

Лекции по дисциплине
«Цифровые технологии в материаловедении»

Тема №1
Развитие цифрового материаловедения

Повсеместная цифровизация затрагивает все новые сферы жизни и диктует новый подход к результатам научно-исследовательских разработок. В сложившихся обстоятельствах необходимо расширять горизонт формирования и развития цифровых технологий, выявлять успешно внедренные практики, тиражировать их. Фундаментальные научные исследования и концептуальные разработки затронули область моделирования новых материалов с перспективными свойствами и инструменты цифрового материаловедения.

Цифровое материаловедение сегодня – это наука, объединяющая материаловедение и вычислительные методы для исследования и проектирования новых материалов. Исследования проводятся по направлениям разработки новых материалов, улучшения свойств материалов, изучения структуры материалов на атомном уровне и прогнозирования поведения материалов в экстремальных условиях. Изучение структуры, свойств и поведения материалов на молекулярном и атомном уровне происходит с использованием компьютерного моделирования, симуляции и анализа данных. Компьютерное моделирование и симуляции помогают предсказывать свойства и поведение материалов до их физического создания, что позволяет ускорить процесс разработки новых материалов и сократить затраты на их тестирование. Возможность моделирования изменений таких характеристик материалов, как прочность, эластичность, теплопроводность и пр., способствует созданию более прочных и легких материалов для авиационной и автомобильной промышленности, повышению эффективности солнечных батарей. Симуляторы позволяют исследователям изучать и оценивать воздействие на материалы высоких температур, высокого давления или химических веществ, помогая в разработке новых материалов, выдерживающих экстремальные условия для применения, например, в аэрокосмической, энергетической отраслях. Технология работы по созданию новых материалов включает несколько этапов (таблица 1).

Таблица 1 – Этапы создания новых материалов

Этап	Наименование этапа	Основные действия
1.	Сбор данных о материалах	Этап предполагает использование экспериментальных данных, полученных в результате лабораторных испытаний, а также данных предыдущих исследований, симуляций и моделирования
2.	Создание компьютерных моделей	Для анализа и изучения материалов создаются компьютерные модели структуры материала, включая атомы, молекулы и их взаимодействие
3.	Компьютерное моделирование и симуляции	Появляется возможность проводить эксперименты и анализировать поведение материалов при различных условиях, например, изменение температуры, давления и других внешних и внутренних факторов
4.	Анализ данных	На этапе проводятся вычисления физических свойств материалов, анализ структуры, изучение взаимодействия между атомами и молекулами, а также выявление закономерностей и тенденций
5.	Валидация и экспериментальное подтверждение	Результаты, полученные в ходе предыдущих этапов, должны быть проверены и подтверждены экспериментально, что предполагает проведение физических испытаний и тестирование материалов в реальных условиях
6.	Оптимизация и дальнейшее исследование	После валидации результатов исследования, полученные знания и данные могут быть использованы для оптимизации свойств материалов, разработки новых материалов или для дальнейшего исследования

Главное внимание исследователей направлено на такие тренды в отрасли новых материалов, как самовосстанавливающиеся, суперконструкционные материалы, цифровые паспорта материалов и создание инфраструктуры ускоренной разработки материалов. Создаются материалы, которые способны самовосстанавливаться, а это значит, что экран мобильного телефона не будет трескаться при падении, а неудачная парковка автомобиля не приведет к поездке в автосервис. Разрабатываются облегченные материалы – углеродонаполненные материалы на основе новых связующих ПЭЭК, ПЭКК и пр., так называемые суперконструкционные термопласты, которые значительно легче, чем традиционные конструкционные материалы сталь, титан или алюминий. Для авиационной промышленности внедрение таких материалов позволит снизить стоимость готовых изделий за счет сокращения количества компонентов, увеличить межсервисный интервал обслуживания, снизить выбросы углекислого газа. Создание и использование цифрового паспорта материалов – электронного документа, содержащего информацию о свойствах и характеристиках конкретного материала – помогает улучшить качество и надежность материалов, упростить процессы контроля качества и повысить эффективность производства. В России цифровые паспорта материалов активно разрабатываются и внедряются в таких отраслях, как металлургия, химическая промышленность, строительство и другие.

Очевидно, что в России цифровое материаловедение имеет огромный потенциал, однако остановимся на существующих барьерах и ограничениях. К ним можно отнести недостаточный или низкий уровень цифрового моделирования с применением суперкомпьютеров на базе искусственного интеллекта, охват фундаментальных исследований или уровень автоматизации и роботизации производственных технологий, кроме того, нехватку или отсутствие уникального научно-технологического оборудования и площадей, компетенций мирового уровня в области химии, механики веществ на нано-мезоуровне, понимания нужд промышленности на горизонте стратегического планирования.

Цифровое материаловедение в России – это относительно новая исследовательская область, которая объединяет в себе знания и методы материаловедения с использованием современных цифровых технологий. Основные направления исследований в этой области включают в себя разработку новых методов и инструментов для анализа и моделирования свойств материалов, создание баз данных и информационных систем для хранения и обработки материаловедческой информации, а также применение искусственного интеллекта и машинного обучения для решения задач материаловедения. К лидерам, разрабатывающим новые технологические решения для развития наукоемких отраслей, можно отнести госкорпорацию Росатом и ряд других промышленных и инновационных предприятий, исследовательские институты РАН – Институт машиноведения им. А.А. Благонравова, Институт проблем химической физики, среди образовательных университетов – Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Дальневосточный федеральный университет и др. Перед исследователями стоит задача создания подхода к проектированию, разработке и применению новых материалов и веществ. Для решения задачи был сформирован Центр компетенций НТИ «Цифровое материаловедение: новые материалы и вещества», выступающий драйвером развития цифрового материаловедения в России.

Большой потенциал заложен в цифровом материаловедении, заключающийся в сокращении времени и расходов на исследования новых материалов, улучшении их свойств и создании более эффективных технологий производства. Уже сегодня достижения в материаловедении в дополнении с новыми цифровыми инструментами и языками позволяют обойти ограничения проектирования и способствуют развитию сотрудничества между научными и промышленными организациями, что обеспечивает повышение конкурентоспособности российской промышленности.

Центр компетенций НТИ «Цифровое материаловедение: новые материалы и вещества»

Центр компетенций Национальной технологической инициативы (НТИ) «Цифровое материаловедение: новые материалы и вещества» на базе Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет). Ключевой целью работы распределенного Центра является создание нового, цифрового подхода к «быстрому» и «сквозному» проектированию, разработке, испытанию и применению новых материалов и веществ.

Цели и задачи:

В научно-исследовательском направлении: создание конструкционных и функциональных материалов нового поколения, цифровых двойников, материалов и конструкций на их основе, разработка технологий получения новых материалов и веществ, создание и наполнение цифровой базы данных по свойствам материалов и веществ.

В образовательной деятельности формируется высокопрофессиональный кадровый резерв для нужд цифровой экономики, оптимизирующий ключевые и особо ответственные этапы технологических процессов, улучшающий показатели эффективности и результативности не только отдельных подразделений, но и предприятий в целом.

В инфраструктурном направлении работы Центра НТИ будут созданы специализированные лаборатории, научно-образовательные подразделения Центра как для подготовки новых специалистов для реального бизнеса, так и переподготовки существующих сотрудников.

Реализация поставленных целей и задач приведет к созданию новых видов продукции и/или услуг, основанных главным образом на применении технологических решений, разработанных Центром НТИ в следующих отраслях и секторах экономики: в отрасли энергетики (НТИ «Энерджинет»); в биомедицине (НТИ «Хелснет»); в аэрокосмической отрасли (НТИ «Аэронет»); в отрасли судостроения и автомобилестроения (НТИ «Маринет» и «Автонет»); в области цифрового проектирования (НТИ «Технет»); в строительной отрасли и т.д.

Большая часть проектов Центра не привязана к одной существующей отрасли, а ориентирована на развитие и применение в нескольких отраслях сразу, например, разработки в области термопластичных полимеров и изделий на их основе.

Результаты деятельности:

Основная задача Центра НТИ это разработка подходов к цифровому материаловедению - программно-аппаратного комплекса (ПАК), обеспечивающего хранение данных о материалах и технологиях их получения, синтеза, переработки, компьютерное моделирование материалов и их испытаний, а также системы прогнозирования свойств новых материалов. Все проекты Центра учитываются как составные элементы данного ПАК.

Разработана система прочностных расчетов анизотропных материалов. Создан программный модуль «Цифровой двойник» материалов, позволяющий проводить расчеты методом численного моделирования цифровых двойников реальных изделий из анизотропных (преимущественно, композиционных) материалов, что позволит решать широкий круг задач механики (статики, динамики), термомеханики, связанных задач, оптимизации структуры композита. Применение модуля «цифровой двойник» материалов сможет обеспечивать снижение временных, финансовых, материальных, иных ресурсных затрат на порядок и более, что обеспечит поставку продукции с конкурентными характеристиками в кратчайшие сроки в зависимости от возникающей конъюнктуры на глобальном высокотехнологичном рынке.

Разработана цифровая технология автоматизированного подбора состава и прогнозирования свойств полупроводящих матриц, обеспечивающих возможность саморегуляции электросопротивления, для систем обогрева различного назначения. Данная технология позволит сократить стоимость разработки, как следствие сокращения количества изготавливаемых опытных образцов и их испытаний, сократить время на разработку новой и/или модификацию существующей рецептуры для изготовления полимерной полупроводящей

матрицы для однородных систем электрообогрева широкого круга бытового назначения. Все это сократит время с начала разработок до серийного выпуска, адаптивность продукции к требованиям рынка, снизит себестоимости выпускаемой продукции за счет оптимизации компонентного состава используемых материалов.

Проекты:

«Цифровая система оценки качества сварки сталей» - целевым результатом реализации проекта станет интерактивная система предиктивного цифрового двойника моделирования и прогноза показателей качества свариваемости сталей, применяемых при сварке крупногабаритных изделий при производстве ответственных изделий, в том числе энергетического и атомного машиностроения.

«Материалы селективного лазерного плавления» - целевым результатом реализации проекта будет создание интеллектуальной базы данных свойств материалов, полученных по технологии селективного лазерного плавления (SLM) на базе специализированного программно – аппаратного комплекса, обеспечивающего сбор, хранение, обработку данных, в том числе, с помощью алгоритмов искусственного интеллекта и позволяющей прогнозировать свойства полученного материала в зависимости от состава исходных компонентов и технологических режимов.

«Новые 2D3D ПКМ на основе графена» - в настоящем проекте предполагается решить несколько задач в области создания композиционных материалов с участием графено-подобных материалов (оксид графена, восстановленный оксид графена, многослойные графены или тонкослойные графитовые нанопластинки). Одним из примеров продукта будет композитный сорбент на основе оксида графена – супергидрофобный аэрогель для очистки воды и воздуха от органических загрязнений.

«Аддитивная технологии для костных имплантов» - предлагаемый комплекс мер включает разработку методов получения всех компонентов, необходимых для создания изделия (сополимер гидроксикислот, наноразмерный минеральный наполнитель, биологически-активное покрытие) в виде лабораторных регламентов, а также технологии получения остеоиндуктивного композитного материала, технологии 3D-печати с использованием этого материала и технологии нанесения двух видов покрытий – предотвращающего образование биопленок и керамического с активными фармсубстанциями.

«Лазерный ультразвук» - целевым результатом реализации проекта будет являться разработка метода автоматизированного ультразвукового неразрушающего контроля (НК) деталей и элементов конструкций из полимерных композиционных материалов (ПКМ), полученных с помощью аддитивных технологий. Инновационная технология ультразвукового контроля будет реализована с использованием автономного сканера-дефектоскопа, способного перемещаться в различных пространственных положениях по плоским немагнитным поверхностям и проводить неразрушающий ультразвуковой контроль монолитных изделий из ПКМ.

«Термопласт» - проект был завершен в 2022 году и направлен на разработку нескольких новых неразрывно связанных технологий в таких высокотехнологичных отраслях промышленности как синтез новых теплостойких (температура эксплуатации 200-250°C) конструкционных полимеров, создание волокнонаполненных (тканевых) композиционных материалов и производство композиционных изделий по прогрессивной технологии с применением термопластичных препрегов.

«Арматура» - основными задачами проекта являются: минимизация расходов на технологическую отработку измененной технологии, рецептуры, отдельных технологических параметров за счет предварительного прогнозирования результатов при помощи создания предварительных цифровых моделей продукта, виртуальных испытаний и т.д., исключение человеческого фактора в контроле технологических параметров процесса выпуска продукции, оптимизация производственного процесса в разрезе возможности контроля в режиме «одного окна».

«Сложный композит» - проект был завершен в 2022 году. Это новый тип преформ на основе нетканой трехмерной структуры, позволяющей повысить физико-механические свойства композита. Проект включает разработку оборудования для создания нетканых структур преформ с пространственным армированием и математические модели, позволяющие прогнозировать свойства композитов, созданных на основе преформ такого типа.

«Пропитка» - проект был завершен в 2022 году и направлен на внедрение инновационной технологии пропитки и анализа прочности композитных изделий. Целевым результатом реализации проекта будет являться разработка цифровой модели течения связующего при формировании изделий из ПКМ методами пропитки. Предлагаемое решение заменяет традиционные технологии в существующих и вновь создаваемых процессах производства, упрощая разработку преформ изделий сложной геометрии и/или сложных схем армирования и повышения скорости освоения технологии изготовления новых изделий, качество (стабильность и предсказуемость) процесса пропитки, точность проектных расчетов физико-механических свойств изделий.

«Биоразлагаемые материалы» - основной задачей, на решение которой направлен проект, является углубленное изучение закономерностей процесса деградации полимерных композиций на основе полиолефинов с добавлением природных полимеров и/или биоразлагаемых полимеров различными методами, в том числе ранее не использовавшихся для исследования данных объектов.

«Адгезионные взаимодействия ПКМ» - целью проекта будет создание цифровой модели полимерных композиционных материалов, в которой учитывается комплекс адгезионных взаимодействий в системах «волокно-специальное покрытие» и «волокно с покрытием – полимерная матрица». Разработка цифровой модели позволит повысить точность прочностных расчетов композитных конструкций на основе волокон, а также сформировать базу знаний по расчетным свойствам композитов на разных масштабных уровнях, что в свою очередь существенным образом облегчит предварительное проектирование новых композитных материалов.

