

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ

УДК 522.61 : 771.534 : 531 : 429 : 621.391 : 681.515.8

В. С. КИРИЧУК, В. П. КОСЫХ, Ю. Е. НЕСТЕРИХИН, Н. С. ЯКОВЕНКО

(Новосибирск)

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОПЕРАТИВНОЙ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Введение. Выделение обработки изображений в самостоятельную область применения ЭВМ обусловлено структурой исходной информации и спектром решаемых задач. В общем случае под цифровой обработкой изображений понимается преобразование двумерных функций, заданных на дискретной решетке, с целью улучшения качества, восстановления изображений и выделения количественной информации об объектах и явлениях. Двумерность исходной информации и необходимость оперативного получения конечных результатов анализа выдвигают ряд требований к функциональным возможностям систем, предназначенных для цифровой обработки изображений. Основными из них являются:

оперативность представления изображений в виде цифровых массивов и рационального размещения их в памяти;

высокая скорость выполнения операций над изображениями, что определяется как объемом перерабатываемой информации, так и условиями анализа в реальном времени;

наличие оперативного контроля за процессом обработки, необходимого в силу использования в практических задачах эвристических алгоритмов, а также для непосредственного включения интеллекта и опыта человека;

возможность распараллеливания обработки как по данным, так и по операциям.

Выполнение этих требований связано с необходимостью разработки: широкого класса устройств ввода/вывода и отображения информации; оперативных (емкостью до десятков мегабайт) и долговременных (до тысяч мегабайт) устройств хранения изображений, представленных в цифровом виде; специализированных вычислительных средств для реализации типичных преобразований изображений; системного и специального математического обеспечения, ориентированного на законченный цикл обработки. (Здесь следует отметить одну специфическую особенность программных средств развиваемых комплексов обработки: использование их для выявления и отработки типовых алгоритмов, которые целесообразно выполнять с помощью спецвычислителей.)

В цели настоящей статьи входят определение характерных задач, возникающих при создании основных подсистем «широкодиапазонных» комплексов оперативной обработки изображений, краткая аннотация полученных в этой области результатов, а также обсуждение перспективных направлений развития.

1. Одно из основных требований к гибким многофункциональным системам оперативной обработки изображений — это наличие устройств ввода, перекрывающих по своим характеристикам весь диапазон возможных представлений исходной информации. При этом нужны как

средства ввода изображений, зарегистрированных на промежуточных носителях, так и системы непосредственного ввода реальных визуальных изображений для ввода изображений видимого диапазона, характеристики (точность и скорость ввода, рабочее поле и т. п.) и функциональные возможности которого соответствуют потребностям, возникающим при решении весьма широкого класса задач. Среди них можно отметить такие разработки, как «Зенит-2», «Зенит-К», «Ромб», «СО₂-Ромб», цифровая телевизионная видеосистема. Так, установки типа «Зенит» [1, 2] обеспечивают режим произвольного доступа к элементам изображения, зарегистрированного на прозрачном носителе, с точностью позиционирования до 1 мкм и разрешением до 1,5 мкм. Это позволяет проводить прецизионную обработку изображений с использованием гибких алгоритмов, обращающихся к изображению как к внешней памяти ЭВМ: полностью отпадает необходимость в таком времязатратном этапе, как переписывание массива изображения; существенно сокращаются затраты на обмен информацией в процессе обработки между оперативной памятью и дисковыми накопителями. Устройства типа «Ромб» [3, 4], не предусматривающие режима произвольного доступа, рационально использовать в задачах, требующих сплошного считывания изображений (например, для фрагментарной классификации). В системе* датчиком изображений является телевизионная камера, а ввод информации осуществляется в реальном времени (минуя промежуточный носитель).

Достигнутые параметры аппаратуры ввода изображений в основном достаточны для построения входных подсистем современных комплексов цифровой оперативной обработки. Дальнейший прогресс здесь, по-видимому, должен заключаться в создании датчиков изображений, обладающих широким спектральным диапазоном и обеспечивающих максимум удобств при обработке.

2. В автоматизированных комплексах обработки изображений специфичными являются требования к аппаратным и программным средствам отображения и вывода информации. Во-первых, необходимо (особенно при использовании эвристических алгоритмов) располагать развитыми дисплейными системами, позволяющими работать в интерактивном режиме с крупными массивами видеоданных. Во-вторых, результаты обработки, подлежащие документированию, как правило, также представляют собой изображения (графические или полутонные).

