

лических наночастицах. Анализ результатов моделирования (рис. 3 Б) показывает, что наиболее перспективными материалами являются серебро и алюминий, которые показывают усиление поглощающей способности слоя при всех рассматриваемых параметрах частиц. При этом максимальное усиление в 1,3 раза достигается при размерах наночастиц порядка 100–150 нм. Для наночастиц золота, никеля и кобальта, несмотря на некоторое усиление при размере частиц 100 нм, при других параметрах наблюдается значительное ослабление поглощающей способности слоя.

Таким образом, полученные результаты моделирования показывают, что при оптимальных параметрах наночастицы металла могут быть использованы в качестве эффективных рассеивающих центров. Обнаружено, что наилучшими рассеивающими свойствами обладают наночастицы серебра и алюминия с размерами порядка 100–150 нм, которые позволяют повысить поглощающую способность кремниевого слоя на 30%.

Литература

1. *Altwater H., Polman A.* Plasmonics for improved photovoltaic devices // *Nature Materials* 9, P. 205–213.
2. *Ferry V., Munday J., Atwater H.* Design Considerations for Plasmonic Photovoltaics // *Advanced Materials* 22, P. 4794–4808.
3. *Polman A., van Lare M., Lenzmann F., Verschuuren M.* Mode coupling by plasmonic surface scatterers in thin-film silicon solar cells // *Appl. Phys. Lett.* 101, P. 221110–221110–4.
4. *Palik E. D.* Handbook of Optical Constants of Solids, Academic, New York, 1985. P. 353, 555.

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ОТСЛЕЖИВАНИЯ ЭМБРИОНАЛЬНЫХ КЛЕТОК МЫШИ

М. М. Шитик

ВВЕДЕНИЕ

Компьютерная видеомикроскопия живых клеточных культур является перспективным современным методом исследования таких фундаментальных биологических процессов, как клеточное старение и раковая трансформация. Большинство работ по видеомикроскопии живых клеток связано с конфокальной микроскопией, однако используемые в ней люминесцентные красители не позволяют проводить длительное исследование клеточных культур [1]. Для отслеживания всей последовательности изменений в отдельных клетках популяции в Институте генетики и цитологии НАН Беларуси был разработан метод витального анализа эф-

фектов внешних факторов на культивируемые клетки на основе кругло-суточной компьютерной видеозаписи в течение ряда дней [2].

В качестве объектов исследования были использованы эмбриональные фибробласты человека и мыши – видов млекопитающих, резко контрастных как по продолжительности жизни, так и по частоте возникновения онкологических заболеваний. Сравнение изменений фенотипа на уровне отдельных клеток позволило получить новые данные о генетических процессах, ведущих к старению и раковой трансформации [2].

Однако подобное сравнение изменений, происходящих в клеточных популяциях, значительно усложняется большим объемом входных данных и является весьма субъективным при ручном анализе. В данной ситуации автоматические методы отслеживания и фиксирования характеристик клеток позволяют повысить эффективность анализа видеозаписей клеточных популяций, а также заметно ускорить данный процесс.

ПРОБЛЕМЫ ОТСЛЕЖИВАНИЯ

Среди наиболее характерных проблем при обработке видеозаписей живых клеточных популяций выделяются низкий уровень контрастности и неоднородное распределение интенсивности, в результате которого части клетки могут иметь ту же интенсивность, что и фон на изображении. Это приводит к тому, что клетки могут казаться меньше по размерам или распадаться на несколько отдельных компонент [3, 4].

Проблемой остается и огромное разнообразие форм клеток. Многие типы клеток способны изменять форму и размер со временем. Клетки не всегда двигаются только в области, фиксируемой камерой, но могут вести себя нестабильно в зависимости от экспериментальной установки, настроек камеры или протекающих биологических процессов [3].