«МКЭ-композит» - проект был завершен в 2022 году. Целевым результатом реализации проекта стало создание программного комплекса, позволяющего проведение расчетов методом численного моделирования цифровых двойников реальных изделий из анизотропных (преимущественно, композиционных) материалов.

«Цифровая платформа поддержки инженерных решений» - целевым результатом реализации проекта будет создание программного комплекса, обеспечивающего получение композиционных материалов с прогнозируемыми свойствами с использованием методов оптимизации параметров составного композита на базе анализа физико-механических характеристик, его составляющих, и с учетом технологических процессов их получения.

«Свет» - проект направлен на создание самовосстанавливающейся защитной пленки из термопластичного полимера, которая «заживляет» 95% повреждений при нагревании.

«Греющий кабель» - целевым результатом реализации проекта, завершенного в 2022 году, стало создание информационно-вычислительного комплекса (цифровой технологии) автоматизированного подбора состава (рецептуры) и прогнозирования свойств полупроводящих матриц, обеспечивающих возможность саморегуляции электросопротивления, для систем обогрева различного назначения.

«Новые покрытия» - целевым результатом реализации проекта будет создание нового материала и технологии нанесения защитного полимерного покрытия на основе уретанового форполимера для повышения эрозионной и коррозионной стойкости трубопроводной запорной арматуры при работе в экстремальных условиях эксплуатации с применением цифрового проектирования (разработки и сопровождения цифровых двойников (Digital Twin, DT), моделирования и применения многоуровневой матрицы целевых показателей и ресурсных ограничений).

«Бумагоподобные композиты» - реализация проектов направлена на разработку пакета технологических решений, оснащенных элементами цифрового сопровождения и моделирования, как основы для создания первого и единственного в России предприятия по выпуску сепарационных и фильтровальных материалов (далее по тексту, бумагоподобные композиты) для очистки воздуха и жидких сред двойного и стратегического назначения.

Перечень сквозных технологий НТИ

№	Наименование сквозной технологии
1	Искусственный интеллект
2	Квантовые технологии
3	Технологии создания новых и портативных источников энергии
4	Новые производственные технологии
5	Технологии управления свойствами биологических объектов
6	Нейротехнологии, технологии виртуальной и дополненной реальностей
7	Технологии хранения и анализа больших данных
8	Технологии компонентов робототехники и мехатроники
9	Технологии сенсорики
10	Технологии распределенных реестров
11	Технологии квантовых коммуникаций
12	Технологии транспортировки электроэнергии и распределенных интеллектуальных энергосистем
13	Технологии беспроводной связи и «интернета вещей»
14	Технологии машинного обучения и когнитивные технологии
15	Фотоника
16	Технологии моделирования и разработки материалов с заданными свойствами
17	Молекулярная инженерия в науках о жизни
18	Бионическая инженерия в медицине
19	Водородные технологии
20	Технологии доверенного взаимодействия
21	Технологии моделирования и разработки новых функциональных материалов с заданными свойствами
22	Геоданные и геоинформационные технологии
23	Технологии мобильных накопителей энергии
24	Технологии снижения антропогенного воздействия

Словарь:

АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Оригинал: additive manufacturing

Известны также как технологии послойного синтеза, объединяют использование цифрового проектирования и получение самого изделия путем послойного добавления материала на специальном оборудовании с использованием различных методов.

БИОНИКА

Оригинал: bionics

Прикладная наука о применении в технических устройствах и системах принципов организации, свойств, функций и структур живой природы, то есть формы живого в природе и их промышленные аналоги. Проще говоря, бионика – это соединение биологии и техники. Бионика рассматривает биологию и технику совсем с новой стороны, объясняя, какие общие черты и какие различия существуют в природе и в технике.

БЛОКЧЕЙН

Большая база данных, в которой содержатся все транзакции, которые происходили когда-либо, и все данные существовавших когда-либо биткоин-кошельков. Она состоит из связанных между собой блоков публичных данных. Но применяемая шифрация никак не мешает читать содержимое блоков, математически связывает блоки между собой, и при этом ни одну запись ни в одном блоке никак нельзя заменить, потому что возникнут нестыковки в математике между блоками и потребуется менять следующий за ним блок, затем следующий – и так всю цепь.

БОЛЬШИЕ ДАННЫЕ

Оригинал: big data

Серия подходов, инструментов и методов обработки структурированных и неструктурированных данных очень больших объемов и значительного многообразия для получения воспринимаемых человеком результатов, эффективных в условиях непрерывного прироста, распределения по многочисленным узлам вычислительной сети.

ГЕНОМИКА

Оригинал: genomics

Раздел молекулярной генетики, посвященный изучению генома и генов живых организмов. Синтетическая биология – область генной инженерии, которая объединяет науку и инженерию с целью проектирования и построения новых (не существующих в природе) биологических функций и систем.

«ИНТЕРНЕТ ВЕЩЕЙ»

Оригинал: internet of things, iot

Концепция вычислительной сети физических объектов («вещей»), оснащенных встроенными технологиями для взаимодействия друг с другом или с внешней средой, рассматривающая организацию таких сетей как явление, способное перестроить экономические и общественные процессы, исключаящее из части действий и операций необходимость участия человека.

ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ

Оригинал: artificial intelligence

Научное направление, в рамках которого ставятся и решаются задачи аппаратного или программного моделирования тех видов человеческой деятельности, которые традиционно считаются интеллектуальными.

КВАНТОВАЯ КОММУНИКАЦИЯ

Оригинал: quantum communication

Инновационный вид коммуникаций, основанный на эффекте квантовой запутанности частиц.

МЕТОДОЛОГИЯ ФОРСАЙТ

(от англ.forsight – взгляд в будущее)

Социальная технология, формат коммуникации, который позволяет участникам договориться по поводу образа будущего, а так же, определив желаемый образ будущего, договориться о действиях в его контексте.

НАЦИОНАЛЬНАЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ИНИЦИАТИВА (НТИ)

Программа мер по формированию принципиально новых рынков и созданию условий для глобального технологического лидерства России к 2035 году. НТИ включает системные решения по определению ключевых технологий, необходимых изменений в области норм и правил, работающих мер финансового и кадрового развития, механизмов вовлечения и вознаграждения носителей необходимых компетенций. Выбор технологий производится с учетом основных трендов мирового развития, исходя из приоритета сетевых технологий, сконцентрированных вокруг человека как конечного потребителя.

НЕЙРОТЕХНОЛОГИИ

Оригинал: neuro technology

Научное направление, в рамках которого ставятся и решаются задачи аппаратного или программного моделирования тех видов человеческой деятельности, которые традиционно считаются интеллектуальными.

СЕНСОРНЫЕ СИСТЕМЫ Оригинал: sensory system

Системы на основе чувствительных элементов, преобразующих параметры среды в пригодный для технического использования сигнал, обычно электрический.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УКЛАД Оригинал: technological paradigm

Несколько взаимосвязанных и последовательно сменяющих друг друга поколений техники, эволюционно реализующих общий технологический принцип.

«УМНАЯ» СЕТЬ Оригинал: smart grid

Модернизированные сети электроснабжения, которые используют информационные и коммуникационные сети и технологии для сбора информации об энергопроизводстве и энергопотреблении, позволяющей автоматически повышать эффективность, надежность, экономическую выгоду, а также устойчивость производства и распределения электроэнергии.

ЦИФРОВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ Оригинал: digital simulation

Способ исследования реальных явлений, процессов, устройств, систем и др., основанный на изучении их математических моделей с помощью компьютера.

ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ Оригинал: digital technology

Основаны на представлении сигналов дискретными полосами аналоговых уровней, а не в виде непрерывного спектра. Цифровые технологии главным образом используются в вычислительной цифровой электронике, прежде всего компьютерах, в различных областях электротехники, таких как робототехника, автоматизация, измерительные приборы, радио- и телекоммуникационные устройства и многие другие цифровые устройства.

Тема №3

Система анализа изображений

Развитие вычислительной техники и аппаратуры сбора данных позволило перейти от визуальной оценки наблюдаемой в микроскоп картинки к количественным методам анализа структур. Компьютерная обработка предоставляет возможность объективного качества материалов, что в итоге повышает конечной продукции.

Система анализа изображений составлена из компонентов, уже имеющихся практически в любой лаборатории и требующих минимальных затрат на их сопряжение. Типичная система анализа изображений состоит из микроскопа, цифровой видеокамеры, компьютера с видеовходом и специального программного обеспечения для захвата и анализа полученных изображений.

Выбор микроскопа определяется в первую очередь типом решаемых задач. Для металлографии необходим отражающий микроскоп, а для медицины и биологии – просвечивающий. При этом для металлографических задач наиболее удобен инвертированный микроскоп: при нижнем расположении объектива нет ограничений на высоту образца, и достаточно подготовить только одну рабочую поверхность. Если микроскоп не имеет порта для подключения видеокамеры, понадобится переходник для установки камеры на место окуляра.

Для получения изображений могут быть использованы цифровая видеокамера или цифровой фотоаппарат. Принципиальное различие в том, что цифровой фотоаппарат всегда поставляется со встроенной оптикой и предназначен для сохранения одиночных кадров большого разрешения, а цифровая CCD-видеокамера служит для получения потокового видео относительно небольшого разрешения.

Большое разрешение важно для качества печати и получения фотографий мелкодисперсных структур без эффекта Муара, но оно увеличивает время численного анализа. В цифровой фотокамере в мобильном варианте комплекса анализа изображений достаточно 5...2 мегапикселей. В ней должен без особого труда извлекаться встроенный объектив для замены на адаптер камера-окуляр. Она должна подключаться к портативному компьютеру через USB-интерфейс, питаться через этот порт, иметь TWAIN-драйвер для контроля, съёмки и перекачки изображений непосредственно в программу анализа изображений.

Телекамера для системы анализа изображений оптимальна без встроенной оптики, с разрешением от 2 мегапикселей, с возможностью отключения автоматики, широким динамическим диапазоном электронного регулирования экспозиции.

Специальных требований к комплектации компьютера не накладывается, за исключением видеозахвата. Обычно бывает достаточно компьютера средней производительности.

Видеокамера

Неоспоримые преимущества цифровых видеокамер - возможность записи как видеопоследовательности, так и отдельных снимков, оптимальное для численного анализа разрешение и невысокая цена, объясняемая отсутствием ненужных приспособлений и аксессуаров, и, наконец, возможность их лёгкой инсталляции на любые микроскопы без какой-либо дополнительной оптики.

Современные цифровые видеокамеры оснащаются мощными встроенными цифровыми процессорами для обработки цветности, компенсации засветки, регулировки уровня белого и т.д.

Фотокамера

Главное преимущество цифровых фотокамер для систем анализа изображений – мобильность и энергонезависимость. Для сбора информации в цехе и на выезде существует возможность создания полностью мобильных систем анализа изображений, состоящих из портативного компьютера и цифрового фотоаппарата. Нет необходимости приобретать устройство видеоввода в компьютер, так как у всех фотокамер есть USB-кабель для быстрой перекачки изображений в компьютер.

Главное препятствие – трудность сопряжения фототехники с микроскопами. В старых микроскопах нет специальных портов, а у большинства цифровых фотокамер несменный объектив и нет резьбы для дополнительных фильтров. Необходим переходной тубус, качество оптики и точность настройки которого могут свести на нет все преимущества камеры и микроскопа, а применение кустарных адаптеров приводит к необходимости дополнительной настройки резкости изображения на экране компьютера.

Если на фотоаппарате не используется режим ручной фокусировки, то наиболее существенная с точки зрения пользователя проблема использования фотокамеры для анализа изображений – это невозможность начальной калибровки комплекса на весь период эксплуатации. В общем увеличении системы входит собственное увеличение фотоаппарата – плавно варьлируемое без фиксированных предустановок. При выключении аппарат или долгом бездействии объектив возвращается в исходное положение. Это означает, что калибровку комплекса придётся производить при каждом включении аппарата, равно как и при смене увеличения.

Поэтому целесообразнее при работе на микроскопе использовать теле- или видеокамеры, если их разрешения достаточно для получения фотографий.

Пакеты программ для количественного анализа

После получения изображения в цифровом виде требуется количественный анализ. В программах художественных фотографий, например, Adobe PhotoShop, задача – улучшить субъективное восприятие, Задача графических анализаторов для науки и техники – объективность обработки с сохранением подлинности изображения. Даже просто для представления фотографии структуры в отчете или публикации допускается лишь единообразная обработка всего кадра целиком. Любая «прорисовка» части кадра считается фальсификацией. Универсальные математические пакеты (MathCad, MathLab и Maple) делают некоторые стандартные преобразования и измерения изображений. Специализированные по классу объектов графические анализаторы изображений объединяют большее количество «фотографических» и математических процедур.

Первое, что должны делать эти программы – осуществлять видео- и фотозахват и сохранять изображение на жестком диске компьютера.

Второе – проводить предварительную фотографическую обработку изображения: нормализацию яркости, контраста и коррекции цветов. В этом фотографические программы, такие как Adobe PhotoShop, и графические анализаторы схожи. Изображение приводится к допустимому виду с минимальной потерей информации.

Третье требование к количественному анализатору – устранять основные дефекты пробоподготовки и получения изображения (царапины, пыль, блики, шумы электромагнитной наводки). Для этого используются качественные и спектральные фильтры, а также операции свёртки. Они сглаживают шумы и дефекты исходных изображений, подчеркивают границы. В частности, от дефектов можно избавиться с помощью геометрических фильтров (например, устранить из подсчета царапины шлифа).

Четвертое требование – выделять на исходном цветном изображении отдельным цветом требуемые объекты. Это процедуры сегментации по цвету и бинаризации. Преобразование полноцветного или серого изображения в чёрно-белое: все точки с яркостью выше заданного порога окрашиваются белым, остальное – чёрным.