В комплексе, функционирующем в ИАиЭ СО АН СССР [5, 6], в качестве инструмента оперативного просмотра визуальной информации в процессе решения задач обработки использовались черно-белые и цветные КАМАК-дисплеи (типа [6, 7]) и телевизионная система с автономной памятью. Практический опыт показал, однако, что необходимо создание специализированных дисплейных процессоров с применением видеобuffers, сочетающих визуализацию изображения с высоким разрешением (1024×1024 точки и более) с выполнением ряда арифметических операций в процессе развертки кадра — амплитудные преобразования, «сортировки» по амплитудам (вычисление гистограмм и т. п.).

Для вывода графической информации (например, в задачах картирования) применяется графопостроитель-кодировщик «Планшет» [8], являющийся в ряде случаев и удобным устройством ввода. Вывод полутонных изображений осуществляется с помощью устройств типа

* Беломестных В. А. и др. Цифровая телевизионная видеосистема. (См. следующий выпуск журнала).

«Ромб». Отметим важную особенность последней модификации этой системы «СО₂-Ромб»: с помощью лазерного луча возможен вывод информации на различные носители, не требующие проявления.

3. Главная трудность организации оперативной обработки изображений состоит в том, что использование для этих целей традиционных структур, базирующихся на высокопроизводительных универсальных ЭВМ, является малоэффективным: слишком велик объем перерабатываемой информации. В то же время многие характерные операции над изображениями достаточно естественно распараллеливаемы и могут быть «поручены» специализированным арифметическим процессорам, способным обеспечить резкое (на два-три порядка) увеличение скорости их реализации по сравнению с универсальными ЭВМ. Ниже будут рассмотрены некоторые классы подобных операций, для которых построение спецвычислителей — наиболее актуальная (и вполне реалистичная) задача.

Под *поточечными амплитудными преобразованиями* принято понимать операции, при которых оптическая плотность элемента результирующего изображения зависит только от плотности соответствующего элемента исходного изображения (и не зависит от координат элемента). К этому же классу относятся арифметические и логические операции над несколькими изображениями. Амплитудные преобразования, как отмечалось выше, наиболее естественно производить с помощью дисплейных процессоров (примеры такой реализации приведены в [9]).

Локальные операции над изображениями характеризуются тем, что результат преобразования элемента с координатами (x, y) зависит от оптической плотности исходного изображения как в этой точке, так и в некоторой ее окрестности. В настоящее время на практике наиболее широко применяются линейные локальные преобразования (типа свертки в заданном базисе), предназначенные для решения задач цифровой фильтрации изображения, при использовании корреляционных методик и т. п. В созданном в ИАиЭ СО АН СССР процессоре свертки [12] удалось за счет использования табличных вычислений и параллельности обработки целого фрагмента изображения обеспечить эквивалентную производительность порядка $2 \cdot 10^6$ опер./с. Актуальной проблемой является создание линейного спецпроцессора с быстродействием 50—100 млн опер./с.

Морфологические преобразования изображений [10], являющиеся весьма эффективным средством решения большого круга задач, связанных с изучением формы, размеров и взаимного расположения объектов, представляют собой практически важный класс нелинейных локальных преобразований. Реализация соответствующих алгоритмов на универсальных ЭВМ сопряжена с определенными сложностями: во-первых, они достаточно трудоемки (как в силу того, что применяются к большим массивам, так и из-за итеративности); во-вторых, возникают проблемы с рациональным размещением данных в памяти ЭВМ: в основе преобразований лежат многочисленные сдвиги изображений. Это обусловило работы по созданию специализированных морфологических процессоров (их обзор содержится, например, в [11]). Описание макетного варианта процессора, разработанного в ИАиЭ СО АН СССР, приведено в [12].

Выполнение *интегральных преобразований*, являющихся составной частью многих задач статистической обработки изображений (определение корреляционных функций, спектральных характеристик, моментов и т. п.), также представляет собой область рационального использования спецвычислителей. Для этих целей применяются как универсальные векторные процессоры с конвейерной организацией (типа [13]), так и узкоспециализированные (например, процессоры, осуществляющие быстрое преобразование Фурье).

И наконец, пожалуй, наиболее трудоемкий класс операций — геометрические преобразования изображений (повороты, проективные пре-

образования, переход к новым системам координат и т. п.). Они составляют заметную долю вычислений в таких задачах, как исследование временной динамики последовательности изображений, устранение искажений, привносимых аппаратной функцией оптических регистрирующих устройств и т. п. Для оперативного решения подобных задач специализированный «геометрический» процессор просто необходим.

Специфический характер вычислительных средств, используемых при оперативной обработке изображений, определяет принципиальное значение выбора рациональной архитектуры автоматизированных комплексов, в которых универсальные ЭВМ с присущей им гибкостью и широкими логическими возможностями сочетаются с быстродействующими специализированными процессорами. Основными архитектурными требованиями здесь являются эффективность управления потоками заданий и данных, возможность расширения и модификации.

