точності.

Практична значимість. Результати досліджень можуть бути застосовані при розробці алгоритмів керування складними нелінійними процесами на основі їх комплексної оцінки та ідентифікації.

Ключові слова: *оцінка, ідентифікація, модель, дроблення, тепловий стан, трафік, прогноз*

Вступ. Складні динамічні системи (процеси) мають нестационарні параметри, нелінійні залежності й стохастичні змінні, що обумовлює наявність у них різних динамічних режимів функціонування. До таких складних систем відносяться процеси рудопідготовки (дроблення та здрібнювання), доменне виробництво, інформаційні системи й мережі тощо.

Якість керування такими процесами визначається точністю їх моделей, що робить актуальною задачу оцінки, ідентифікації та прогнозування процесів.

Постановка проблеми. Ідентифікація процесу, як динамічної системи, полягає в одержанні за експериментальними даними його математичної моделі. Динамічна система зображується векторним рівнянням стану [1]

$$\dot{x} = \Phi(x, a), \quad (1)$$

де Φ – нелінійна функція розмірності d ; x і a – вектори координат і параметрів системи.

Процес у вигляді потоку (1) представляється також дискретним відображенням Пуанкаре

$$x[k+1] = \Phi\{x[k], a\}; \quad x[k] = \{x_1[k], \dots, x_{d-1}[k]\}, \quad (2)$$

де k – такт часу $t = k \cdot T$; T – період дискретизації.

Залежно від значень параметрів порядку a системи (1)-(2) мають чотири стійких рішення: стан рівноваги, коли після перехідного процесу система досягає стійкого стану; періодичне й квазіперіодичне рішення, а також хаос. Цим типам рішень відповідають атрактори системи у вигляді стійкої рівноваги,