Общематематические пакеты обработки изображений (MathCad, MathLab и Maple) содержат стандартный набор приемов (фильтрация, свёртка, бинаризация). Прикладные пакеты обработки изображений отличаются от них набором дальнейших процедур выделения объектов с заданными геометрическими свойствами, например, выделение границы частицы заданной формы, размера, ориентировки, и морфологическими фильтрами, которые разделяют слипшиеся частицы, утончают «в нитку» границы, соединяют разорванные границы, исключают объекты, срезанные краем кадра. После этого программы выдают количественные характеристики элементов структуры, накапливают и обрабатывают их многомерную статистику, группируют по

базам, сопоставляют кадры между собой и с заданными нормами. А также формируют отчет, экспортируя все результаты количественного анализа, включая анализируемые изображения и текстовые комментарии в текстовый редактор, например, в Microsoft Office Word.

ImageExpert Pro - пакет прикладных программ обработки изображения макро- и микроструктур материалов. Помимо фотографических и общематематических процедур он содержит процедуры для геометрического и морфологического анализа, процедуры измерения объектов и стандартизированные (в ГОСТ, ISO, ASTM, DIM, G1S) методы анализа структур. Эта программа входит в состав аппаратно-программного комплекса на базе микроскопов известных производителей (ЛОМО, Zeiss, Leica и т.д.). Так же она может входить в стандартную комплектацию металлографической лаборатории фирмы Buehler (США). Программный пакет ImageExpert Pro выполняет практически все операции, содержащиеся в пакетах других фирм (Zeiss, Leica, Opton, Hitachi) и предоставляет более широкие возможности по предварительной обработке изображений, а также созданию новых проектов по алгоритмам пользователя.

Тема № 4

Цифровое изображение

Интерес к цифровому изображению возник задолго до появления компьютеров. В начале 1920-х годов для передачи газетных фотоснимков из Лондона в Нью-Йорк и обратно использовали электрический кабель. Изображение преобразовывали в цифровую информацию, но его качество было чрезвычайно низким, а передача занимала три часа. Тем не менее, это было огромным скачком вперед по сравнению с методом доставки фотографий обычной почтой, что требовало не меньше недели. Сегодня цифровая передача изображения используется в медицине, физике, астрономии, биологии и других отраслях науки и техники. Широкое распространение получили и недорогие бытовые цифровые фотокамеры.

Обработка изображения используется в самых различных устройствах. Ее можно определить как любое преобразование или интерпретацию цифрового изображения компьютером. Задачи получения цифрового изображения и его преобразования тесно связаны.

Обработка изображения может быть весьма сложной, и по этой причине многие исследователи стараются ее избегать. Однако в материаловедении изображение часто имеет высокий контраст, что упрощает преобразование. Выше описано получение изображения ПЗС (прибор с зарядовой связью)-матрицей и его передача компьютеру. Поскольку изображение является цифровым, вся обработка выполняется компьютером.

Структура цифрового изображения

В микроскопе формируется двумерное изображение $f(x, y, B)$, где f – интенсивность цвета B в пикселе (x, y) . Непрерывную функцию можно представить в дискретной цифровой форме, как показано на рис. 2.25. Рис. 2.26 иллюстрирует представление изображения в цифровой форме. Монохромное цифровое изображение можно представить как матрицу, индексы которой описывают номера строки и колонки, а численные значения элементов характеризует интенсивность пикселя. Элементы этой матрицы по-английски называют picture elements (элементы изображения), что сокращают до pixel (пиксель). Рис. 2.26 иллюстрирует левый верхний угол изображения в осях x, y . Направление оси y может показаться странным, однако оно принято в большинстве компьютерных программ (хотя имеются и исключения). Качество цифрового изображения определяется количеством пикселей и высотой ступеней, характеризующих минимальную разницу уровня яркости.

Количество пикселей определяет разрешение изображения.

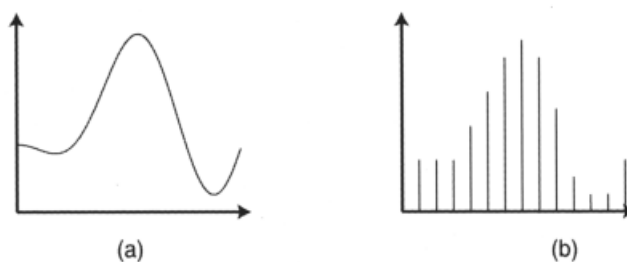


Рис. 2.25. (a) – Непрерывная зависимость от времени напряженности интенсивности света на датчике; (b) – оцифровка входного сигнала при помощи АЦП, характеризующая его амплитуду и время.

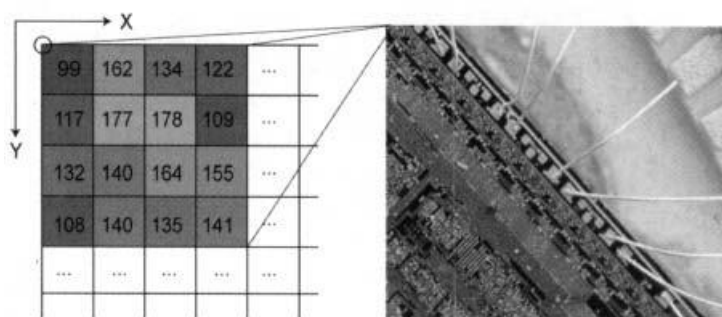


Рис. 2.26. Хранение цифрового изображения. В 8-битовом формате монохромного серого цвета интенсивность пикселя характеризуется значением в диапазоне от 0 до 255, где 0 соответствует черному, а 255 – белому цвету.

Число уровней интенсивности называют глубиной цвета, указываемой в битах. Например, пиксель 8-битового изображения имеет $2^8 = 256$ уровней яркости. Интервал возможных величин интенсивности называют динамическим диапазоном изображения. Стандартная единица памяти, байт, содержит 8 бит информации. Следовательно, пиксель 8-битового изображения можно сохранить в одном байте памяти (или в трех байтах в случае цветного RGB изображения). Человеческий глаз различает 20–30 уровней яркости монохромного изображения, и поэтому 8 битовая глубина более чем достаточна для визуального восприятия изображения. На протяжении многих лет однобайтовая память и 8-битовый диапазон интенсивности являются наиболее широко используемым форматом изображения. Однако обработка изображения может изменить его диапазон. Например, диапазон измерений может измениться в результате преобразования интенсивности или применения пространственного фильтра. Поэтому после преобразования изображения разница в уровне яркости может стать заметной, и некоторые современные видеокарты получают изображение с более высокой глубиной цвета.

В связи с проблемой хранения цифрового изображения важно его разрешение. Причины этого стали очевидными, когда были изучены причины получения некачественного изображения. Цифровое преобразование сигнала проводят до построения изображения, и поэтому проблемы хранения сигнала в аналоговой и цифровой форме имеют много общего. Стробоскопический эффект характерен для многих форм дискретной информации, примером чего является колесо автомобиля, которое на фотопленке может крутиться назад. Критерий Найквиста утверждает, что частота оцифровки по крайней мере вдвое должна превышать частоту сигнала. В противном случае высокочастотная компонента может привести к появлению искажений. Стробоскопический эффект состоит в появлении ложной информации низкой частоты. Рис. 2.27 иллюстрирует появление регулярных черно-белых полос при различных пространственных разрешениях цифрового изображения. Для цифрового изображения критерий Найквиста формулируется следующим образом: пространственное разрешение должно по крайней мере вдвое превышать размер изучаемых особенностей. Поэтому на рис. 2.27 для решетки разрешение, то есть ширина пикселя, не должна превосходить половины ширины полосы.

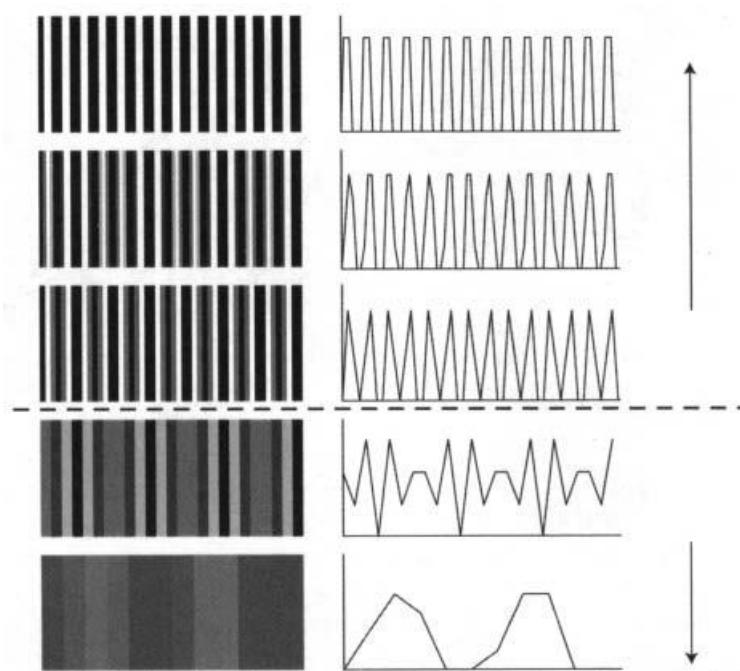


Рис. 2.27. Изображение дифракционной решетки при различных разрешениях. Если пространственное разрешение (размер пикселя) больше величины, определяемой критерием Найквиста, полоса на изображении кажется более широкой, чем она есть на самом деле. В результате теряется важная пространственная информация.

Существует несколько факторов, ограничивающих пространственное разрешение. Например, объем информации (хранимой на жестком диске или в оперативной памяти) зависит от разрешения. Развитие компьютерной техники привело к увеличению объема памяти, и поэтому теперь она, как правило, не лимитирует разрешение. Разрешение и глубина цвета теперь ограничиваются характеристиками ПЗС-матрицы и видеокарты.

Анализ изображения

Количественные измерения методом компьютерного анализа изображения имеют несколько особенностей. Рис. 2.28 иллюстрирует один из методов анализа изображения. Возможны и другие методы, но их используют значительно реже.

Сначала нужно правильно настроить микроскоп. Для получения качественных данных это очень важно. Любое увеличение скорости сканирования в конечном счете обязательно приведет к менее точным данным.

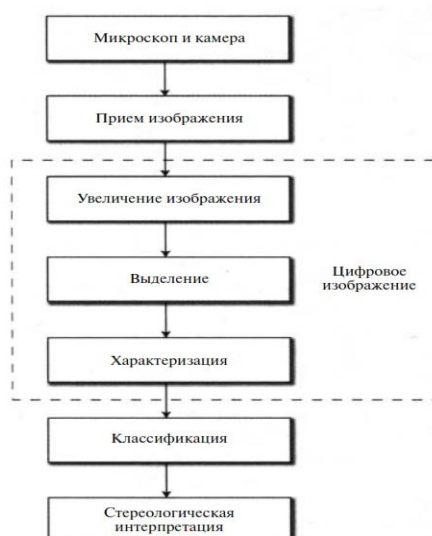


Рис. 2.28. Процедура преобразования и анализа цифрового изображения

Получение цифрового изображения состоит в превращении полученного оптического изображения в цифровую форму. Различие цифрового и оптического изображений состоит в том, что первое не является непрерывным. Цифровое изображение состоит из массива мелких пикселей. Его можно сохранить в память и обработать при помощи некоторой компьютерной программы.

Преобразование изображения включает целый ряд операций. Для облегчения анализа оно может включать и изменение размера пикселя. Целью преобразования может быть увеличение контраста, снижение шума, исправление дефектов, обусловленных оптикой микроскопа или устройства оцифровки изображения, и т.д.

Выделение состоит в идентификации различных особенностей и определении границ между ними. Человек имеет большой опыт выделения в режиме реального времени, однако компьютер такой способности не имеет. При двоичной системе записи изображения эта операция состоит в установке порога интенсивности. Ярким областям приписывают значение «1», а пикселям, интенсивность которых ниже порога, приписывают «0». Успех столь простого метода разделения объектов зависит от предшествующей подготовки образца, получения и преобразования изображения.

В процессе характеристики берутся объекты, выделенные на стадии сегментации, и производятся измерения на каждом из них. Эти измерения зависят от цели работы. Например, может измеряться длина, площадь, степень эллиптичности волокна и т.д. После характеристики цифровое изображение больше не требуется.

Если на изображении выделяется несколько объектов различного типа, их делят на соответствующие классы. Характеристики всех объектов, выделенных на предыдущем шаге, должны дать требуемую информацию о них. Операцию классификации можно использовать, даже если изображение содержит только один интересующий тип объектов. Например, для удаления артефактов, появившихся при подготовке образца или при обработке изображения. Наконец, для получения статистически объективных данных применяют стереологические методы. Отметим, что на измеренные характеристики влияют как метод преобразования информации, так и способ получения изображения.

Преобразование изображения

После выбора метода преобразования изображения нужно принять несколько решений:

- Использовать ли последовательное или параллельное преобразование?
- Какую операционную систему использовать? \
- Возможно, наиболее сложное решение состоит в выборе языка программирования.

К счастью, бюджет научно-исследовательских лабораторий облегчает ответ на эти вопросы. Отметим, что результат зависит от алгоритма преобразования, а эту зависимость нужно свести к минимуму.

Программирование в машинных кодах (на языке ассемблер) очень трудоемкая задача. Количество доступных программисту индивидуальных команд зависит от типа процессора, но обычно оно не превышает 100. Более того, даже простейшие математические действия типа умножения и деления состоят из нескольких команд языка ассемблер.

Неудобства языка программирования низкого уровня были быстро преодолены, и теперь имеется несколько языков программирования более высокого уровня. Эти языки имеют больший выбор команд. Однако ЦПУ их не понимает, и поэтому они должны быть преобразованы в машинные коды. Это может быть сделано или компиляцией, переводящей всю программу в машинные коды за один шаг, или интерпретацией, в которой каждая строка операторов переводится в последовательность команд. Очевидно, скорость работы программы зависит от качества компилятора или интерпретатора соответственно.

Первый шаг преобразования изображения состоит в вызове описывающей его информации. Большинство коммерческих видеокарт имеет библиотеку команд, которые позволяют вызвать изображение и перевести его в двумерную матрицу.

