

УДК 681.327

Р.Х. Садыхов, А.А. Дудкин

Объединенный институт проблем информатики НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь
rsadykhov@gw.bsuir.unibel.by, doudkin@newman.bas-net.by

Обработка изображений и идентификация объектов в системах технического зрения

Рассмотрены методы обработки изображений и распознавания, ориентированные на применение в системах технического зрения (СТЗ). Представлена типовая структура СТЗ и описан ряд программных систем обработки изображений, разработанных в лаборатории идентификации систем ОИПИ НАН Беларуси.

Введение

Автоматическая обработка визуальной информации является одним из важнейших направлений в области искусственного интеллекта. Интерес к проблемам компьютерной обработки определяется расширением возможностей как самих компьютерных систем, так и разработкой новых технологий обработки, анализа и идентификации различных видов изображений. При этом для создания эффективных технологий разрабатываемые методы и алгоритмы должны удовлетворять ряду требований по быстродействию и точности. Обычно каждый алгоритм, обладая определенными характеристиками, «специализируется» на своем типе изображения. Поэтому в системах технического зрения (СТЗ) необходимо сочетание нескольких методов, которые решают одну и ту же задачу различными способами, обеспечивая при этом необходимые показатели по быстродействию и достоверности идентификации. В свою очередь, для эффективного функционирования СТЗ необходимо постоянное пополнение арсенала методов и средств предварительной обработки, сжатия изображений и построения классификаторов, что обуславливает необходимость открытости указанных систем, а также потребность в инструментарии для их проектирования [1-3].

В лаборатории идентификации Объединенного института проблем информатики НАН Беларуси более десяти лет ведутся исследования, посвященные разработке методов и программных средств обработки и идентификации изображений. В данной работе описываются результаты, полученные для решения каждого из названных выше этапов, которые позволили создать оригинальную технологию обработки и идентификации изображений. Разработанный комплекс методов и эффективных алгоритмов скелетизации, фильтрации и выделения информативных признаков объектов на изображениях основан на использовании спектральных моделей дескрипторов формы. Методы и алгоритмы идентификации изображений и пространственных образов базируются на геометрических моментных функциях, преобразованиях Хафа, Хартли и Фурье–Меллина, которые по сравнению с известными значительно повышают быстродействие системы идентификации изображений при той же достоверности распознавания. В завершение описывается технология проектирования систем идентификации изображений, основу которой составляет объектно-ориентированный подход для моделирования и анализа процессов обработки информации, и приводится ряд систем идентификации.

Функциональная схема системы технического зрения

Общая функциональная схема СТЗ приведена на рис. 1. Изображение объекта через оптический прибор передается на преобразователь свет-сигнал, электрический сигнал в устройстве первичной обработки изображения усиливается и запоминается.

Устройство анализа изображения (вторичной обработки) служит для выделения и распознавания объекта, определения его координат и положения. При необходимости обработанная информация об объекте высвечивается на устройстве визуального контроля. На основе полученной информации контроллер связи выбирает управляющие сигналы, приводящие в действие исполнительные механизмы, осуществляющие целенаправленное воздействие на объект. Кроме того, СТЗ может осуществлять запись результатов анализа изображения на носители информации и вывод на печатающее устройство.

