

Методика оценки объема гранулы полимерного геля в оптической микрометрии

М.Г. Токмачев¹

¹ Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, 119991, Россия, г. Москва, ул. Ленинские горы, д.1, стр. 2

Аннотация

В работе предложен алгоритм обработки фотографии полимерной гранулы с целью определения ее объема. Исследованы факторы, влияющие на результат автоматической обработки данных в методе оптической микрометрии. Показано, что по контуру гранулы эллиптического типа алгоритм определяет ее объем с относительной погрешностью 0,4%, что соответствует ошибке определения диаметра гранулы в 1 пиксель.

Ключевые слова: обработка изображений, детектор границ, гранула полимера.

Цитирование: Токмачев, М.Г. Методика оценки объема гранулы полимерного геля в оптической микрометрии / М.Г. Токмачев // Компьютерная оптика. – 2023. – Т. 47, № 6. – С. 968-971. – DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1271.

Citation: Tokmachev MG. A method for estimating the granule volume by an optical technique. Computer Optics 2023; 47(6): 968-971. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1271.

Введение

В методе оптической микрометрии [1–2] полимерные гели используют в качестве чувствительных элементов (сенсоров), которые изменяют свою степень набухания в зависимости от свойств внешнего раствора. Таким образом, для оценки параметров раствора необходимо регистрировать объем гранулы. Определение состава анализируемого раствора данным способом можно проводить на основании как равновесных, так и кинетических данных об изменении степени набухания гранулы в анализируемом растворе. Отметим, что использование кинетических данных значительно расширяет как возможности метода, так и его чувствительность. Кроме того, используя кинетику, можно определять не только концентрацию, но и природу растворенного вещества [3–7].

Наиболее удобной формой чувствительного элемента, помещаемого в раствор, является форма шара. Она позволяет быстро и достаточно просто вычислять изменение объема элемента по фотографии.

Основной проблемой метода, препятствующей точному определению концентрации анализируемого раствора, является то, что используемые в качестве сенсоров гранулы практически никогда не имеют точной сферической формы. Чаще всего форма сенсора представляет собой эллипсоид вращения с разными значениями размеров полуосей. Для гранул более сложной формы трудоемкость вычислений и ошибка определения объема увеличивается [8].

Существуют различные методы поиска параметров эллипса на фотографии, например, преобразование Хафа [9]. Однако данный метод весьма чувствителен к качеству входных данных и не очень хорошо работает на зашумленных изображениях. При применении данного метода к нашим объектам в сред-

нем 2% изображений обрабатывались с большой ошибкой.

Применение классических методик распознавания изображений, использующих сверточные и рекуррентные нейронные сети [10], для классификации в задачах распознавания простых геометрических примитивов крайне неэффективно и требует значительных вычислительных ресурсов, особенно при больших размерах изображений или поточного видео. Как отмечено в работе [11], более правильным подходом является обработка изображения и поиск замкнутых контуров, удовлетворяющих необходимым условиям. В указанной работе предложен эффективный алгоритм поиска эллипса, который, однако, должен иметь четкие контрастные границы и незначительный угол наклона к границам изображения.

В работе [12] рассматриваются несколько алгоритмов нахождения оптимального с точки зрения метода наименьших квадратов эллипса по заданным точкам. Показано, что, если задача корректно поставлена и необходима высокая точность результата, можно искать оптимальный результат одним из градиентных методов, среди которых метод Ньютона является наиболее эффективным. Следует, однако, отметить, что наличие сторонних объектов, плохая контрастность границы целевого объекта, а также зашумленность изображения может сделать задачу некорректно поставленной.

Таким образом, в данной работе был разработан итерационный алгоритм поиска эллиптического контура гранулы, позволяющей уменьшить влияние сторонних объектов и различных паразитных точек, присутствующих на фотографии, что позволяет уменьшить погрешность оценки объема гранулы по сравнению с [5] и, как следствие, концентрации анализируемого раствора.

Методическая часть

Описание установки

Принципиальная схема метода оптической микрометрии приведена на рис. 1.