Тема №5

Хранение и редактирование изображений

До появления цифровых методов получение микрофотографий при помощи микроскопа было длительным процессом, включающим фотографирование и проявку фотопленки. Еще ранее, до изобретения фотоаппарата, наблюдаемое изображение зарисовывали, что было еще более трудоемкой задачей, требующей не только терпения, но и художественных способностей микроскописта. В XIX столетии рисунки были иллюстративными, а количественные измерения на их основе имели значительные ошибки.

Появление цифровой камеры в последнее десятилетие привело к настоящей революции в получении и хранении увеличенных изображений. Цифровое изображение строится почти мгновенно, в результате чего стало возможно получать сотни изображений в течение одного рабочего дня. Однако легкость фотографирования имеет и обратную сторону. Имеется множество графических форматов хранения изображения, неправильный выбор которого может сделать изображение фактически бесполезным. Кроме того, для корректной интерпретации полученных данных необходимо понимать принципы хранения информации в специфическом формате.

Структура файлов данных

Человеческий глаз отображает мир способом, похожим на ПЗС-матрицу, в которой роль пикселя исполняют палочки и колбочки, расположенные на сетчатке и представляющие собой элементарные чувствительные ячейки глаза. На сетчатке формируется перевернутое изображение и передается оптическими нервами мозгу. Для хранения изображения мозг использует различные абстракции. Точный цвет и форма объекта заменяются абстрактными понятиями типа «коричневый цвет» и «собака», сильно сокращающими количество информации, требуемой для запоминания определенной сцены. Концептуальная манера запоминания изображения позволяет «дурачить» человека при помощи оптических иллюзий. Современные компьютерные программы пока не имеют концептуальных понятий и используют прямые методы хранения информации. Имеется два метода хранения изображений:

- растровый метод;
- объектный метод, использующий элементы простейшей геометрической формы (или векторов), из которых строится изображение. При этом методе построения изображения линия, например, может быть описана вектором, его ориентацией, толщиной и цветом.

Растровые файлы хранят изображение в виде линейной последовательности пикселей некоторой интенсивности. Преимущества растрового метода хранения изображения обусловлены тем, что ПЗС-матрица получает изображение именно в растровой форме. Объектный метод хранения изображения обычно используют в графических программах, строящих изображение из набора простых объектов типа отрезков прямых, квадратов и кругов. Однако даже в этом случае изображение иногда приходится преобразовывать в растровое, если, например, его нужно отпечатать на принтере или показать на мониторе компьютера.

Структура компьютерных файлов достаточно сложна и зависит от типа операционной системы. Файлы включают не только непосредственно данные, но и информацию, которая важна для операционной системы. Эта информация описывает тип данных (например, изображение, текст и т.д.), программное обеспечение, необходимое для открытия файла, и информацию об авторе. Эти компоненты файла обрабатываются операционной системой и обычно не доставляют беспокойства пользователю.

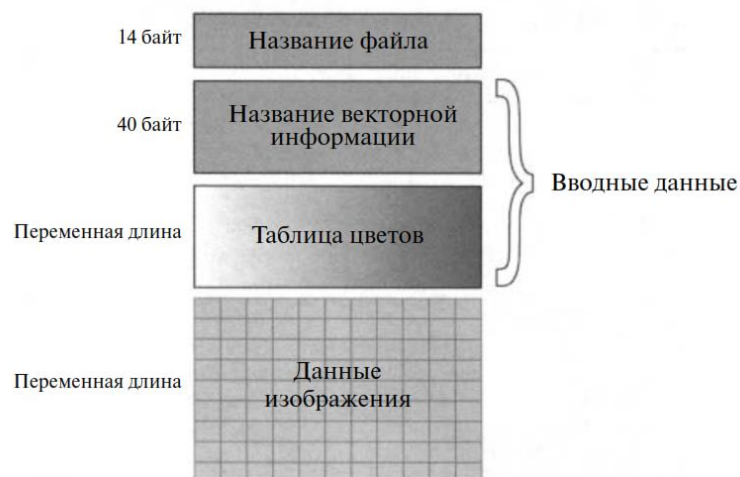


Рис. 2.29. Структура видеофайла программы Windows, в котором первые 14 байт представляют собой заголовок файла, а следующие 40 байт описывают детали информации заголовка. До информации об интенсивности пикселей дана таблица, характеризующая цвет изображения

Не вдаваясь в детали операционной системы, структуру видеофайла можно разделить на две части, а именно вводные данные и информацию, описывающую пиксели изображения. Чтобы проиллюстрировать связь этих частей, в качестве примера будет использован файл цветного изображения Windows. Схема вводной части Windows-файла показана на рис. 2.29. Вводные данные (Bitmap Info) состоят из двух частей, а именно заголовка вводимых данных и цветовой таблицы. Вводные данные представлены в Таблице 2.4.

За вводными данными следует таблица (LUT), определяющая выбор одного из 256 возможных цветов. В случае изображения «истинного цвета» таблица LUT отсутствует, и каждый пиксель характеризуется своим цветом. За вводными данными следует информация, описывающая интенсивность пикселей.

Вводные данные операционной системы Windows представлены в относительно простом формате, и по этой причине заголовок весьма краток. Без вводной информации нельзя определить размер и глубину цвета. Для правильного извлечения информации компьютер должен понимать информацию заголовка. Структура заголовка зависит от формата изображения, но в любом формате она содержит элементы, аналогичные описанному выше формату Windows.

Таблица 2.4. Вводные данные операционной системы Windows

Переменная	Описание
biSize:	Размер растровой структуры Заголовка Информации
biWidth, biHeight	Размеры изображения в пикселях
biPlanes	Количество плоскостей цели, оно должно быть установлено как «1»
biBitCount	Количество бит на пиксель, в пределах от 1 для монохромного изображения до 32, что соответствует максимум 232 цветам
biCompression	Тип сжатия (если имеется) хранимого изображения
biSizeImage	Размер изображения в байтах
biXPelsPerMeter	Размер изображения в пикселях на метр цели по X
biYPelsPerMeter	Размер изображения в пикселях на метр цели по Y
biClrUsed	Количество цветов изображения
biClrImportant	Количество цветов, требуемых для показа вводных данных (Bitmap Info)

Формат изображения

Цифровые изображения строят для двух целей:

1. Для зрительного восприятия, не требующего количественной информации.
2. Для количественной характеристики структуры материала. Измерения в этом случае могут состоять как в простом определении длины особенностей, так и в сложных многостадийных процедурах преобразования.

В первом случае изображение должно создавать ощущение истинности. Изучаемая деталь может быть уменьшена, и тогда мозг может интерпретировать изображение, как описано выше. Во втором случае требования к изображению зависят от методов измерения и анализа. Например, банки часто хранят и обмениваются цифровыми изображениями чеков. Наиболее важной частью чека является печатный или рукописный текст черного цвета на белом фоне. Второстепенные печатные детали чека имеют меньший контраст. Они несут меньше информации, но и их можно сохранить в соответствующем формате.

Формат изображения характеризуется набором данных типа глубины цвета и объема. Они определяют размер растрового изображения (в байтах) и память, требуемую для их хранения. Например, если размер изображения равен 1024×1024 пикселям, а глубина цвета равна 24 битам, то для хранения изображения требуется память 3 Мб. Сейчас типичный объем памяти жесткого диска компьютера равен 20 Гб, и он способен хранить приблизительно 6 000 изображений. Если изображение снимается периодически, этого может оказаться недостаточно. Если его передают при помощи портативного устройства или по линии связи, ограничения на объем передаваемой информации могут оказаться еще более строгими. Для уменьшения объема информации используют процедуру сжатия.

Существует несколько методов сжатия объема информации изображения, подробно описанных в обзоре [14]. Когда сжатое изображение восстанавливается, его формат нужно сохранить еще раз. При этом может ухудшиться качество изображения или появиться артефакты. Методы сжатия делятся на приводящие и не приводящие к потере качества изображения.

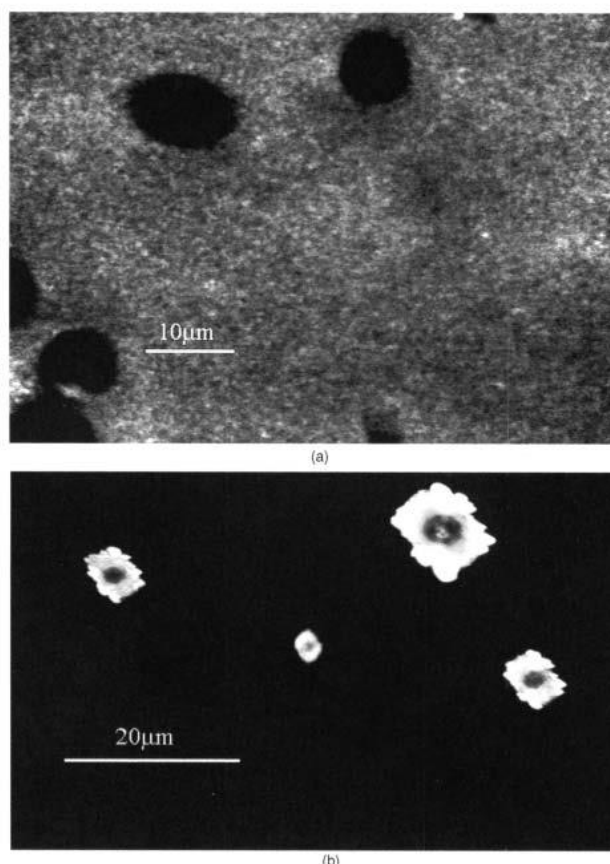


Рис. 2.30. Эффективность процедуры сжатия зависит от характера изображения. Объем информации изображения (а) сжимается методом RLE лишь на 34%; а изображение (б), имеющее крупные области одного цвета – на 91%.

Сжатие без потери качества

Растровое изображение часто содержит последовательность нескольких идентичных пикселей. Например, 8-битовое изображение серого цвета может содержать последовательность из 23 пикселей, интенсивность каждого из которых равна «186». Вместо хранения 23 идентичных пикселей, можно сохранить информацию о количестве одинаковых пикселей и их интенсивности («186»), что занимает меньший объем памяти. Эту процедуру можно применить ко всему изображению. Она позволяет сильно снизить объем памяти для изображений, имеющих значительные области одинаковой интенсивности. Чтобы раскрыть сжатое изображение, программа должна восстановить интенсивность пикселей. Это является стандартным методом сжатия, называемым RLE.

Эффективность процедуры сжатия оценивают отношением объема первоначальной информации к ее объему после сжатия. Эффективность RLE-сжатия зависит от характера изображения. Изображения с плавным изменением цвета и интенсивности сжимаются очень хорошо, а изображения с резким изменением интенсивности соседних пикселей – плохо (рис. 2.30). В таких случаях более эффективными оказываются сложные алгоритмы сжатия, оперирующие не отдельными пикселями, а повторяющимися блоками различной длины.

Сжатие с потерей информации

Точное воспроизведение изображения требуется далеко не всегда, и часто достаточной оказывается его более грубая версия. В этом случае восстановленное изображение отличается от первоначального. Это называют сжатием с потерей информации.

В Интернете очень широко используется JPEG-метод сжатия с потерей информации [15]. Он имеет две стадии. На первой информация разделяется на сведения о яркости и цвете изображения. Цветовое разрешение уменьшается вдвое, потому что человеческий глаз более чувствителен к изменению яркости, а не цвета. На второй стадии рассматриваются блоки пикселей размером 8×8 . Глаз не очень чувствителен к сигналу высокой частоты, и поэтому высокочастотная информация удаляется. Количество потерянной информации определяется степенью сжатия, выбираемой оператором. Совместное уменьшение цветовой и высокочастотной информации позволяет получить гораздо более компактное изображение.

Метод JPEG-сжатия основан на понимании механизма восприятия человеком зрительных образов. Поэтому он хорош для изображений, используемых в иллюстративных целях. Если сжатое JPEG-изображение преобразуется для получения количественной информации, могут появиться нежелательные артефакты. Рис. 2.31 иллюстрирует применение описанного ниже лапласовского фильтра размером 3×3 для определения границы круга. Применение фильтра к исходному изображению выявляет границу круга, однако в случае сжатого JPEG-изображения происходит размытие границы.

Тема №6

Преобразование изображения

Способ преобразования и выбор формата изображения зависит от цели его использования. Если изображение предназначено для визуальной демонстрации, преобразование может выявить мелкие особенности. Преобразование изображения стало обычной операцией после появления цифровых видеокамер, сканеров и недорогих домашних компьютеров. Операции типа увеличения контраста, удаления эффекта «красных глаз» и восстановления фотографий используют довольно часто. Если изображение предназначено для выделения определенных особенностей, его предварительная обработка может облегчить выполнение последующих операций. Различные методы преобразования изображения имеют общие операции. Например, они обязательно заканчиваются возвратом к исходному изображению.

При обсуждении методов преобразования изображения будут рассмотрены четыре вопроса. Во-первых, влияние метода преобразования на конечное изображение (важно, чтобы конечный результат был объективным). Во-вторых, будут рассмотрены методы изменения интенсивности. В-третьих, будут описаны пространственные фильтры. Наконец, будет дан краткий обзор частотных фильтров.

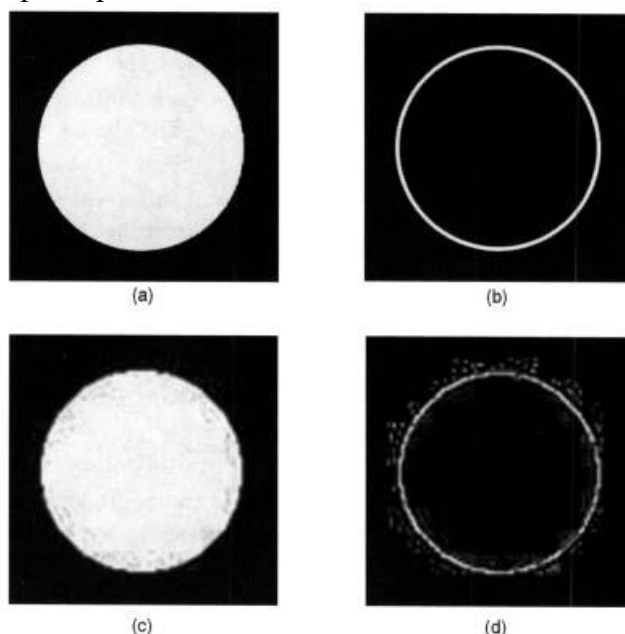


Рис. 2.31. Появление артефактов при преобразовании JPEG-изображения; (a) – первоначальное изображение, (b) – то же изображение после применения процедуры определения края, (c) – сжатое JPEG-изображение и (d) – результат применения алгоритма определения края к сжатому изображению.