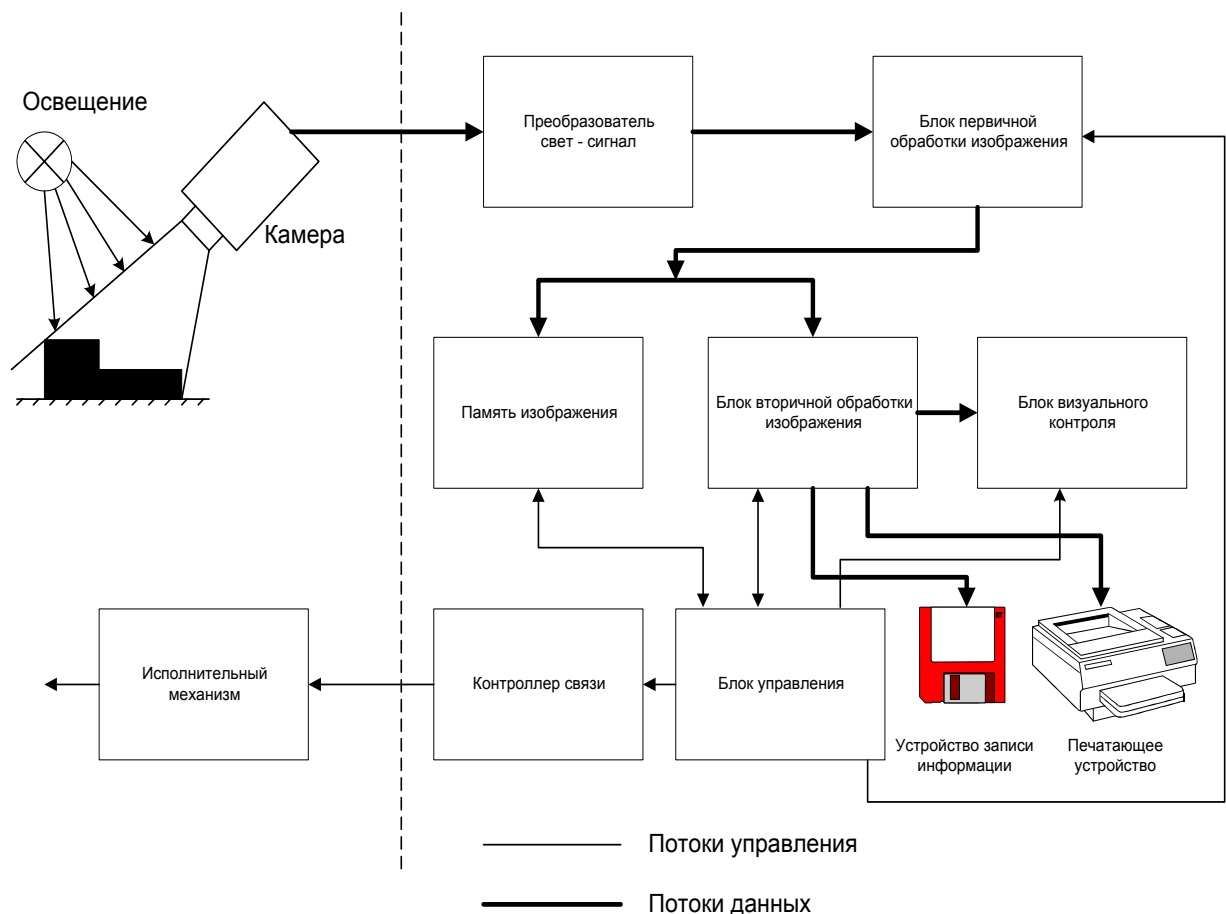


Рисунок 1 – Функциональная схема СТЗ

Важной частью системы является блок управления. В его функции входит управление параметрами блоков обработки, а также синхронизация процессов, выполняющихся в системе.

Базовые методы обработки изображений: формирования, сегментации, описания и анализа – представлены на структурной схеме обработки (рис. 2).