Наиболее перспективной в настоящее время представляется конфигурация, основанная на использовании для внутрисистемного обмена каналов, аналогичных каналу «Общая шина» старших моделей ЭВМ семейства «Электроника». Для построения комплекса с потенциальной производительностью ~ 100 млн опер./с требуемая пропускная способность каналов должна составлять 32—64 Мбайт/с.

4. Для иллюстрации рассматриваемого подхода проанализируем алгоритм решения одной из типичных и актуальных задач обработки — поиск отличий в серии изображений. Исходные данные представляют собой изображения одной и той же сцены, полученные в разных ракурсах, в различные моменты времени и в общем случае разных масштабов. Необходимо выявить значимые изменения этих изображений. Процедура решения распадается на ряд этапов. Прежде всего, требуется привести все изображения к единой системе координат. Для этого на них определяются идентичные элементы (реперные точки). Поиск реперов обычно состоит из двух стадий: грубой оценки, выполняемой оператором в диалоговом режиме (это бывает необходимо при разномасштабности изображений, значительных поворотах и т. п.), и ее уточнения с помощью реализуемых автоматически корреляционных алгоритмов (здесь, как правило, используются специализированные линейные процессоры).

Следующий этап — определение геометрического преобразования изображений, обеспечивающего их координатное совмещение. В тех случаях, когда априорная информация достаточна для задания вида функциональной зависимости (например, если известно, что все изображения получены в одинаковых условиях и различаются лишь «углом зрения» на сцену), задача сводится к оценке конечного числа параметров этой зависимости. В более общей ситуации для нахождения преобразования приходится прибегать к достаточно сложным интерполяционным процедурам. Этот этап естественно выполняется чисто программными методами на универсальных ЭВМ.

Проведение собственно геометрического преобразования изображений сопряжено с заметными трудностями: во-первых, оно применяется к массивам большой размерности, во-вторых, необходимо учитывать возможность несовпадения полученных в результате преобразования значений координат с узлами дискретной решетки (а связанная с этим обстоятельством коррекция довольно сложна [14]). Опыт решения практических задач, в которых широко применяются геометрические преобразования, показал, что их программная реализация приводит к значительным временным затратам на обработку; это стимулировало постановку работ по созданию специализированного процессора.

Далее необходимо осуществить амплитудную коррекцию изображений, чтобы скомпенсировать различия в условиях их регистрации, определяющих яркость изображений. Здесь, как правило, используются статистические процедуры, опирающиеся на анализ одномерных и двумерных гистограмм оптической плотности и направленные на оценку

амплитудного преобразования, обеспечивающего совмещение по яркости идентичных фрагментов разных изображений.

Заключительный этап — поиск значимых отличий с последующей классификацией — является наиболее нестандартной частью алгоритма, существенно зависящей от специфики конкретной задачи. По этим причинам ограничимся лишь обсуждением возможностей использования для данных целей специализированных процессоров. В функции процессора свертка здесь могут входить: подавление высокочастотных шумов, выявление низкочастотной составляющей фона, линейная согласованная цифровая фильтрация. Морфологический процессор оказывается полезным для устранения ошибок геометрического преобразования, локализации области теней, селекции объектов по форме и амплитуде.

Апробирование на реальной и тестовой информации алгоритмов поиска точечных (локальные образования заданной формы) и «протяженных» отличий показало работоспособность изложенной выше методики и эффективность применения при ее реализации разработанных специализированных процессоров.

Заключение. Рассмотренные методологические принципы широко применяются в системе цифровой обработки изображений, созданной в ИАиЭ СО АН СССР в рамках Центра обработки данных. Эта система в настоящее время представляет собой проблемно-ориентированный вычислительный комплекс, оснащенный разнообразной аппаратурой для ввода/вывода информации. Совместно с рядом заинтересованных организаций на комплексе был выполнен ряд исследований разнопрофильных задач, связанных с обработкой изображений: интерпретация аэрокосмических данных о лесных массивах [15] и геологических структурах [16]; обработка астронегативов [17], статистический анализ кристаллических микроструктур [18] и биологических объектов [19].

Основные направления дальнейшего развития системы: создание набора высокопроизводительных специализированных процессоров и структуры, обеспечивающей наиболее полное использование их возможностей; разработка тематических пакетов прикладных программ для реализации полного цикла решения целевых задач.