Коррекция изображения

Изображение объекта в микроскопе должно быть пространственно инвариантным. Иными словами, интенсивность, форма и размер особенностей не должны изменяться при перемещении образца в пределах поля зрения. Оптика современного микроскопа вполне позволяет решить эту задачу. Однако неправильное использование микроскопа может привести к ухудшению качества изображения. Например, при неравномерном освещении образца перемещение предметного столика приводит к изменению интенсивности объекта. Оператор микроскопа, имеющий интеллектуальную систему преобразования изображения (мозг), понял бы, что это обусловлено неравномерностью освещения. Однако машинные алгоритмы преобразования изображения этого не понимают. Следовательно, получаемые характеристики объекта будут зависеть от его положения на предметном столике. Это подчеркивает важность правильной настройки микроскопа.

Путь от светового сигнала, отраженного от поверхности образца, до конечной цифровой информации включает передачу и хранение сигнала в различных формах. Конечное изображение имеет дефекты и, в частности, оно пространственно неинвариантно. К счастью, имеются методы устранения дефектов изображения.

Первый способ состоит в усреднении сигнала. Полученная информация состоит из истинного сигнала и наложенного на него случайного шума. Термином *шум* описывают случайные флуктуации интенсивности сигнала. Искажения, обусловленные неправильной фокусировкой микроскопа, имеют принципиально иную природу. Изображение на пути от отражающей поверхности образца до цифрового сигнала преобразуется несколько раз и изменяет свою форму. При каждом преобразовании возникает шум, в том числе и при оцифровке аналогового сигнала. И хотя современные методы способны снизить уровень шума, полностью устранить его невозможно.

Так как шум статистически случаен, его относительную величину можно уменьшить усреднением. Сложение N идентичных изображений увеличивает интенсивность шума в N раз. Интенсивность истинного сигнала при этом возрастает в N раз, и поэтому отношение сигнал/шум увеличится согласно следующей формуле:

$$S_N = \frac{N}{\sqrt{N}} \quad (2.18)$$

Рис. 2.32 иллюстрирует относительное уменьшение интенсивности шума при накоплении сигнала. Вторым методом улучшения качества изображения является коррекция уровня фона. Типичным дефектом цифрового изображения является тень. Она возникает в областях сильной неравномерности освещенности образца. Неравномерность освещенности может возникнуть вследствие неидеальности системы освещения, что иллюстрирует рис. 2.33.

Самое простое решение этой проблемы состоит в калибровке системы освещения путем получения контрольного фоновое изображение. Метод получения контрольного изображения зависит от типа микроскопа. Для микроскопа проходящего света фоновая картина может быть получена в отсутствие образца путем создания изображения источника в фокальной плоскости. В микроскопе отраженного света используют плоское зеркало, и фоновую картину искажают царапины на зеркале. Их влияние можно уменьшить, если сделать несколько изображений, перемещая зеркало перед каждой съемкой. Усреднение полученного сигнала дает распределение интенсивности фоновое освещения.

Метод корректировки интенсивности фона зависит от причины неравномерности. Если неравномерность фона обусловлена недостаточным контрастом изображения, лучший метод исправления состоит в вычитании сигнала. Если же причина обусловлена поглощением или отражением света в образце, лучшим методом коррекции является деление интенсивности. Часто имеются обе причины. Уравнение (2.19) описывает корректировку интенсивности пикселей:

$$I_c(x, y) = \frac{I_0(x, y) - B_e(x, y)}{B_r(x, y) - B_e(x, y)} \langle I_0 \rangle \quad (2.19)$$

Здесь $I_0(x, y)$ – начальная интенсивность пикселя изображения, $I_c(x, y)$ – откорректированная интенсивность, $B_r(x, y)$ – интенсивность фона, $B_e(x, y)$ – фоновая интенсивность при отсутствии освещения и $\langle I_0 \rangle$ – средняя интенсивность первоначального изображения.

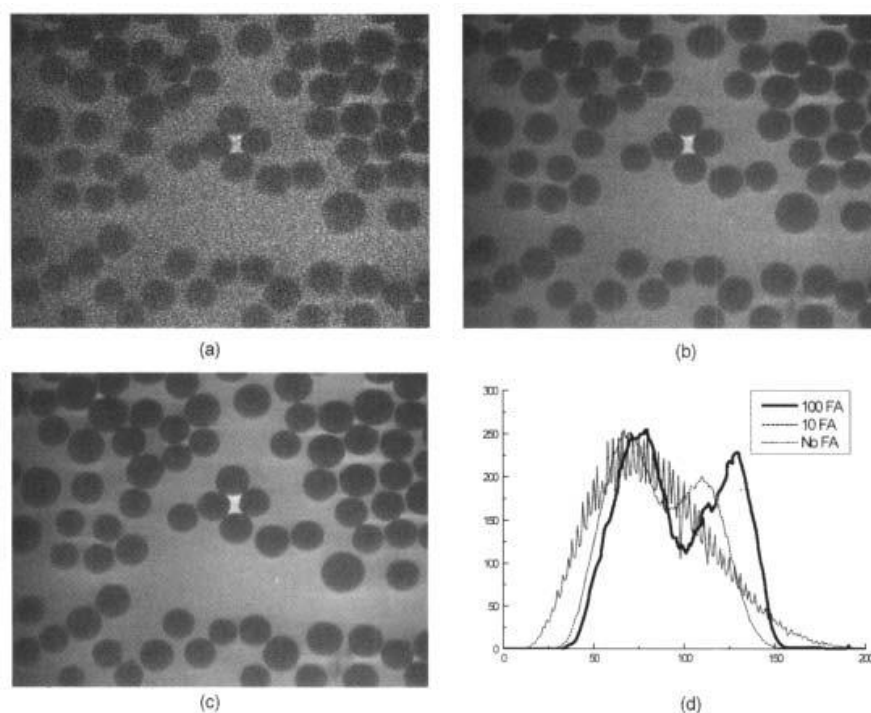


Рис. 2.32. Улучшение качества изображения путем усреднения сигнала. (a) – Один кадр; (b) – усреднение 10 кадров; (c) – усреднение 100 кадров; (d) – распределения интенсивности пикселей для этих случаев. Размер поля зрения 100×75 мкм

Третий метод коррекции изображения называют геометрической коррекцией. Одним из первых шагов при выполнении количественных измерений является калибровка поля зрения. Она состоит в получении нескольких калибровочных изображений, позволяющих определить размер индивидуального пикселя. Если оптическая система искажает форму образца, на изображении особенности одинаковой длины будут иметь различную длину. Геометрическое искажение может привести к серьезным проблемам при дальнейшей обработке изображения. Например, нельзя будет получить панораму крупной области путем наложения изображений соседних областей.

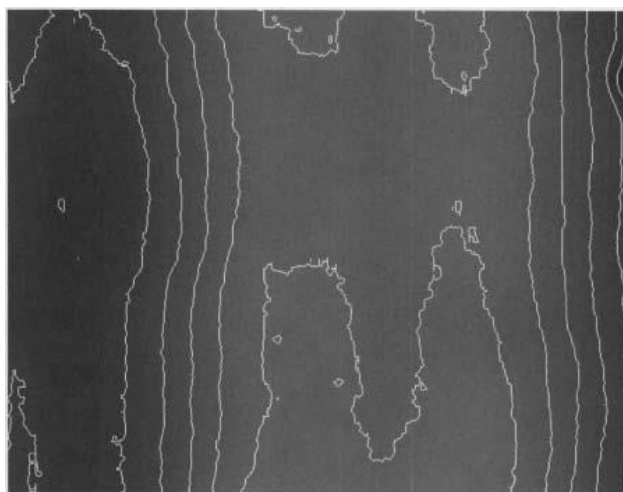


Рис. 2.33. Изображение отражающего зеркала демонстрирует неравномерность освещенности. Контурные соответствуют разности интенсивности, равной 10 единицам

Геометрические искажения, состоящие как в растяжении/сжатии, так и в изменении углов, обычно имеют гладкий характер. Гладкое преобразование может быть описано уравнением, связывающим истинное положение исходной точки $s(x,y)$ с положением пикселя $t(x,y)$ на изображении посредством двух функций $i(x,y)$ и $j(x,y)$:

$$t(x, y) = s[i(x, y), j(x, y)] \quad (2.20)$$

Если функции $i(x, y)$ и $j(x, y)$ известны, можно восстановить неискаженное изображение. На практике эти функции заранее неизвестны, и их нужно определять экспериментально.

Преобразование распределения интенсивности

Распределение интенсивности характеризует количество пикселей определенной интенсивности. Преобразование распределения интенсивности состоит в монотонном изменении интенсивности пикселей изображения. В результате получают новое распределение интенсивности пикселей, причем конечная интенсивность пикселя зависит только от его начальной интенсивности и функции преобразования. Напротив, при применении пространственного и частотного фильтров интенсивность пикселя зависит и от интенсивности его соседей.

Рис. 2.34 иллюстрирует результат преобразования интенсивности пикселей. В отличие от распределения интенсивности оптического изображения, гистограмма распределения цифрового изображения дискретна, поскольку интенсивность пикселя характеризуется натуральным значением. После преобразования интенсивность округляют до целого значения, что может привести к появлению разрывов на гистограмме.

В принципе преобразование можно описать почти любой гладкой функцией, но на практике используют лишь некоторые функции. На рис. 2.35 показаны первоначальное изображение и три изображения, полученные в результате следующих преобразований: 1) логарифмического, 2) обратного и 3) выравнивания распределения интенсивности. Последнее преобразование состоит в получении равной частоты появления пикселей различной интенсивности (насколько это возможно). Детали данного преобразования можно найти в работе [16].

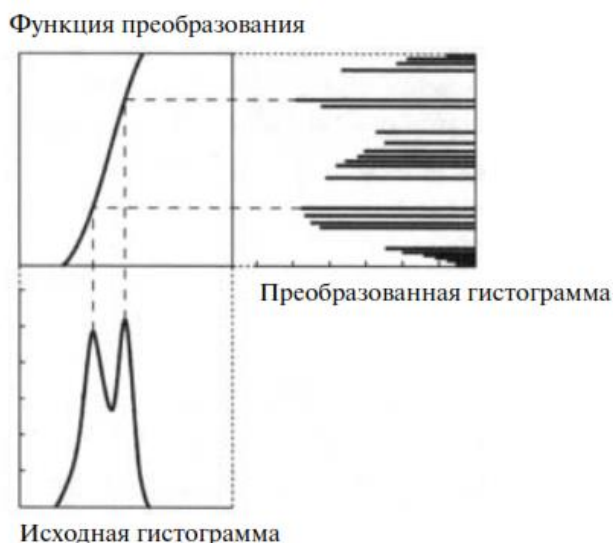


Рис. 2.34. Распределение интенсивности пикселей до и после преобразования выравнивания функции распределения. Обратим внимание на наличие разрывов в преобразованной гистограмме распределения

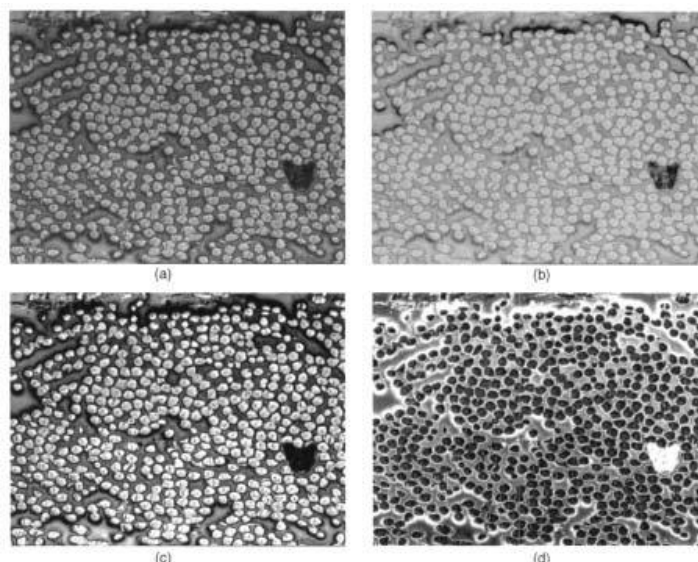


Рис. 2.35. Изображения волокнистого композита после преобразования интенсивности пикселей. (a) – Первоначальное изображение; (b) – после логарифмического преобразования; (c) – после обратного преобразования и (d) – после выравнивания распределения интенсивности пикселей. Размер поля зрения 150×100 мкм

К изображению серого цвета можно применить преобразование псевдоокрашивания, придающее ему красные, зеленые и синие компоненты. Этот метод особенно эффективен для подчеркивания границ особенностей. Человеческий глаз различает приблизительно 30 уровней интенсивности, что гораздо меньше количества уровней яркости современных мониторов. Соответственно, человеческий глаз должен различать 30^3 уровней цвета, и поэтому псевдоцветное изображение дает глазу больше информации.

Изменение интенсивности пикселей не должно изменять объема информации. К сожалению, реально при преобразовании информация может теряться, например, вследствие появления разрывов на распределении интенсивности. И если изображение предназначено не для визуальной демонстрации, а для количественного анализа, желательно изменять метод анализа, а не само изображение.

Тема № 7

Фильтры. Преобразование Хоуга. Выделение.

Пространственные фильтры

Пространственные фильтры отличаются от описанных выше точечных преобразований тем, что конечная интенсивность пикселя зависит от интенсивности соседних пикселей. После преобразования, описываемого ядром $h(x,y)$ размером $s \times s$, интенсивность $f(x,y)$ пикселя (x,y) становится равной:

$$g(x,y) = c_h \sum_{i=x-s}^{j=x+s} \sum_{i=y-s}^{j=y+s} h(x-i, y-i) f(x,y), \quad (2.21)$$

где c_h – постоянная. Этот процесс применяют ко всему массиву пикселей. Поскольку математические операции типа уравнения (2.21) называют свертками, описываемые преобразования называют фильтрами свертки.