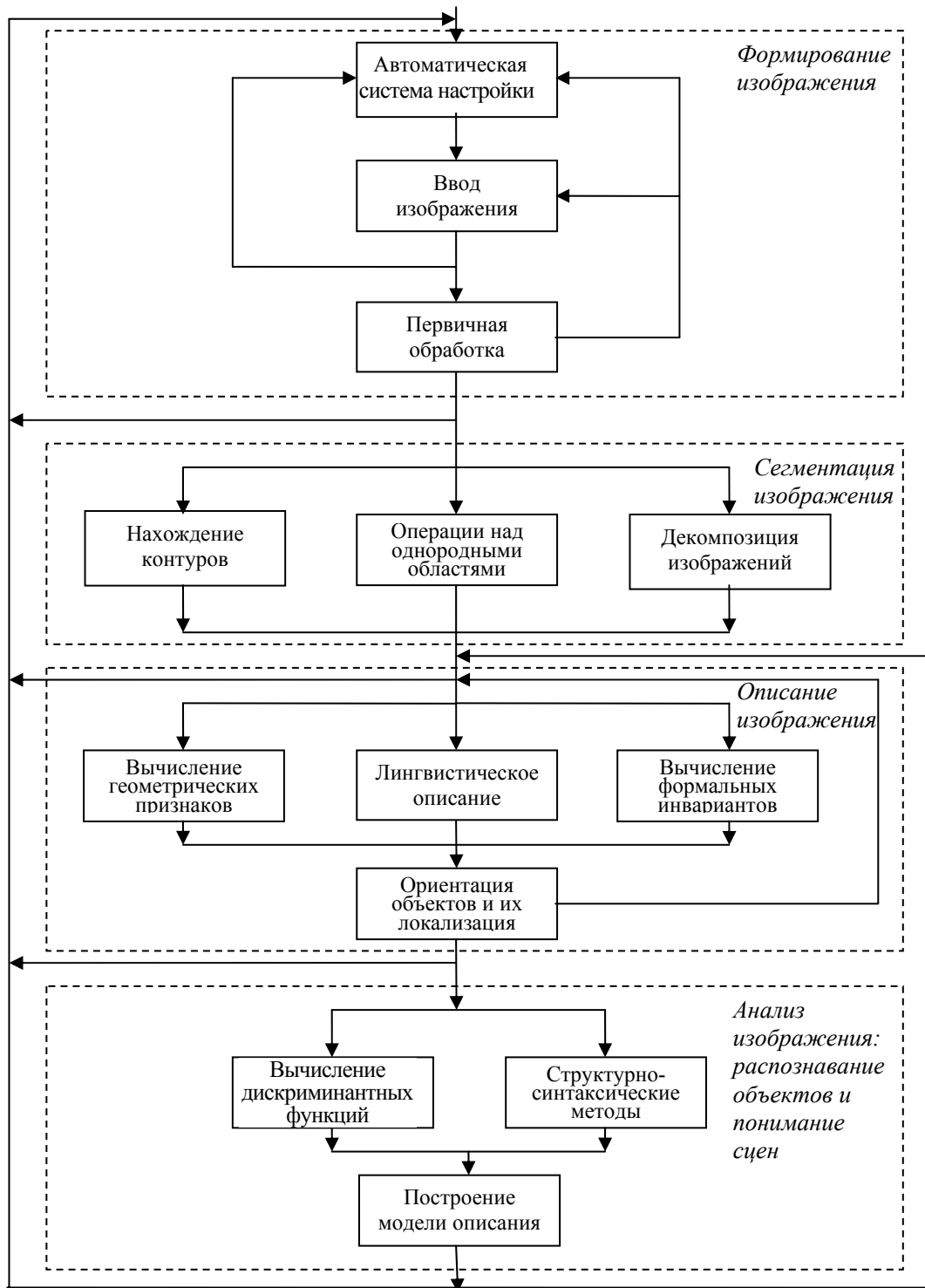


Рисунок 2 – Структурная схема обработки изображений

Первичная обработка и сегментация изображений

Большинство изображений характеризуется наличием мешающего фона, а также неопределенностью положения и ориентации отдельных элементов, приводящих к большой избыточности, что диктует необходимость использования методов предвари-

тельной обработки изображений: фильтрации, сглаживания, скелетизации. Как правило, эффективные методы удается получить с учетом специфики изображений той или иной предметной области: рукописные цифры и буквы, подписи, топологический слой или фотошаблон интегральной схемы, автомобильный номерной знак и т.д. Тем не менее, нами разработаны базовые алгоритмы, которые можно достаточно эффективно использовать для обработки различных изображений.