Также клетки очень часто взаимодействуют друг с другом, частично перекрываясь, слипаясь или расходясь. Эта проблема для методов автоматического отслеживания состоит в фиксировании всех клеток до и после контактов клеток. Значительно усложняется данный вопрос с ростом количества участвующих в контакте клеток [3, 4]. Похожая проблема состоит и в фиксировании клеточных делений и слияний, что также весьма распространено в биологии клеток.

БАЗОВЫЙ АЛГОРИТМ

Вычислительные методы отслеживания клеток по-своему интересны, однако не несут никакой практической ценности, пока они не реализованы в виде готовых пакетов. Среди множества всех инструментов от-

слеживания отдельно стоит выделить пакет DYNAMIK, алгоритм которого и был выбран в качестве базового в данной работе.

Данный модуль MatLab хорошо зарекомендовал себя при решении различных задач трэкинга. При сравнении с другими пакетами, в том числе с популярным приложением Celltrack [5], DYNAMIK показал лучшие результаты при сегментации. К тому же пакет является более стабильным, хоть в нем и реализован, на первый взгляд, более простой метод трэкинга. DYNAMIK позволяет легко отображать получаемые при отслеживании данные, оставаясь при этом довольно простым и мощным.

АЛГОРИТМ ОТСЛЕЖИВАНИЯ

Предложенный метод основан на сегментации и предполагает последовательную индивидуальную обработку каждого кадра видеозаписи. Для каждой сегментированной в кадре клетки ищется ее предшествующее состояние в предыдущих кадрах и устанавливается соответствие между ними во времени [3; 4]. Поиск клеток происходит в результате серии шагов предобработки изображения, представляющей собой совокупность фильтрации, определения перепадов интенсивности и морфологических операций. Начинается он с фильтрации типа «соль и перец», производимой при помощи двухмерного медианного фильтра [6]. Затем для получения контуров клеток применяется сегментация с помощью детектора Собела [6] и задания порогового уровня [6]. Завершается предобработка удалением любых оставшихся шумов во внутренней области клеток и сглаживанием полученных контуров посредством операции эрозии [6]. Каждая выделенная клетка описывается определенным набором параметров, вносимых в отдельную таблицу с выходными данными.

Метод использует поиск соответствующих клеток на соседних кадрах по принципу «ближайшего соседа». Согласно этому принципу, клетка в i -ом кадре будет находиться на наименьшем расстоянии от той же переместившейся клетки среди всех клеток на $(i+1)$ -ом кадре. Проблема отслеживания в данном случае ограничивается только поиском ближайших пар клеток в двух соседних кадрах, что является классической задачей согласования клеток. Если количество клеток в $(i+1)$ -ом кадре превышает их значение в i -ом кадре, то это может означать, что в области наблюдения появились новые, ранее не отмеченные клетки. Если же количество клеток в i -ом кадре больше, нежели в $(i+1)$ -ом кадре, значит, неотмеченные клетки покинули область исследования [3].

Существует и третий вариант, когда клетки одновременно и покидают, и входят в область наблюдения. В таком случае применяется пороговое значение расстояния, что не позволяет отмечать несвязанные

клетки как соответствующие, если они слишком далеко друг от друга. Пакет также предполагает фильтрацию объектов по их размеру, что позволяет отфильтровывать потенциальный шум и загрязнения рабочей области исследования, искажающие итоговую статистику.

УЛУЧШЕНИЕ КАЧЕСТВА ОТСЛЕЖИВАНИЯ

Исходная функциональность алгоритма без адаптации исчерпывает себя довольно рано. Так, не решена проблема недостаточной сегментации при слабой контрастности, когда клетки, присутствующие на реальной видеозаписи, не находят отражения при сегментации. Эта трудность может быть вызвана изменением размеров живой клетки и возможностью выхода за пределы заранее заданного диапазона фильтрации, а также операцией эрозии, которая вместо сглаживания контуров сегментированной клетки может разбить ее на несколько впоследствии фильтруемых частей. Решить данную проблему можно путем поиска соответствующей клетки на предыдущих кадрах, увеличивая пороговое расстояние между согласуемыми клетками с ростом глубины поиска.