Каждый элемент ядра $h(x,y)$ является весовым коэффициентом, определяющим влияние свертки на конечное изображение. В качестве примера рассмотрим фильтр усреднения по окрестности:

$$h(x,y) = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.22)$$

Этот фильтр определяет среднее значение интенсивности в ближайшей окрестности преобразуемого пикселя. Ниже описаны некоторые ядра свертки размером 3×3 и их влияние на изображение. Типичным фильтром размером 3×3 является преобразование Лапласа, которое часто используют для подчеркивания границ особенностей, примером чего служит рис. 2.36. При применении некоторого фильтра свертки нужно учитывать два момента.

Во-первых, на краю изображения пиксели имеют меньшее количество соседей, чем центральные, вследствие чего к ним уравнение (2.21) применять нельзя. Имеется несколько решений этой проблемы. Например, крайние пиксели можно игнорировать, в результате чего немного уменьшится размер изображения. Второй способ состоит в создании дополнительных пикселей, которым приписывается некоторая интенсивность. Еще одна возможность состоит в изменении ядра, чтобы оно учитывало физический размер изображения.

Во-вторых, при применении фильтра свертки нужно учитывать, что вычисленная по уравнению (2.21) интенсивность может выходить за пределы динамического диапазона изображения. Постоянная c_h определяет изменение средней интенсивности изображения. Например, каждый элемент ядра (2.22) равен единице, и его применение приводит к девятикратному увеличению средней интенсивности изображения. Это обусловлено тем, что конечная интенсивность каждого пикселя равна сумме интенсивностей девяти соседей. Среднюю интенсивность можно оставить неизменной, если постоянную c_h сделать равной $1/9$.

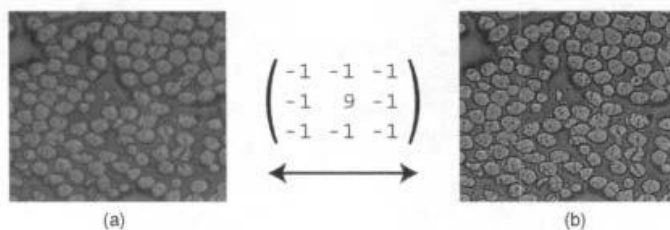


Рис. 2.36. (а) – Первоначальное изображение волокнистого композита; (б) – результат применения пространственного фильтра размером 3×3 , увеличивающего резкость границ особенностей.

Частотный фильтр

Результаты применения пространственного фильтра определяются интенсивностью нескольких соседних пикселей. Еще одним широко используемым преобразованием является частотный фильтр. Обычно он содержит преобразование Фурье, хотя имеются и исключения. Интегральный Фурье-образ $F(u,v)$ изображения $f(x,y)$ описывается формулой:

$$F(u,v) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x,y) \exp^{-i2\pi(ux+vy)} dx dy \quad (2.23)$$

Фурье-образ дискретного изображения, состоящего из $N \times N$ пикселей, имеет вид:

$$F(u,v) = \frac{1}{N^2} \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x,y) \exp\left[-\frac{2\pi i(ux+vy)}{N}\right] \quad (2.24)$$

где $u, v = 0, 1, 2, \dots, N-1$. Фурье-образ F содержит всю информацию об изображении, которое может быть восстановлено обратным Фурье-преобразованием. Пространственные частоты F являются комплексными величинами, содержащими реальную и мнимую части. В иллюстративных целях величину F обычно представляют в виде трехмерного графика на комплексной плоскости. Низкочастотные гармоники имеют вид пиков, расположенных вблизи начала системы координат $F(0,0)$, а высокие частоты – удаленных пиков.

Вычисление Фурье-образа состоит в выполнении N^4 операций с комплексными величинами, и поэтому при увеличении размера изображения время преобразования сильно возрастает. В большинстве программ используют быстрое преобразование Фурье (БПФ), уменьшающее время вычислений. Оптимизированные БПФ-алгоритмы описаны во многих работах и, например, в [7].

Преобразование изображения при помощи пространственного фильтра с ядром $h(x,y)$ описано в предыдущем параграфе. Такую же свертку можно использовать и в пространстве частот:

$$G(u,v) = H(u,v) \cdot F(u,v), \quad (2.25)$$

где F , G и H – Фурье-образы исходного изображения, конечного изображения и ядра свертки соответственно. Частотное Фурье-преобразование намного проще, чем пространственное преобразование. Преобразование изображений часто включает несколько фильтров свертки. Если анализируется несколько изображений или требуется обработка в режиме реального времени, частотное преобразование дает превосходные результаты.

На рис. 2.37 показано цифровое изображение морды мандрила (а) и его Фурье-спектр (б). Изображение содержит как высокочастотную информацию (волосы на морде), так и низкочастотную (области около носа и глаз). Для ослабления соответствующих деталей изображения можно удалить или ослабить различные области Фурье-спектра. Рис. 2.37с иллюстрирует применение высокочастотного фильтра, удалившего центральную область Фурье-образа в указанном на рисунке круге. Хотя это изображение сохранило тонкие детали первоначального изображения, потеря низкочастотной информации значительно снизила качество изображения. Рис. 2.37d иллюстрирует применение фильтра, удалившего высокочастотную информацию за пределами отмеченного круга. На преобразованном изображении особенности, соответствующие низкочастотной информации (нос и глаза), сохраняются довольно хорошо. Однако мелкие детали утеряны. Этот пример показывает, что удаление высоких частот в областях, где определяющей является низкочастотная информация, позволяет сильно уменьшить объем необходимой памяти, сохранив при этом качество изображения, вполне приемлемое для зрительного восприятия.

Фурье-преобразования особенно эффективны для анализа изображений, содержащих периодические структуры. На рис. 2.38а показан регулярный массив латексных сфер размером примерно 5 мкм. Образец содержит несколько дефектов, затрудняющих восприятие регулярной структуры. Фурье-спектр этого изображения (рис. 2.38b) имеет радиальный набор пиков, соответствующих этим структурам. Спектральные компоненты, находящиеся за пределом центрального круга, были удалены, а в результате обратного Фурье-преобразования было

получено изображение, представленное на рис. 2.38с. Преобразованное изображение подчеркивает наличие латексных сфер, а Фурье-спектр позволяет определить расстояние между периодическими структурами и их ориентацию. На рис. 2.39 показано изображение, имеющее периодическую помеху. Удаление соответствующих пиков Фурье-спектра явилось очень эффективным методом ее устранения.

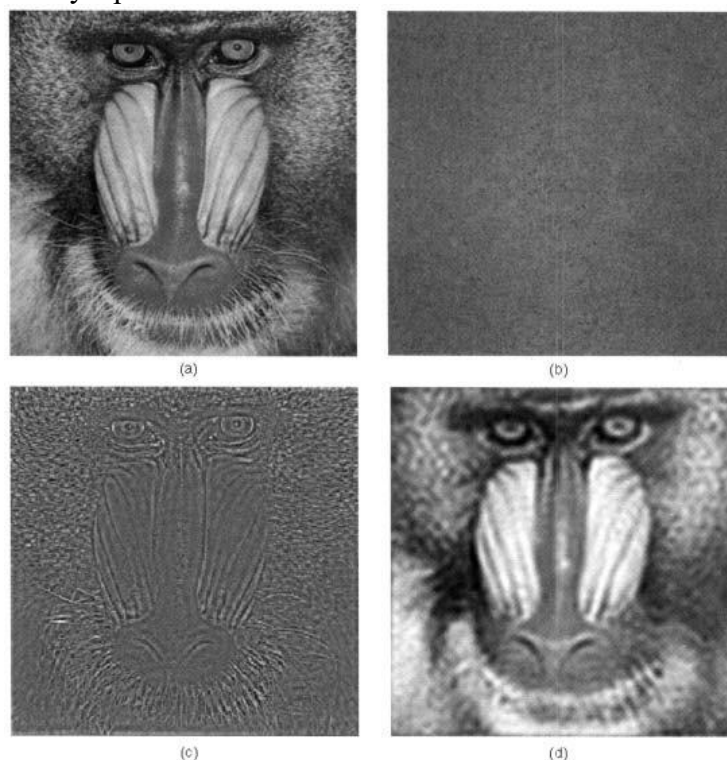


Рис. 2.37. Цифровое изображение морды мандрила (а) и его Фурье-образ (b). (с) и (d) – Результаты применения высокочастотного и низкочастотного Фурье-фильтров соответственно

Преобразование Хоуга

В 1962 Пауль Хоуг запатентовал преобразование, предназначенное для «машинного распознавания сложных линий на фотографиях». Теперь преобразование Хоуга широко применяют для автоматизированного обнаружения прямых линий, кругов и более сложных кривых. Оно особенно эффективно для устранения шума и восстановления частично утраченной информации.

Рассмотрим n пикселей границы некоторого объекта. Если мы хотим найти подмножество пикселей, лежащих на одной прямой, можно определить уравнения, описывающие все возможные прямые, и выяснить, сколько пикселей удовлетворяют каждому из этих уравнений. Сложность состоит в том, что имеется огромное количество возможных прямых (порядка n^2 , где n – количество пикселей). Преобразование Хоуга решает эту проблему иначе. Вместо того, чтобы рассматривать прямые, соединяющие все пары пикселей, последовательно рассматривают каждый пиксель, и определяются все возможные линии, проходящие через него.

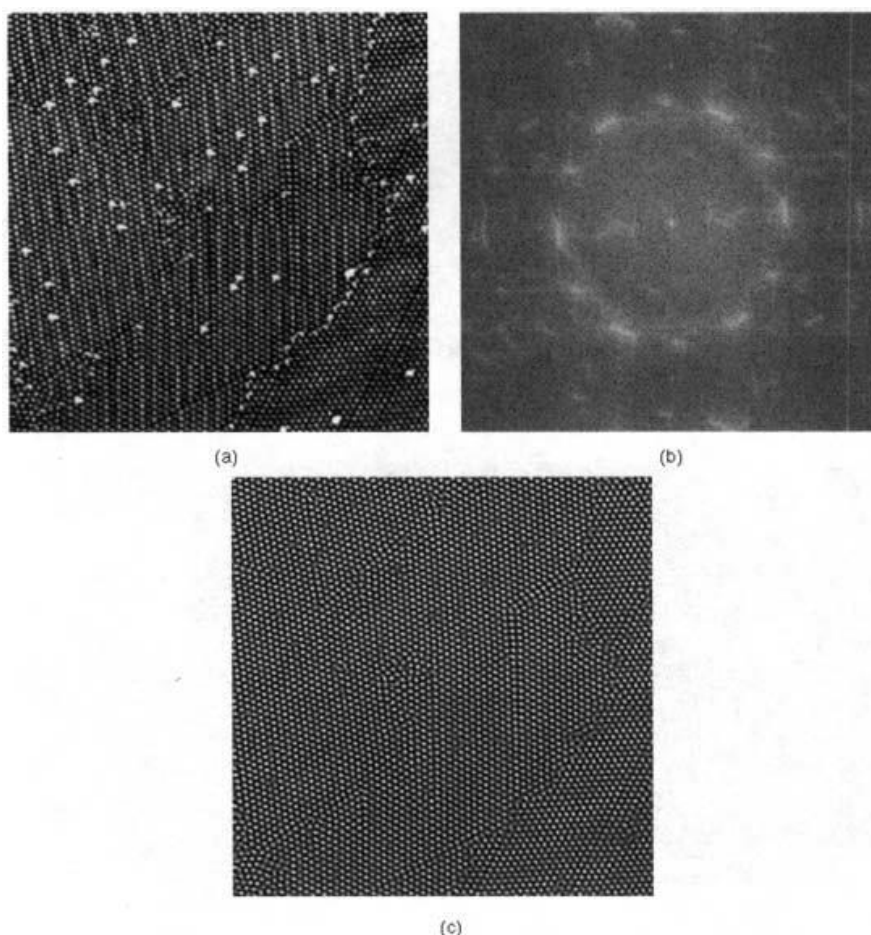


Рис. 2.38. Спектральное фильтрование Фурье-образа подчеркивает наличие периодических особенностей. (a) – Регулярный массив латексных сфер диаметром 5 мкм. Латекс получили из раствора, испарив растворитель. (b) – Фурье-спектр выявил наличие периодичности, демонстрируемой набором пиков, лежащих на окружности. (c) – Восстановленное изображение после применения Фурье-фильтра подчеркивает наличие периодичности.

В параметрической форме прямая линия описывается уравнением:

$$y \cdot \cos \theta - x \cdot \sin \theta = \rho, \quad (2.26)$$

где ρ - длина нормали из начала координат до прямой, θ – угол между прямой и осью x . В этой задаче координаты пикселя (x_i, y_i) известны и являются постоянными уравнения, а θ и ρ – искомые неизвестные.

Для выбранного пикселя с помощью уравнения (2.26) определяют величины (θ, ρ) , описывающие все возможные прямые, проходящие через точку (x_i, y_i) . В координатах параметров Хоуга их график имеет вид синусоиды. На рис. 2.40a показаны три пикселя, а рис. 2.40b демонстрирует соответствующие синусоиды в координатах параметров Хоуга. Три пикселя коллинеарны, и имеется единственная прямая (θ_i, ρ_i) , проходящая через все три точки. Поэтому все синусоиды в пространстве Хоуга проходят через точку (θ_i, ρ_i) . Коллинеарные пиксели на изображении могут быть найдены поиском пересечений в пространстве Хоуга.