Рис. 1. Прибор для изучения набухания полимерных гелей (ПГ) методом оптической микрометрии. 1 – видеокамера, 2 – оптический микроскоп, 3 – источник света, 4 – ПК, снабженный необходимым пакетом программ

Характеристики изображений

Имеющаяся оптическая система позволяет получать фотографии размером 1600×1200 пикселей и обеспечивает разрешение около 750 пиксель/мм.

Формулировка проблемы

Точность данного метода сильно зависит от качества оптической системы микроскопа, качества снимка, полученного с фотокамеры, и возможностей программ для обработки полученных снимков. При использовании метода оптической микрометрии для анализа состава раствора изменение объема гранулы определяется по фотографиям, поэтому важным моментом является сама процедура (алгоритм) определения объема гранулы по ее плоской фотографии и определение ее ошибки.

Пример обрабатываемых фотографий

Примеры фотографий, получаемых в процессе эксперимента, приведены на рис. 2. Часто на рисунке, помимо самой гранулы, присутствуют дополнительные объекты, затрудняющие обработку. На рис. 2а внутри гранулы имеется пузырек, а на рис. 2б – прилипший к грануле волос.

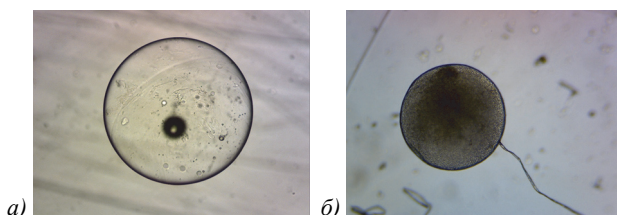


Рис. 2. Пример исходных фотографий

Алгоритм определения объема гранулы

Объем гранулы определяется по фотографии следующим образом [5, 8]:

- 1) По изображению определяется эллиптический контур гранулы (т.е. его центр и его полуоси a и b).
- 2) Объем гранулы оцениваем по формуле эллипсоида вращения, в котором третья полуось оцени-

вается как полусумма двух уже определенных: $V = 4\pi/3 \times a \times b \times (a+b)/2$.

Таким образом, основным вопросом стоит определение параметров контура гранулы.

Алгоритм поиска эллипса на фотографии

В работе используется следующий алгоритм обработки изображения:

- 1) Сначала определяем граничные точки с помощью метода Кенни [13] (Canny Edge Detection), как это рекомендовано в [11].
- 2) Ищем эллипс, описывающий контур гранулы, наилучший с точки зрения используемого функционала.

Как известно, эллипс определяется 5 параметрами – координатами центра (x_0, y_0) , величинами полуосей a и b , а также углом поворота большей полуоси относительно оси абсцисс φ . Произвольная точка эллипса удовлетворяет уравнению:

$$f(x, y) = \frac{[(x - x_0) \cos \varphi + (y - y_0) \sin \varphi]^2}{a^2} + \frac{[(x - x_0) \sin \varphi - (y - y_0) \cos \varphi]^2}{b^2} - 1 = 0.$$

Для проведения исследования использовали функционал суммы отклонений всех граничных точек от анализируемой фигуры J_1 либо функционал суммы квадратов отклонений J_2 , где:

$$J_1(x_0, y_0, a, b, \varphi) = \sum_{i=1}^N \min_{f(x,y)=0} \left(\sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2} \right),$$

$$J_2(x_0, y_0, a, b, \varphi) = \sum_{i=1}^N \min_{f(x,y)=0} \left((x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 \right).$$

Здесь N – число граничных точек.

Фигура считается наилучшей, если используемый функционал дает минимальное значение. В идеальном случае, когда граничные точки находятся только на границе некоторого эллипса, функционал будет равен нулю.

На рис. 3 приведен пример работы алгоритма определения граничных точек для исходных фотографий.

