

5.3.2. Нахождение оптимального устойчивого полигонального представления кривой	247
5.3.3. Стохастическая монотонная усредненная мера информативности	251
5.3.4. Стохастическая мера информативности по длине	254
5.3.5. Числовые характеристики длин сторон зашумленного многоугольника	255
5.3.6. Оценки числовых характеристик стохастической меры информативности по длине	261
5.3.7. Нахождение наилучших представлений контура с помощью стохастических мер информативности	263
Приложения	266
Приложение 1. Некоторые сведения из дифференциальной геометрии кривых на плоскости	266
П.1.1. Способы задания кривой	266
П.1.2. Касательная к кривой. Длина кривой	267
П.1.3. Кривизна кривой	267
Приложение 2. Расстояния, метрики, нормы, подобности	269
П.2.1. Расстояния и подобности	269
П.2.2. Метрики и нормы	271
Приложение 3. Элементы теории нечетких множеств	273
П.3.1. Нечеткие множества	273
П.3.2. Алгебраические операции над нечеткими множествами и их свойства	276
П.3.3. Обобщения операций над нечеткими множествами	277
П.3.4. Расстояние между нечеткими множествами и степень нечеткости нечеткого множества	281
П.3.5. Нечеткие отношения	285
Приложение 4. Элементы теории монотонных мер	290
П.4.1. Основные понятия и определения	290
П.4.2. Представление монотонной меры в виде линейной комбинации примитивных монотонных мер	292
П.4.3. Вероятностная интерпретация монотонных мер	293
П.4.4. Статистические основы теории монотонных мер	296
П.4.5. Монотонные меры на σ -алгебрах	298
Список литературы	301

ВВЕДЕНИЕ

Интенсивное развитие за последние 40–50 лет технических средств регистрации и обработки изображений привело к бурному росту числа методов и алгоритмов обработки и анализа изображений. По широте используемого математического инструментария эти методы покрывают практически все разделы современной математики. В то же время привлечение разнообразного математического аппарата не всегда сопровождалось качественным анализом разработанных методов и алгоритмов. Как правило, при анализе алгоритмов доминировал статистический подход, параметры алгоритмов выбирались путем обучения по выборке образов некоторого класса. Это зачастую не позволяло найти аналитические закономерности работы алгоритмов для разных классов изображений, определить оптимальные значения параметров, спрогнозировать результаты работы «похожих» алгоритмов или применения алгоритмов для других классов изображений и т. п.

Кроме того, одним из ключевых требований, предъявляемых к методам обработки и анализа изображений, является необходимость учитывать высокую степень неопределенности обрабатываемой графической информации.

Для анализа и распознавания объектов на изображении, как правило, стараются выделить на нем некоторые особенности. При этом различают низкоуровневые и высокоуровневые особенности.

Под низкоуровневыми обычно понимают такие особенности [Nixon, Aguado 2002], которые могут быть выделены на изображении без использования информации о форме объекта или, другими словами, о пространственном расположении отдельных частей объекта. Напротив, для выделения высокоуровневых признаков используется информация о пространственном расположении как объекта, так и отдельных его частей. Можно сказать, что низкоуровневые особенности являются в некотором смысле локальными признаками объекта, а высокоуровневые — глобальными.

К низкоуровневым особенностям относят прежде всего края изображения, кривизну кривой, описывающей край объекта и некоторые другие.

Под высокоуровневыми особенностями понимают, как правило, форму объекта или некоторое, удобное для дальнейшего анализа, пред-

ставление этой формы объекта. Часто высокоуровневые особенности на изображении выделяют путем анализа и обработки низкоуровневых особенностей.

При выделении как высокоуровневых, так и низкоуровневых особенностей на изображении следует учитывать, что реальное изображение практически всегда является зашумленным. Причины шумов на изображении могут быть разными; природа возникновения шумов, а также их характер достаточно подробно проанализированы в научной литературе [Прэтт 1982; Young et al. 1998]. Однако значительно меньше внимания в литературе уделено вопросам влияния зашумления на выделение низкоуровневых и высокоуровневых особенностей на изображении. Одна из целей настоящей монографии — восполнить этот пробел. В частности, будут рассмотрены основные подходы к вычислению оценок кривизны плоской оцифрованной зашумленной кривой и вычислены такие качественные характеристики случайной оценки кривизны, как систематическая ошибка, случайная ошибка и смещение. Анализируя эти качественные характеристики, можно сделать вывод, какие из существующих подходов будут предпочтительны при вычислении оценок кривизны, учитывая уровень зашумления изображения, его характер, скорость обработки, вид изображения, цель использования оценок кривизны и другие факторы.

В гл. 1 рассматриваются основные подходы к выделению низкоуровневых и высокоуровневых особенностей на изображении. При этом основное внимание уделено методам и алгоритмам оценивания кривизны плоской оцифрованной кривой — важнейшей низкоуровневой особенности контурного изображения. В частности, выделены два основных подхода: локально-интерполяционные и локально-аппроксимативные методы оценивания кривизны. Необходимые для понимания материала сведения из теории кривых приведены в приложении 1.

В гл. 2 проанализированы точность и устойчивость к зашумлению некоторых «модельных» алгоритмов, реализующих основные схемы вычисления локально-интерполяционных и локально-аппроксимативных оценок кривизны.