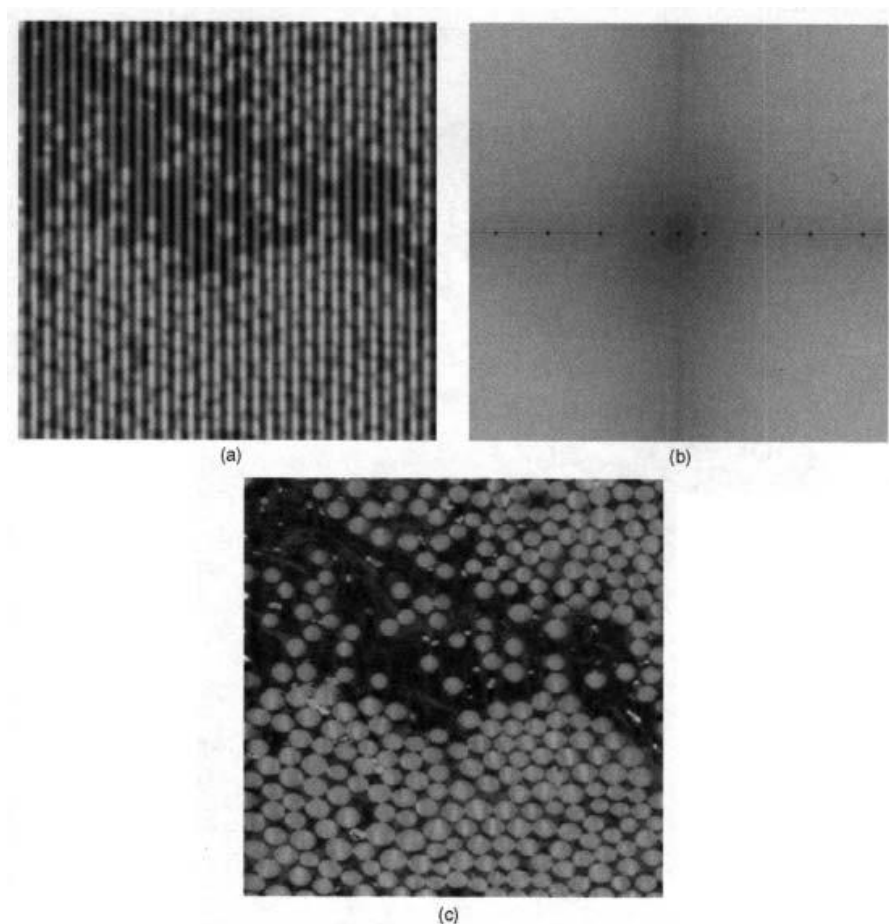


Рис. 2.39. (a) – Изображение, содержащее периодический шум; (b) – из Фурье-спектра можно удалить два пика; (c) – периодический шум устраняется, подавляя эти пики и применяя обратное Фурье-преобразование.

Уравнение (2.26) определяет непрерывную функцию, соответствующую параметрам (θ, ρ) для одного пикселя. На практике параметрическое пространство делят на конечные элементы, и для линейного преобразования Хоуга этому соответствует двумерный массив элементов в пространстве параметров (θ, ρ) . Массив первоначально зануляют. По мере работы алгоритма каждый пиксель изображения преобразуется в дискретную кривую (θ, ρ) , и в соответствующие ячейки параметрического пространства добавляется единица. Совпадающие синусоиды, как на рис. 2.40b, приводят к появлению пиков в массиве (θ, ρ) , свидетельствующих, что на изображении имеются прямые линии.

Рис. 2.41a демонстрирует цифровое изображение корпуса Паркинсона университета Лидса. Грани различных деталей (b) были обнаружены при помощи лапласовского фильтра свертки размером 3×3 . Каждый пиксель изображения с интенсивностью выше пороговой был преобразован в кривые в параметрическом пространстве. Значение каждой ячейки в массиве параметрического пространства (θ, ρ) отражается ее интенсивностью (c), что позволяет визуализировать массив. В пространстве (θ, ρ) видна небольшая группа пиков. Рис. 2.41d демонстрирует линии перспективы исходного изображения, соответствующие этим пикам. Отметим, что пики выявляют наиболее длинные отрезки прямых на исходном изображении. Менее интенсивные пики соответствуют более коротким отрезкам.

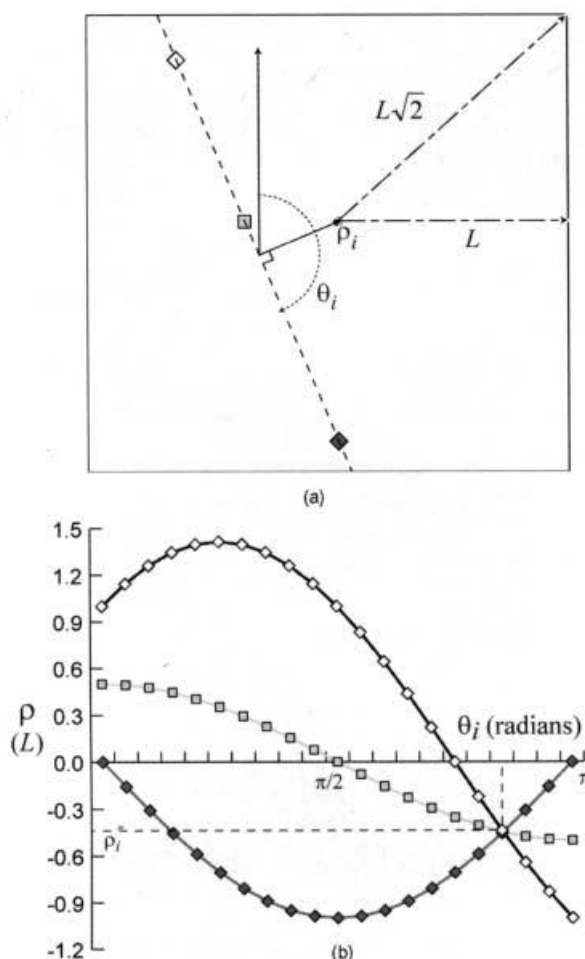


Рис. 2.40. Иллюстрация линейного преобразования Хоуга. (а) – На изображении выбираются три точки, лежащие на одной прямой; (б) – применение преобразования Хоуга ко всем прямым, которые могут проходить через каждую из этих трех точек, образует в пространстве параметров (θ, ρ) три кривые. Точка их пересечения определяет параметры (θ_i, ρ_i) прямой через все три выбранные точки

Начало координат в уравнении (2.26) можно выбрать произвольно. Чтобы оно совпало с началом координат цифрового изображения, его можно поместить в левый верхний угол. Во многих учебниках, описывающих преобразование Хоуга, так и делается. Однако это накладывает ограничение на параметрическое пространство, и ни одна синусоида не попадает в верхний правый квадрант, приводя к несимметричности графика. В примере, иллюстрируемом рис. 2.41, начало системы координат поместили в центре изображения, что дает равномерно распределенное параметрическое пространство.

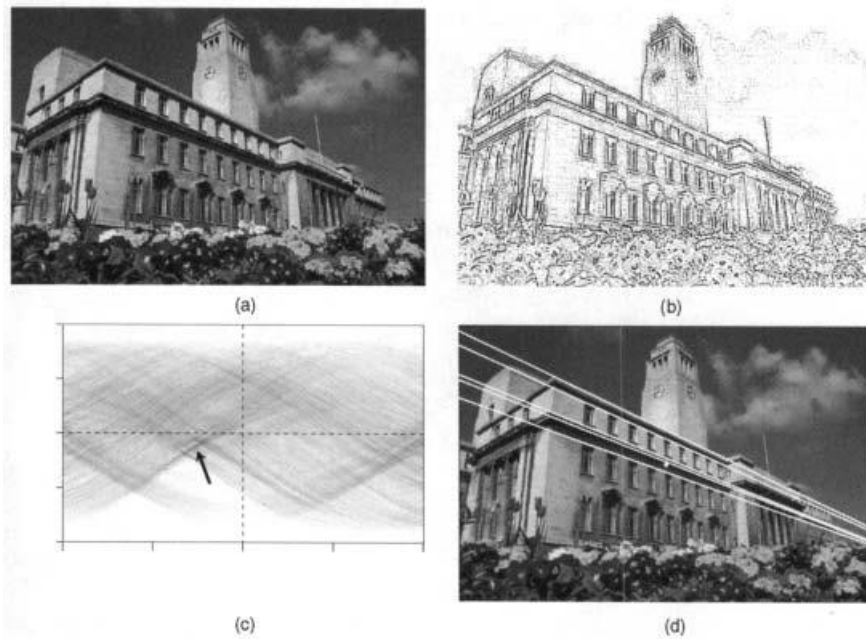


Рис. 2.41. Иллюстрация метода поиска прямых линий при помощи преобразования Хоуга. Прямые линии на изображении (а) обнаружены с использованием преобразования Лапласа размером 3×3 . (b) – Результаты применения преобразования Лапласа. (c) – Применение преобразования Хоуга к (b). (d) – Отмеченные стрелкой наиболее плотные области в координатах параметров (θ, ρ) выявляют основные линии на исходном изображении

Преобразование Хоуга можно использовать для определения распределения прямых по ориентации. В качестве примера можно взять рентгеновскую микротомографию и работу [19]. Хотя в данном параграфе описывается линейное преобразование Хоуга, этот подход можно использовать и для анализа кривых. Например, окружность описывается уравнением:

$$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 = r^2, \quad (2.27)$$

где r – радиус окружности и (x_0, y_0) – координаты ее центра. Это уравнение имеет три параметра, и параметрическое пространство является трехмерным. Каждая точка (x_i, y_i) в параметрическом пространстве преобразуется в конус. Рис. 2.42 иллюстрирует применение преобразования Хоуга к изображению мыльных пузырей. Поперечное сечение трехмерного параметрического пространства для постоянного значения радиуса r показано на рис. 2.42b.

Исходя из приведенных примеров, можно подумать, что преобразование Хоуга применимо лишь в случаях, когда имеется уравнение, описывающее форму искомым особенностей. В случаях, когда такое уравнение отсутствует, можно применять обобщенное преобразование Хоуга, в котором особенность описывается таблицами расстояний и парами направлений [20].

Выделение областей

Описанные выше преобразования предназначены для выделения различных особенностей. Однако такие преобразования ничего не говорят об их характере. Анализ изображения всегда проводится с априорным знанием их природы. Например, применение Фурье-фильтра к изображению, приведенному на рис. 2.38, было направлено на выявление периодических особенностей, наличие которых было установлено визуально. Следующий логический шаг состоит в идентификации различных особенностей изображения и выделении их из фона. Процесс выделения является одним из наиболее важных шагов любой программы распознавания образов.

Для выделения областей можно использовать различные свойства изображения. Самый простой метод состоит в делении изображения на области различной интенсивности. Для выявления областей различной интенсивности очень важна тщательная подготовка образца, включающая его разрезание и полировку. В этом смысле задача материаловеда гораздо легче,

чем его коллег-биологов, имеющих дело с объектами, границы которых определены настолько плохо, что их трудно выделить даже человеческому глазу.

Для выделения областей различной интенсивности необходимо выбрать порог (если имеется несколько областей, то несколько порогов), который делит изображение на различные области. Эту операцию называют определением порога. Выбор порога становится более очевидным, если построить распределение интенсивности пикселей. Рис. 2.43 демонстрирует изображение волокнистого композита и соответствующее распределение интенсивности пикселей. На распределении видны три пика, соответствующие порам, волокнам и матрице. Если интерес представляют волокна, выбирают диапазон интенсивности, соответствующий их пику. Всем пикселям в этом диапазоне приписывают значение «0» (черный цвет), а остальным – интенсивность «1» (белый цвет). Это позволяет выделить волокна.

После выделения пикселей, соответствующих сечению волокон, можно измерить их относительную долю, однако иногда требуется определить более сложные характеристики, например, форму волокон. Различные объекты можно определить, как области связанных пикселей. Если два пикселя принадлежат одному объекту, между ними можно найти путь, целиком лежащий внутри этого объекта. Для идентификации объектов можно использовать процесс, называемый ростом области.

Опишем алгоритм роста области. Во-первых, в пределах выбранного объекта выбирается «зародыш». Затем анализируют соседние пиксели. Каждый из этих пикселей оценивается по «критерию членства». Если интенсивность пикселя равна «0», его считают членом семейства. Критерий членства может быть и более сложным. Любой пиксель, удовлетворяющий этому критерию, также становится «зародышем», и процесс повторяется. Эта процедура приводит к «расплыванию» области до тех пор, пока не будут определены все пиксели границы волокна. Рис. 2.44 иллюстрирует, как формируется область в результате объединения пикселей. На первом рисунке показан зародыш, а последующие иллюстрируют рост области. Черные пиксели указывают направление роста. Когда во всех направлениях достигается граница, область считают определенной.