Основу обработки составляют быстрые алгоритмы вычисления дескрипторов в различных ортогональных базисах [4], алгоритмы фильтрации на основе преобразований Уолша, Хаара и Адамара [5-8], которые могут быть отображены на параллельные вычислительные структуры систолического типа [9].

Наряду с общими методами обработки предлагаются методы, ориентированные на конкретную область приложения.

Обработка фотошаблонов и топологических слоев интегральной схемы. Изображение слоя интегральной схемы представляется совокупностью перекрывающихся кадров. Изображения различных слоев (металлизации, поликремниевых и диффузионных) существенно различаются как по цветовым характеристикам, так и по форме объектов. Чтобы учесть особенности изображений, алгоритмы обработки слоя являются параметрически настраиваемыми [10-12], причем шаги алгоритма также могут варьироваться. Общая схема обработки кадра изображения включает следующие этапы:

1. Бинаризация.
2. Предварительная медианная фильтрация в окне заданного типа и размера с максимальным количеством выполняемых итераций до десяти выполняется для устранения шумовых составляющих вдоль границ объектов и для размытия изображения.
3. Коррекция гистограммы по яркости с целью устранения теней вдоль границ объектов.
4. Гауссовская фильтрация с заданными параметрами (размер оператора, сигма, количество итераций) для более сильного размытия изображения.
5. Фильтрация, учитывающая тип слоя и размеры объектов.
6. Пороговое разделение изображения и выделение контуров. Значения порогов выбирается автоматически, в соответствии с гистограммой распределения значений интенсивностей исходного изображения. Повышение качества бинарного изображения – устранение вкраплений, выравнивание граничных линий. Данный этап включает операции расширения и сжатия, количество которых является параметром.

Для получения полного описания из совокупности кадров разработан ряд алгоритмов сшивки кадров и построения общего векторного описания и его корректировки с учетом конструкторско-технологических ограничений [13], [14].

Обработка изображений рукописных символов и подписей. Разработан структурный метод и алгоритмы устранения разрывов, имеющих место в изображениях рукописных символов, позволяющий существенно (до 95 %) повысить достоверность при распознавании рукописных символов [15], [16]. В алгоритме [17] предварительно решается задача скелетизации. Устранение разрывов осуществляется в два этапа: непосредственно после скелетизации выполняются морфологические операции, а затем выполняется аппроксимация символа отрезками, строится его графовое описание для окончательного устранения разрывов.

Для обработки подписей разработаны алгоритмы синтеза синтетических дискриминантных функций в редуцированном пространстве признаков, использование которых позволяет улучшить кластеризацию данных на основе одно- и двумерного преобразования Адамара [7].

Обработка регистрационных номеров на транспорте. Разработан ряд методов и алгоритмов для устранения размытости, выравнивания и растягивания гистограмм, фильтрации и бинаризации изображений регистрационных знаков [18] и вагонных номеров [19].

Выделение и описание контуров сегментов

Быстрые алгоритмы выделения контуров на основе 2D-функций Уолша и Хаара [19] по сравнению с градиентными алгоритмами дают более узкую контурную линию, т.к. обработка изображения производится окном с меньшим размером, и обладают высоким быстродействием. Кроме того, при использовании функций Уолша нет необходимости в пороговой обработке и соответственно выборе величины порога, что является одним из ключевых вопросов при определении контуров градиентными операторами, а функции Хаара позволяют выделять контуры на слабоконтрастных изображениях.

Двумерные ортогональные функции используются также для идентификации рукописных символов в качестве спектральных дескрипторов формы.

Из множества ортогональных преобразований рассмотрены дискретные функции Уолша и Хаара. Это связано в первую очередь с тем, что базисные функции указанных преобразований принимают значения $+1$, -1 и $+1$, -1 , 0 соответственно и естественным образом отображаются на элементы цифровой вычислительной техники и дают дополнительные возможности для ускорения вычислений.