Для получения компактных представлений объектов изображения низкоуровневые признаки изображения агрегируются. В результате получаются высокоуровневые представления и описания изображений объектов. Можно говорить как о формировании представлений отдельных объектов на изображении, так и о формировании представлений изображения в целом. При этом к таким представлениям в первую очередь предъявляются требования инвариантности их относительно множеств тех или иных преобразований (поворотов, смещений, освещенности). Кроме того, такие представления должны быть достаточно компактными и полными с точки зрения сохранения количества информации об объекте.

В гл. 3 рассмотрены способы векторного представления и описания кривых на изображении, а также проанализирована степень устойчивости таких представлений к зашумленности кривых. Кроме того, в этой главе рассмотрен так называемый нечеткий (т. е. использующий теорию нечетких множеств) подход к описанию неопределенности расположения информативных точек на зашумленных кривых. Необходимые сведения из теории нечетких множеств приведены в приложении 3. Нечеткий подход в гл. 3 используется для постановки и решения задачи о нахождении оптимальных в некотором смысле представлений дискретной плоской зашумленной кривой методом нечеткой кластеризации.

Кроме описания и представления отдельных объектов (например, кривых) на изображении в теории и практике анализа изображений широко используются и методы представления изображений в целом. Одним из подходов, зарекомендовавшим свою эффективность при решении ряда задач анализа изображений, является так называемое знаковое представление изображения. Знаковые представления изображений применяются, в частности, в задачах детекции и распознавания лиц [Гончаров, Каркищенко 2008; Goncharov, Gubarev 2008]. Использование знакового представления изображений оказалось эффективным и при поиске нечетких дубликатов в больших коллекциях изображений [Goncharov, Melnichenko 2008]. Сама по себе идея перехода от исходного представления сигнала или изображения к знакам некоторого функционала не нова, она достаточно широко используется как в распознавании образов, так и в анализе случайных процессов. Например, одним из аналогов знакового представления является описание формы объекта с помощью цепного кода, рассмотренного впервые Фрименом [Freeman 1974]. Близким аналогом знакового представления является хорошо известный морфологический подход, предложенный Ю.П. Пытьевым [Пытьев 1983; Пытьев, Чуликов 2010]. Однако системного изучения свойств знакового представления до настоящего времени не предпринималось. При этом наибольший интерес представляет вопрос: насколько при переходе к знаковому представлению мы теряем информацию, содержащуюся в изображении, и насколько при этом повышается степень устойчивости знакового представления к зашумленности, к условиям освещенности и т. п.? Поиску ответа на этот вопрос посвящена гл. 4, в которой исследованы как информативные свойства знаковых представлений с помощью так называемых мер информативности, так и мера устойчивости знаковых представлений к зашумленности изображения.

В гл. 5 проанализирована степень сохранения полноты информации об объекте при выборе того или иного представления. В теории распознавания образов проблема нахождения оптимального в определенном смысле представления изображения решается в задаче выбора информативных признаков (характеристик) образа. Хорошо известны

традиционные способы решения такой задачи: корреляционный анализ данных (метод главных компонент), дискриминатный анализ. Однако успешность применения этих методов зависит от наличия ряда факторов: линейной структуры в пространстве признаков, достаточно большой выборки данных для анализа, независимости данных и пр. Эти требования не всегда выполнимы в реальных задачах. Поэтому в гл. 5 рассмотрен другой подход к решению задачи выбора наиболее информативных признаков, который не является столь требовательным к исходным данным. Этот подход предполагает рассмотрение на множестве всех упорядоченных подмножеств точек дискретной кривой некоторой функции множеств, называемой мерой информативности, которая удовлетворяет определенным условиям монотонности, нормировки и инвариантности к группе преобразований. В книге мы ограничимся только исследованием задачи выбора информативных признаков на контурных изображениях, хотя сам подход может быть применен к решению аналогичной задачи и для других классов объектов. Меры информативности — это некоторый подкласс хорошо известных в теории неточных вероятностей так называемых монотонных мер (по другой терминологии такие меры еще называют неаддитивными или нечеткими). Дополнительные сведения из теории монотонных мер можно найти в приложении 4. Основное внимание в гл. 5 будет уделено следующим задачам: исследование конкретных мер информативности контура по длине, по площади, по кривизне; нахождение оптимальных в определенном смысле полигональных представлений с помощью мер информативности и исследование соответствующих алгоритмов; исследование изменений мер информативности при вероятностном зашумлении кривой.

Основная цель написания этой книги — проанализировать на единой методической основе неопределенности, связанные с выделением информативных признаков и формированием представлений изображений. Такой анализ, по нашему мнению, будет полезен разработчикам новых алгоритмов выделения низкоуровневых особенностей на изображениях и формирования различных представлений и описаний изображений. Кроме того, книга должна заинтересовать разработчиков систем анализа и распознавания изображений, поскольку в ней содержится полезная информация о возможностях, устойчивости к зашумлениям и полноте информации тех или иных способов выделения низкоуровневых и формирования высокоуровневых представлений. Книгу также можно рекомендовать как источник новых задач и материал к спецкурсам для студентов, бакалавров и магистров, обучающихся по специальностям «прикладная математика и информатика», «информационные системы», «интеллектуальный анализ данных» и др. Наконец, она может заинтересовать тех, кто работает в области обработки и анализа изображений или интересуется этими задачами.

В книге приводится много результатов. Учитывая, что в большинстве случаев используемые методы важнее собственно результатов, мы старались почти везде приводить строгие доказательства, имея в виду, что применяемая математическая техника может оказаться полезной при решении аналогичных задач, возникающих как при анализе устойчивости к зашумлению низкоуровневых особенностей и высокоуровневых описаний изображений, так и при выборе наиболее информативных представлений образов в целом.