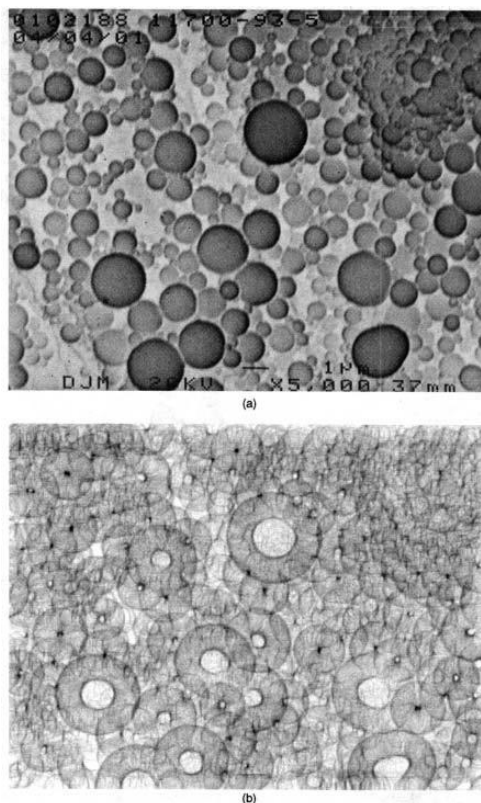


Рис. 2.42. Окружности на изображении можно идентифицировать, используя преобразование Хоуга. Пузырям на изображении (a) соответствуют темные пятна в параметрическом пространстве (b)

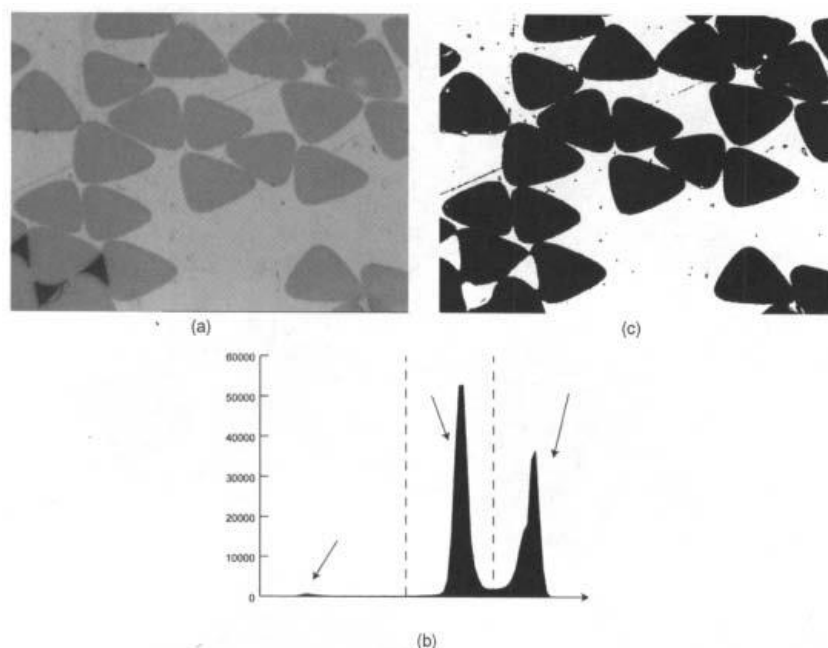


Рис. 2.43. Выделение областей состоит в делении поля зрения на области различной интенсивности. (a) – Для получения контрастного изображения образец был тщательно отполирован; (b) – распределение интенсивности пикселей позволяет выделить различные особенности; (c) – определяя порог интенсивности, делящий матрицу и волокна, получаем изображение, дальнейшая обработка которого позволяет определить объемную долю волокон

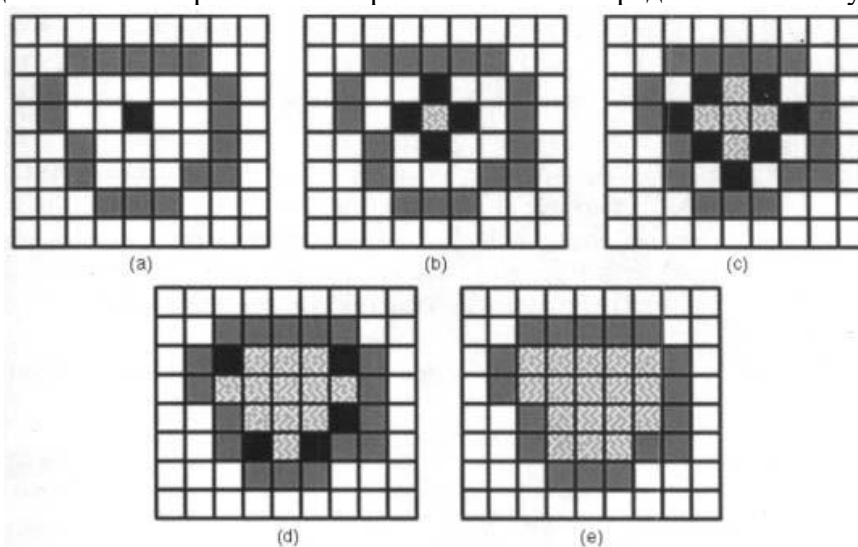


Рис. 2.44. Иллюстрация алгоритма «роста» области. Алгоритм состоит в последовательном движении от (a) к (e). Черные пиксели «активны».

Характеризация и классификация

После выделения областей объекты на изображении идентифицированы, однако их характер не установлен. Характеризация состоит в описании каждой особенности несколькими параметрами. Выбор характеристик зависит от природы образца. Например, при исследовании длины волокон их характеризуют длиной. При исследовании ориентации волокон их сечение характеризуют координатами и степенью эллиптичности (чтобы можно было рассчитать углы ориентации).

Решение о природе каждого объекта может быть сделано на основании анализа полученных характеристик. Например, при исследовании ориентации волокон особенности делят на «сечение волокон» и «другие объекты» (поры и осколки волокон, появившиеся в процессе разрезания и полировки образца).

Тема №8

Ошибки и стереология

Характер ошибок зависит от того, кем они сделаны. Посмотрев на ошибки, можно узнать, обладает ли человек человеколюбием. (*Конфуций. Суждения и беседы IV.7*).

Экспериментальные характеристики, полученные при помощи микроскопа, обязательно должны сопровождаться указанием их точности. Примером могут служить следующие утверждения:

1. Невозможно сделать абсолютно точное измерение.
2. Поэтому все экспериментальные результаты неточны.
3. Степень неточности зависит от ошибок, допущенных в эксперименте. Данные утверждения могут показаться излишне пессимистичными, но они соответствуют «принципу неопределенности» Гейзенберга, одному из краеугольных камней современной физики [21]. Погрешности любого эксперимента делятся на случайные и систематические.

Случайная ошибка – это случайная вариация результатов, которую экспериментатор не может контролировать. Так как ошибки равновероятно приводят к завышению и занижению измеряемой величины, усреднение результатов измерений улучшает оценку «истинной» величины.

Систематическая ошибка – неслучайная ошибка, определяемая методом измерения. Ошибки этого типа приводят к регулярному завышению или занижению истинного значения. Они не могут быть уменьшены увеличением количества измерений [22].

Например, при использовании линейки случайная ошибка обусловлена неточным соответствием концов образца и меток шкалы. Систематическая ошибка появляется, если Вы купили пластиковую линейку, сделанную в Китае, а расстояние между метками равно 0,9 мм вместо положенного миллиметра. Или если измерения делаются при повышенной температуре, потому что при этом расширяются древесина или пластик, из которого сделана линейка.

Многие измерения осуществляют несколькими приборами. Для определения точности результата должна быть оценена ошибка каждого измерения. Выше было описано устранение геометрического искажения и периодических помех изображения. Вместе с правильной калибровкой увеличения микроскопа это должно гарантировать правильное измерение размеров. Однако это не значит, что экспериментальные результаты совсем не имеют ошибок. Метод измерения длины и выбор образа также не должны значительно влиять на результат измерения. Эти вопросы изучает стереология, она же обеспечивает «инструментальный набор» математически корректных методов измерения. Она изучает множество вопросов, в том числе методы выборки сечения, правила подсчета объектов и способы определения размеров трехмерных особенностей исходя из их двумерных сечений.

Важность выбора изучаемой области иллюстрируется следующим примером. При анализе прозрачного материала объемом 10 мм^3 весь эксперимент может включать изучение 10 полей зрения в 10 различных сечениях с глубиной резкости 5 мкм. Если использовать типичный объектив, объем осмотренного материала будет равен приблизительно одной миллионной части всего объема образца. При выборе сечения нужно использовать следующие правила. Во-первых, сечение должны выбираться случайно. В нашем примере нужно случайно выбирать сечения на глубине от 0 до 1 мм и последующие оптические сечения через каждый миллиметр. Во-вторых, наугад нужно выбирать изображения, полученные в выбранном сечении. К сожалению, в природе человека выбрать изображение, которое выглядит или более интересным, или имеет ожидаемый вид. Поэтому, чтобы результаты были корректными, поле зрения нужно выбирать наугад, хотя и это не гарантирует полную корректность измерения.

Эксперимент часто состоит в подсчете количества особенностей в пределах поля зрения, если, к примеру, требуется определить их общее число или плотность. Если мы случайно выбрали сечение и область образца, подсчет объектов в пределах поля зрения приведет к некоторой ошибке. Ее причину иллюстрирует рис.2.45, на котором представлены два объекта

различного размера. Для учета объект должен полностью находиться в пределах поля зрения, и поэтому центр крупного объекта должен находиться дальше от края кадра. Вероятность учета крупного объекта меньше, чем мелкого. Это означает, что наш метод подсчета приводит к ошибке и нужно скомпенсировать ее. Рис. 2.46 демонстрирует рамку подсчета, в пределах которой объект учитывается, если он находится целиком в ее пределах или пересекает сплошную «линию приема», но не пересекает «линию запрета». Если в поле зрения нет объектов, выходящих за пределы рамки подсчета, этот метод дает корректные результаты независимо от размера, формы и плотности объектов [23].

Применяя показанный на рис. 2.28 метод преобразования изображения, объем анализируемых данных может быть значительно уменьшен, а параметры изучаемых особенностей описаны достаточно корректно.

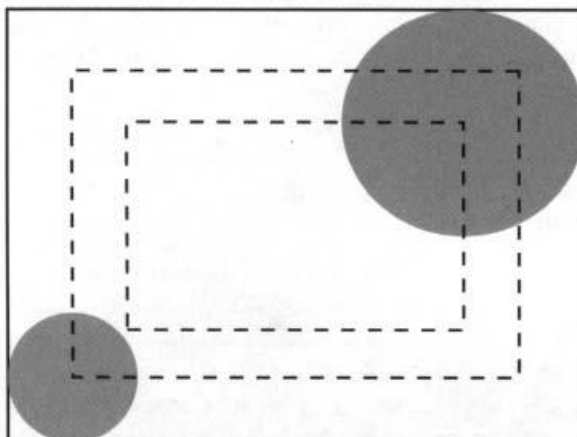


Рис. 2.45. Иллюстрация ошибки измерения, обусловленной краевыми эффектами. Чтобы меньший объект полностью находился в пределах поля зрения, его центр должен быть в пределах внешнего пунктирного прямоугольника. Центр крупного объекта должен быть в пределах внутреннего пунктирного прямоугольника.

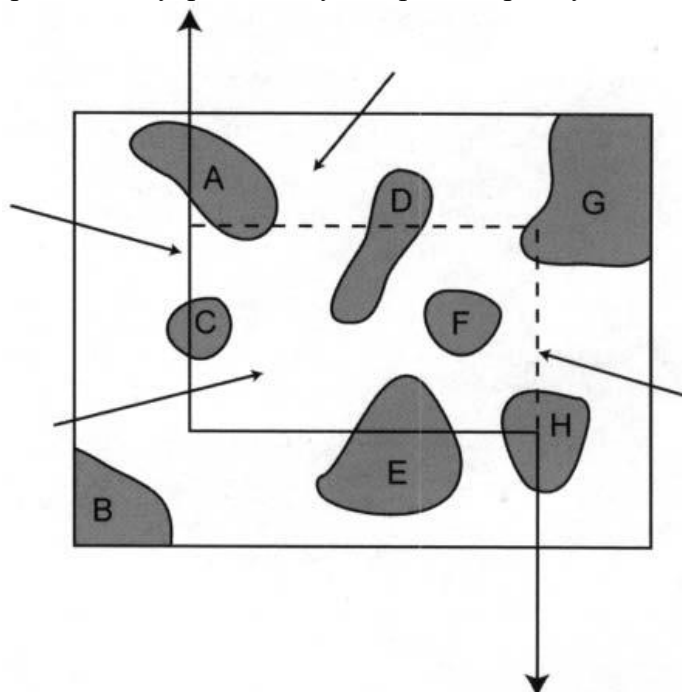


Рис. 2.46. Рамка подсчета количества объектов. Объект учитывают, если он попадает в пределы рамки или пересекает пунктирные линии, но не пересекает край изображения или сплошные линии. В данном случае должны быть учтены только объекты D и F.

2.10. Литература

1. Bolter J.D. (1984), *Tarings Man: Western Culture in the Computer Age*, The North Carolina University Press.
2. Zadeh L.A. (1965), Fuzzy Sets, *Information & Control*, **8**, 338-352.
3. Shannon C.E. and Weaver W. (1949), *The Mathematical Theory of Communication*, Illinois University Press.
4. Bucci W. and Scrupski S. (1968) Special Report: The Transistor, *Electronics*, **41**(4), 71-130.
5. Kilby J.S. (1959), Semiconductor Solid Circuits, *Electronics*, **32**, 110-111.
6. Clarke A.R. (1983), *Vela Software Reference Book*, E.J. Arnold Publishers.
7. Johnson G.W. and Jennings R. (2001), *LabVIEW Graphical Programming*, McGraw-Hill.
8. Ifeachor E.C. and Jervios B.W. (1997), *Digital Signal Processing: A practical approach*, Addison-Wesley.
9. Strum R.D. and Kirk D.E. (1989), *First Principles of Discrete Systems and Digital Signal Processing*, Addison-Wesley.
10. Moravec H. (1998), When will computer hardware match the human brain?, *Journal of Transhumanism*, **1**, March.
11. Berman G.P., Doolen G.D., Mainierie R. and Tsifrionovich V.I. (1998), *Introduction to Quantum Computers*, World Scientific.
12. Russ J.C. (1992), *Computer-Assisted Microscopy: The Measurement and Analysis of Images*, Plenum Press.
13. Huang J., Wang Y. and Wong E.K. (1997), *Check Image Compression: A Comparison of JPEG, Wavelet and Layered Coding Methods*, IEEE.
14. Murray J.D. and van Ryper W. (1994), *Encyclopaedia of Graphic File Formats*, O»Reilly & Associates, Sebastopol, CA, USA.
15. Pennebaker W.B. and Mitchell J.L. (1992), *Jpeg: Still Image Data Compression Standard*, Chapman & Hall.
16. Gonzalez R.C. and Wintz P. (1987), *Digital Image Processing*, Addison-Wesley.
17. Press W.H., Teukolsky A.S., Vetterling W.T. and Flannery B.P. (1992), *Numerical Recipes in C*, Cambridge University Press.
18. Hough P.V.C., Methods and Means for Recognizing Complex Patterns, US Patent 3,069,654.
19. Xu B.G. and Yu L. (1997), Determining fiber orientation distribution in nonwovens with Hough transform techniques, *Text. Res. J.*, **67**(8), 563-571.
20. Ballard D.H. (1981), Generalizing the Hough transform to detect arbitrary shapes, *Pattern Recogn.*, **13**(2), 111-122.
21. Heisenberg W. (1925), Uber quantentheoretische Umdeutung kinematischer und mechanischer Beziehungen, *Z. Phys.*, **33**, 879-893.
22. Topping J. (1962), *Errors of Observation and their Treatment*, Science Paperbacks, Chapman & Hall.
23. Gundersen H.J.G. (1977), Notes on the estimation of the numerical density of arbitrary profiles: the edge effect, *J. Microsc-Oxford*, **111**, 219-223.