Для описания областей, выделенных контурными линиями, предлагается метод аппроксимации прямолинейными сегментами [20], [21], который включает следующие этапы:

- вычисление преобразования Хафа,
- выделение максимумов в пространстве преобразования Хафа,
- поиск «точек-кандидатов» на излом, являющихся точками пересечения прямых и расположенных в поле изображения,
- покрытие изображения «элементарными» областями,
- определение цвета каждой «элементарной области»,
- слияние «элементарных областей»,
- удаление «лишних» точек, не являющихся точками излома, и получение окончательного векторного описания сегментированных областей.

Данный алгоритм выделения информативных признаков позволяет в сравнении с известными алгоритмами значительно повысить скорость распознавания и снизить требования к памяти. В свою очередь, указанные информативные признаки обладают инвариантными свойствами по отношению к группе аффинных преобразований: поворота и масштабирования.

Для описания объектов, заданных в виде скелета, в [22] предлагается метод упрощенного описания, основанный на последовательностях примитивов, представляющих собой изгиб кривой определенного направления. Для каждой последовательности примитивов можно определить числовую характеристику, основанную на величине ее поворота. При этом поворот оценивается по разности углов биссектрис каждого угла кривой. Такой подход более устойчив к геометрическим искажениям, чем простая разность углов примитивов.

Для упрощения расчетов угол биссектрис кодируется как j согласно его диапазону. Тогда для последовательности примитивов

$$a_1 \xrightarrow{j_1} a_2 \xrightarrow{j_2} a_3 \longrightarrow \dots \longrightarrow a_{n-1} \xrightarrow{j_{n-1}} a_n,$$

где j_i – характеристика соответствующей биссектрисы, $i = \overline{1, n-1}$, характеристика последовательности, определяющая поворот, определяется в виде соотношения, которое позволяет корректно оценить последовательность даже в случае, если угол ее искривления больше 360° . Если последовательность состоит только из двух примитивов, то $P = 2$. Если из одного – считаем, что $P = 1$. Число P является основной характеристикой последовательности, которая устойчива как к повороту, так и к наклону. Так, в ряде случаев для успешного распознавания очень важна информация о наклоне. Поэтому в описание последовательности включается показатель наклона – характеристика первой биссектрисы j_1 . Таким образом, пара (P, j_1) может быть принята в качестве описания последовательности примитивов.

Для обеспечения инвариантности к сдвигу и повороту используются моментные функции на основе полиномов Фурье–Меллина, которые сочетают в себе свойства преобразования Фурье (инвариантность к сдвигу) и преобразования Меллина (инвариантность к повороту). Необходимость обработки больших объемов информации требует разработки эффективных алгоритмов вычисления [22]. Вычисление геометрических моментных функций осуществляется посредством преобразования Хартли [23], что позволяет существенно сократить количество операций умножения. Необходимо также отметить, что при использовании описанного подхода, кроме геометрических моментов изображения, мы получаем еще и коэффициенты преобразования Хартли, которые являются важными спектральными характеристиками изображения.

Анализ изображений

Алгоритмы идентификации изображений, основанные на использовании спектральных дескрипторов в различных ортогональных базисах, а также аппарата моментных функций, особенно эффективны при распознавании рукописных символов. Доказательная инвариантность геометрических, моментных и спектральных примитивов к различным группам аффинных преобразований обеспечили высокую (более 95 %) достоверность распознавания [24].

Сокращение размерности вектора информативных признаков необходимо с целью сокращения вычислительных затрат, при этом вероятность правильного распознавания изображении по возможности не должна снижаться. К примеру, количество спектральных коэффициентов, получаемых в результате выполнения спектрального преобразования, которые используются как информативные признаки распознаваемого изображения, достаточно велико.