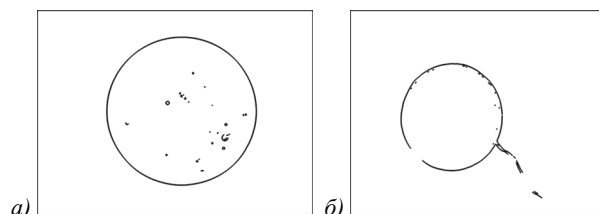


Рис. 3. Пример работы алгоритма при определении граничных точек

Помимо граничных точек гранулы, алгоритм находит также дополнительные паразитные точки, учет которых может значительно ухудшить резуль-

тат. В связи с этим использовали следующий итерационный алгоритм поиска наилучшей фигуры.

Выбор начального приближения

Как известно, итерационные алгоритмы поиска минимума функционала чувствительны к выбору начального приближения [12, 14]. В данной работе в качестве начального приближения выбирали эллипс, который определялся как результат поиска наилучшей фигуры на сжатом изображении (рис. 4). При сжатии изображения контрастность точек некоторым образом усредняется по их окружению. Таким образом, вклад отдельных паразитных точек существенно уменьшается, а роль контрастных связанных объектов растет.

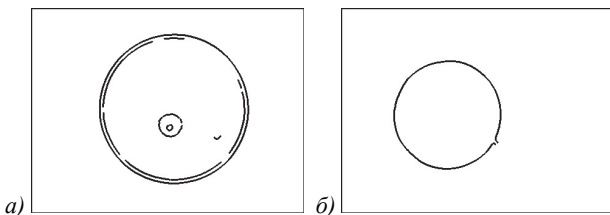


Рис. 4. Результат поиска граничных точек на сжатых изображениях

Следует также заметить, что на фотографии могут присутствовать другие объекты эллиптического вида, в частности на рис. 4а, помимо гранулы, определенная пузырек. В этом случае в процессе минимизации функционала будет найден тот эллипс, число граничных точек в котором больше.

Уменьшение размеров области поиска

После нахождения эллипса удаляли из рассмотрения граничные точки, расстояние от которых до найденного эллипса превышает некоторое значение Δ. Таким образом, в дальнейшем учитывались только граничные точки (x_i, y_i), лежащие внутри некоторого эллиптического кольца, для которых:

$$\min_{f(x,y)=0} \left(\sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2} \right) \leq \Delta.$$

После этого повторяли процедуру поиска эллипса градиентным методом [14].

Для каждой новой итерации уменьшения размеров области найденный в предыдущей итерации эллипс рассматривался в качестве начального приближения.

С увеличением номера итерации расстояние для учета остающихся граничных точек (т.е. толщина эллиптического кольца Δ) уменьшается. Таким образом, область поиска фигуры сжимается. На всех промежуточных итерациях использовали линейный функционал, а на последней итерации – среднеквадратичный.

Блок-схема алгоритма приведена на рис. 5.

Для обработки наших объектов мы использовали ровно 3 уточняющих итерации, для которых Δ₁ = 90, Δ₂ = 30, Δ₃ = 10 пикселей.

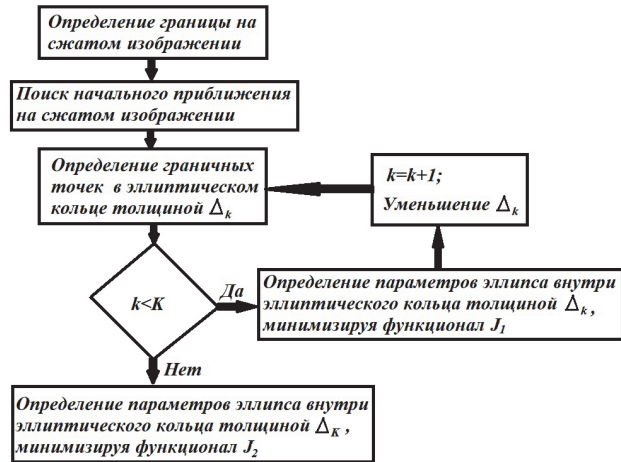


Рис. 5. Блок-схема алгоритма

Как итог, параметры гранулы определяются весьма точно. Результат работы алгоритма для приведенных на рис. 2 фотографий показан на рис. 6.