Другой приведенной проблемой является учет слияний и разделений клеток при сегментации. Для преодоления последствий потери или появления новых клеток в таком случае необходимо фиксирование момента слияния клеток, а также участников данного слияния. Отработка подобного сценария в разработанном методе происходит при резком увеличении или уменьшении площади той или иной клетки, что и является наиболее вероятным сигналом о слиянии или разделении клеток.

Наконец, в итоговой статистике присутствуют объекты, ошибочно распознанные как клетки. Это возможно, если область исследования недостаточно очищена от различного «мусора», который к тому же может обладать высокой контрастностью на уровне фона. В таком случае предложена дополнительная фильтрация объектов по изменению их положения со временем. Для фиксируемых объектов реализовано вычисление среднеквадратичного отклонения по обеим координатам, и если их изменение незначительно, то для объекта будет проведена фильтрация.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В ходе выполнения работы было проведено полностью автоматическое отслеживание эмбриональных клеток мыши. Одним из наиболее важных параметров, характеризующих изменение фенотипа популяции, является изменение ее численного состава с течением времени, которое и было получено в результате использования предложенного метода.

Также были получены такие характеристики, как средние значения скоростей и направлений движения клеток, их траектории, площади и эквивалентные радиусы, которые также могут быть использованы при изучении свойств живых клеточных популяций.

Разработанный метод отслеживания позволяет собирать информацию для получения представления о характере развития исследуемой популяции эмбриональных клеток мыши. В дальнейшем при поддержке Института генетики и цитологии НАН Беларуси [2] эти сведения будут использованы при разработке математической модели поведения и непосредственном моделировании данной клеточной популяции.

Литература

1. *Дромашко С. Е.* Компьютерная видеомикроскопия живых клеток : учеб.-метод. пособие. Минск, ИПНК, 2010.
2. Интернет-адрес: <http://labmcp.at.tut.by/>.
3. *Yaeger S., Song Q., Chen S.-S.* DYNAMIK: a software for cell DYNAMics, Motility, and Information tracking, with an application on Ras pathways. *Bioinformatics*. 2009. Vol. 25, № 18. P. 2383–2388.
4. *Meijering E., Dzyubachyk O., Smal I.* Methods for cell and particle tracking. Elsevier. 2012. Vol. 504, Ch. 9, P. 183–200.
5. *Sacan A., Ferhatosmanoglu H., Coskun H.* CellTrack: an open-source software for cell tracking and motility analysis. *Bioinformatics*. 2008. Vol. 24, № 4. P. 20–33.
6. *Гонсалес Р., Вудс Р., Эддинс С.* Цифровая обработка изображений в среде MATLAB. Москва, Техносфера, 2006.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ПРЕЛОМЛЯЮЩИХ СТРУКТУРАХ МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО

**Ю. Р. Яскевич, Н. В. Серикова, П. В. Петров,
Н. Н. Кольчевский, И. Л. Мудрецов**

На сегодня весь ряд модификаций рентгеновских линз можно разделить на одномерные, двумерные и трехмерные фокусирующие линзы. К одномерным фокусирующим линзам относятся плоскостные параболические конструкции [1], линзу-аллигатор [2], линза-клессидра [3], планарные рентгеновские линзы, которые способны фокусировать или коллимировать рентгеновские лучи. К двумерным фокусирующим линзам относят систему из отверстий в материале [4] (в одной из разновидностей данной линзы отверстия просверливаются в двух перпендикулярных друг к другу плоскостях), составные параболические линзы [5], линзу-аллигатор, линза-клессидра, составная линза-киноформ [6], планарные рентгеновские линзы [7], микрокапиллярные преломляющие линзы [8], адиабатические линзы [9], на основе которых можно создать