Показано [24], что выделение информативных признаков изображений на основе усеченных спектральных разложений в базисах одно- и двумерного преобразования Адамара дает возможность редуцирования пространства признаков приблизительно на $2/3$ без ухудшения результатов классификации.

В качестве результирующих информативных признаков предлагается использовать кольцевые и секторные моментные функции. Секторные моментные функции $S_s(m)$ инвариантны относительно сдвига и изменения масштаба исходного изображения. Кольцевые моментные функции $S_r(m)$ инвариантны относительно сдвига и вращения.

Следует отметить, что преобразование Хаара не обладает свойством инвариантности спектра к циклическим сдвигам исходного сигнала, но с помощью описанных моментных функции получаем инвариантность относительно вращения и масштабирования.

Эффективным средством понижения размерности исходных данных является модифицированное преобразование Адамара – двоичное представление преобразования Фурье. В [8] предложены эффективные по быстродействию алгоритмы выделения информативных признаков изображений на основе усеченных спектральных разложений в базисах одно- и двумерного преобразования Адамара и и показана возможность редуцирования пространства признаков приблизительно на $2/3$ без ухудшения результатов классификации.

Для минимизации обучающей выборки для структурного классификатора на основе сравнения с эталоном с помощью функции расстояния в [22] предложен метод, который ориентирован для работы в случае, когда классические методы кластеризации неприменимы. В основе метода лежит понятие покрытия одним идеальным описанием другого, которое можно удалить без ущерба для качества распознавания, если данные описания относятся к одному классу. Применение метода позволило сократить объем базы описаний на 25 % без существенной потери качества.

Центральной задачей распознавания образов является получение признаков, обеспечивающих хорошую разделимость классов. Модифицированные алгоритмы преобразования Фоли-Сэммона и Хотеллинга для вычисления дискриминантных векторов в редуцированном пространстве признаков приводят к улучшению кластеризации данных при использовании одно- и двумерного преобразования Адамара. Экспериментально определены уровни равных ошибок распознавания с селектором признаков на основе одно- и двумерного усеченного преобразования Адамара, и показано, что двумерное преобразование является более эффективным селектором признаком, чем одномерное (81 и 69 процентов соответственно) [7], [8].

Программная реализация предложенных методов

Разработанные методы и алгоритмы реализованы в виде завершенных самостоятельных модулей для их применения в системах компьютерного зрения, например, в системах обработки данных дистанционного зондирования, управления мобильными роботами, проектирования интегральных микросхем. Кроме того, разработанные программные продукты могут явиться основой для построения самостоятельных систем различного назначения.

Разработка таких систем осуществляется по технологии объектно-ориентированного анализа процессов обработки информации. Функциональная структура таких процессов представляется ориентированным графом, в вершинах которого располагаются процессоры обработки данных, а дуги обеспечивают транспорт данных между ними [25], [26]. Архитектура программного обеспечения (ПО) СТЗ изображена на рис. 3. Классы, присутствующие на рис. 3, по своему назначению соответствуют блокам функциональной схемы (рис. 1).

На рис. 3 показаны два типа связей между объектами (экземплярами классов системы). Ассоциация (смысловая связь) обозначена линией с точкой. Она не объясняет, каким образом классы общаются друг с другом (можно только отметить семантическую зависимость, указав, какие роли классы играют друг для друга). Использование показано простой линией и означает, во что превращается ассоциация, если оказывается, что одна из ее сторон (клиент) пользуется услугами другой (сервер). Пример клиент-серверных отношений в нашей модели: объект класса Display Manager (ответственный за отображение информации в процессе обработки) использует данные, предоставляемые объектом класса Pre-analyzer (соответствующего блоку предварительной обработки),

Image Storage (память изображений) и Image Analyzer (вторичная обработка, анализ изображения). Данная архитектура классов является достаточно общей и предполагает дальнейшее уточнение на микроуровне разработки ПО.