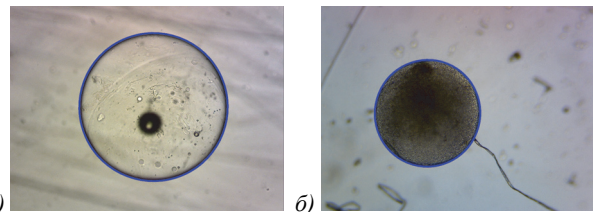


Рис. 6. Результат работы алгоритма

Определение погрешности алгоритма

Для определения приборной погрешности были проанализированы результаты фотографирования десяти подряд сделанных фотографий для пяти различных гранул, каждая из которых имеет диаметр около 1 мм (см. рис. 7). Здесь V обозначает объем гранулы, определенный по одной фотографии, а в качестве V₀ принимается средний объем гранулы, полученный после обработки 50 фотографий, при этом перед каждым измерением гранулу встряхивали, чтобы сфотографировать ее с разных сторон.

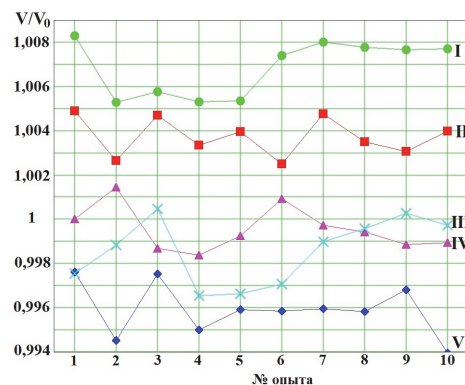


Рис. 7. Изменение измеренного объема гранулы в зависимости от номера фотографии

Статистические характеристики данных, приведенных на рис. 7, представлены в табл. 1.

После обработки результатов было установлено, что полученные объемы гранул от фотографии к фо-

тографии колеблются в пределах 0,4 % (т.е. размах не превышает 0,004), что соответствует априорной оценке погрешности определения диаметра гранулы в 1 пиксель.

Табл. 1. Статистические характеристики

	I	II	III	IV	V
Max	1,0083	1,0049	1,0005	1,0014	0,9976
Min	1,0053	1,0025	0,9965	0,9984	0,9939
Размах	0,0030	0,0024	0,0039	0,0031	0,0037

Заключение

В работе предложен итерационный алгоритм автоматической обработки изображений с целью определения объема фотографируемой гранулы. Экспериментально показано, что предложенный алгоритм определяет объем гранулы диаметром 1 мм на оптической системе с разрешением 750 пикселей на 1 мм с погрешностью 0,4 %, что соответствует ошибке определения диаметра гранулы в 1 пиксель.

Таким образом, применение данной методики позволяет уменьшить (по сравнению с [5]) погрешность определения объема гранулы эллиптической формы и добиться априорной оценки точности.