ЛИТЕРАТУРА

1. Нестерихин Ю. Е. и др. Автоматизированный комплекс обработки изображений.— Автометрия, 1980, № 3.
2. Обидин Ю. В., Потаников А. К. Аппаратные средства комплекса обработки изображений «Зенит-2». — В кн.: Методы и средства обработки изображений. Новосибирск: ИАиЭ СО АН СССР, 1982.
3. Васильев С. Т. и др. Прецизионная система ввода/вывода изображений на ЭВМ.— Автометрия, 1977, № 2.
4. Бессмельцев В. Л. и др. Лазерное устройство вывода информации из ЭВМ в виде типографских форм.— Автометрия, 1982, № 2.
5. Анистратенко А. А. и др. Центр обработки данных.— Автометрия, 1982, № 6.
6. Золотухин Ю. Н., Якушев В. С. Привод телевизора.— В кн.: Автоматизация научных исследований на основе применения ЭВМ: Тез. докл. V Всесоюз. конф. Новосибирск: ИАиЭ СО АН СССР, 1979.
7. Якушев В. С. Цветной телевизионный КАМАК-дисплей.— Автометрия, 1984, № 7.
8. Александров В. П. и др. «Планшет» — устройство ввода/вывода графической информации.— Автометрия, 1976, № 1.
9. Ридер К., Хаббер Л. Направление развития видеодисплейных систем.— ТИИЭР, 1981, т. 69, с. 134—146.
10. Serra J. Image analysis and mathematical morphology.— N. Y.: Academic Press, 1980.
11. Duff M. J. B., Levialdi S. Languages and architectures for image processing.— L.— N. Y.: Academic Press, 1981.
12. Косых В. П., Пустовских А. И., Тарасов Е. В., Яковенко Н. С. Морфологический процессор.— Автометрия, 1984, № 4.
13. Бродский И. И. и др. Высокопроизводительный периферийный векторный процессор А-12.— Там же.
14. Прэтт У. Цифровая обработка изображений.— М.: Мир, 1982.
15. Иванов В. А., Иванченко Г. А. Математическое обеспечение статистического анализа аэрофотоснимков леса.— Автометрия, 1982, № 4.

16. Иванов В. А., Чащин С. В. Идентификация и выделение геологических образований в диалоговом режиме.— В кн.: Космические методы изучения природной среды Сибири и Дальнего Востока. Новосибирск: Наука, 1983.
17. Киричук В. С., Кушнир М. В., Яковенко Н. С. Определение лучевых скоростей в атмосфере Солнца с помощью фотометрического автомата «Зенит-2».— Солнечные данные, 1981, № 11.
18. Kiselev N. A. et al. Computer averaging of 50S ribosomal subunit electron micrographs.— J. Mol. Biol., 1983, vol. 169, p. 345—350.
19. Косых В. П., Леонова В. Г., Пустовских А. И. Применение комплекса автоматизированного анализа микроизображений для изучения возрастной динамики рас-

УДК 681.327 : 681.3.06

В. П. КОСЫХ, А. И. ПУСТОВСКИХ, Е. В. ТАРАСОВ, Н. С. ЯКОВЕНКО

(Новосибирск)

МОРФОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕССОР

1. В последние годы возникло интересное направление в проблематике анализа изображений, базирующееся на сравнительно недавно появившейся области математики, названной математической морфологией [1, 2]. Математическая морфология, опираясь на несколько весьма общих принципов, предлагает теоретико-множественный подход к количественному описанию характеристик изображения и на его основе строит аппарат, позволяющий выполнять достаточно широкий класс операций над изображениями, рассматриваемыми как множества, заданные в некотором векторном пространстве.

2. Ниже будут кратко рассмотрены некоторые важные понятия математической морфологии и пояснены их содержательные приложения к обработке изображений. Количественное описание исследуемого множества (изображения) базируется на его преобразовании с помощью некоторого набора эталонных множеств — структурных элементов. Структурным элементом называется множество $B = (B^1, B^2)$, состоящее из пары непересекающихся подмножеств — B^1 и B^2 . Структурный элемент, начало которого помещено в точку x пространства, обозначим через B_x . Сначала рассмотрим важный частный случай, когда в структурном элементе одно из подмножеств пусто. Операция дилатации (dilation) множества X посредством структурного элемента B определяется следующим образом:

$$Y = X \oplus B = \{x : B_x \cap X \neq \emptyset\}. \quad (1)$$

Например, результатом дилатации множества X (рис. 1, а) посредством структурного элемента B , представляющего собой круг радиусом r (рис. 1, б), является множество, «расширенное» относительно исходного на полосу шириной r (рис. 1, в). Двойственная дилатации операция называется эрозией (erosion):

$$Y = X \ominus B = \{x : B_x \subset X\}. \quad (2)$$

Результат эрозии с помощью того же структурного элемента иллюстрируется рис. 1, г.

Из определений (1) и (2) непосредственно следует:

$$X \ominus B = (X^c \oplus B)^c, \quad (3)$$

т. е. эрозия множества X приводит к дилатации его дополнения X^c .