References

- [1] Ferapontov NB, Rubin FF, Kovaleva SS. Reagent-free method and device for finding content of components in solution [In Russian]. Pat RF of Invent N 2282850 of April 29, 2005, Russian Bull of Inventions N24, 2006.
- [2] Kudukhova IG, Rudakova LV, Rudakov OB, Nazarov VM. Multisensor microphotography method for water determination in water-alcohol mixtures [In Russian]. Voda: Himiya i Ecologia 2011; 12(42): 89-93.
- [3] Zhao Y, Chen W, Yang Y, Yang X, Xu H. Swelling behavior of ionically cross-linked polyampholytic hydrogels in varied salt solutions. Colloid Polym Sci 2007; 285: 1395-1400. DOI: 10.1007/s00396-007-1710-0.
- [4] Patachia S, Valente AJM, Baciuc C. Effect of non-associated electrolyte solutions on the behaviour of poly(vinyl alcohol)-based hydrogels. Eur Polym J 2007; 43: 460-467. DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2006.11.009.
- [5] Tokmachev MG, Ferapontov NB, Ivanov AV, Gagarin AN, Agapov IO. Method of determining composition of solution based on swelling kinetics of polymer gel therein [In Russian]. Pat RF of Invent N 2714832 of February 19, 2020, Russian Bull of Inventions N5, 2020.
- [6] Ferapontov NB, Kovaleva SS, Rubin FF. Determination of the nature and concentration of solutes using the swelling granule method. J Anal Chem 2007; 62: 924-929. DOI: 10.1134/S1061934807100048.
- [7] Gavlina OT, Kargov SI, Ivanov VI. The concept of gel diffusion in the kinetics of swelling and shrinking of a polystyrene sulfonic acid ion exchanger in the K⁺ form [In Russian]. Sorbtsionnye i Khromatograficheskie Protessy 2021; 21(6): 794-804. DOI: 10.17308/sorpchrom.2021.21/3824.
- [8] Laucka A, et al. Method for volume of irregular shape pellets estimation using 2D imaging measurement. Appl Sci 2020; 10(8): 2650. DOI: 10.3390/app10082650.
- [9] Ballard DH. Generalizing the Hough transform to detect arbitrary shapes. Pattern Recogn 1981; 13(2): 111-122. DOI: 10.1016/0031-3203(81)90009-1.
- [10] Liang M, Hu X. Recurrent convolutional neural network for object recognition. 2015 IEEE Conf on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR) 2015: 3367-3375. DOI: 10.1109/CVPR.2015.7298958.
- [11] Leonov EA, Leonov YuA, Averchenkov AV, Kazakov YuM, Zueva AS. Recognition method on images of objects of elliptical shapes [In Russian]. Automation and modeling in design and management 2019; 3(5): 4-8. DOI: 10.30987/article_5d8d113d478348.62159890.
- [12] Gander W, Golub GH, Strebel R. Least-squares fitting of circles and ellipses. BIT 1994; 34: 558-578. DOI: 10.1007/BF01934268.
- [13] Canny J. A computational approach to edge detection. IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell 1986; 8(6): 679-698. DOI: 10.1109/TPAMI.1986.4767851.
- [14] Zakharova EM, Minashina IK. Review of multidimensional optimization methods. J Commun Technol Electron 2015; 60(6): 625-636. DOI: 10.1134/S1064226915060194.

Сведения об авторе

Токмачев Михаил Геннадьевич, 1983 года рождения, в 2005 году окончил физический факультет МГУ по специальности «Физика», работает доцентом на кафедре математики физического факультета МГУ. Область научных интересов: математическое моделирование, программирование, физическая химия.
E-mail: miket@mail.ru. ORCID: 0000-0001-9978-1844

ГРНТИ: 28.23.15

Поступила в редакцию 31 декабря 2022 г. Окончательный вариант – 27 июня 2023 г.

A method for estimating the polymer gel granule volume by an optical technique

M.G. Tokmachev¹

¹ Department of Physics, Moscow Lomonosov State University, 119991, Russia, Moscow, Leninskie Gory 1/2

Abstract

The paper proposes an algorithm for processing a photo of a granule in order to determine its volume. Factors that influence the result of automatic data processing in the optical micrometry method are investigated. It is shown that by estimating the outline of an ellipse-shaped granule, the algorithm determines its volume with a relative error of 0.4%, which corresponds to an error in determining the granule diameter of 1 pixel.

Keywords: boundary detector, image processing, polymer granule.

Citation: Tokmachev MG. A method for estimating the granule volume by an optical technique. *Computer Optics* 2023; 47(6): 968-971. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1271.

Author's information

Mikhail Gennadievich Tokmachev (b.1983) graduated from Moscow Lomonosov State University in 2005, majoring in Physics. Currently he works as the associate professor at Mathematics department, Physics faculty, MSU. Research interests are mathematical modeling, programming and physical chemistry. E-mail: miket@mail.ru.

Received December 31, 2022. The final version – June 27, 2023.