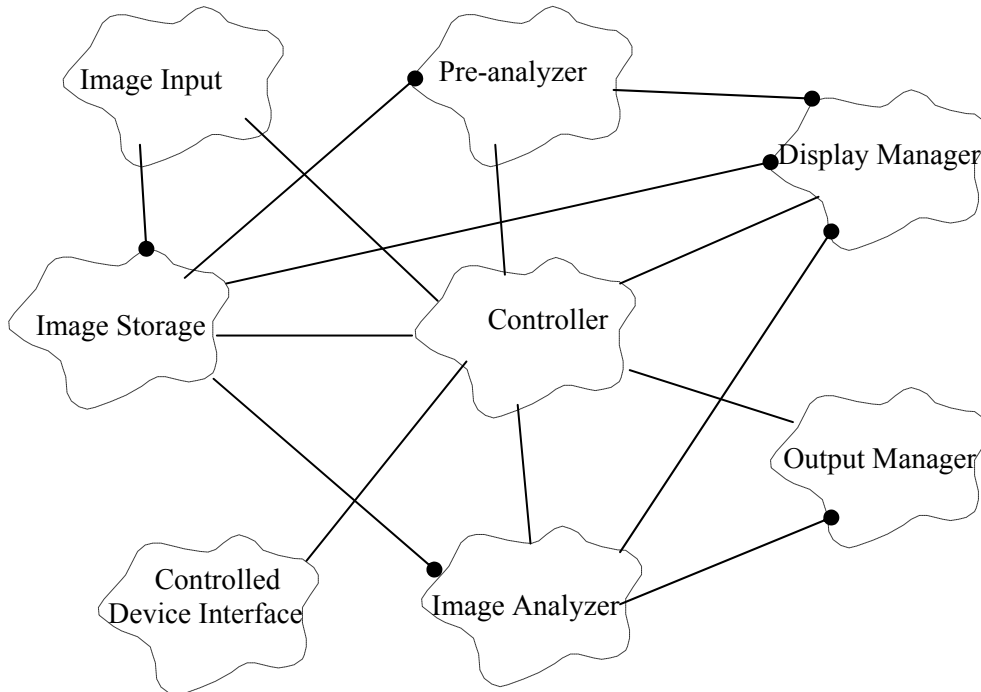


Рисунок 3 – Архитектура ПО СТЗ

Ниже приводится ряд разработок, выполненных в данном направлении.

Автоматизированная система обработки цифровых фотоизображений слоев металлизации кристалла интегральной схемы.

Система позволяет: получить полное изображение объекта из фрагментов, выполнить его предварительную обработку, анализ спектральной гистограммы и сегментацию; аппроксимировать границы выделенных областей прямолинейными отрезками; провести идентификацию и корректировку на видеоизображении металлизации заданного слоя и межуровневые контакты.

Система является составной частью систем оперативного анализа электронных изделий, как собственных, так и предприятий-конкурентов. Она позволяет облегчить ввод проектной информации в системы автоматизированного проектирования; сократить время проектирования образцов электронных изделий с использованием технологии обратного проектирования.

Система распознавания рукописных арабских цифр.

В системе реализованы два конкурирующих метода распознавания: на основе преобразования Хафа и спектральный.

В первом случае выполняется предварительная обработка (утопление и сдвиг), а затем в цикле используется выделение информативного признака на основе преобразования Хафа, его нормализация и классификация (сравнение с эталоном). Если невозможно отнести анализируемый образ к классу, то находится дополнительный признак (проекция). Сравнение с эталоном основывается на двух критериях – пороговое расстояние между классифицируемым объектом и эталоном, либо пороговое количество проекций, наиболее близких к эталону.

Во втором случае используется дискриминантный классификатор, построенный по обобщенной алгоритмической схеме, позволяющий реализовывать несколько типов дискриминантных методов в комбинации с такими преобразованиями, выполняющими отбор информативных признаков, которые обеспечивают необходимую настройку и согласование параметров, определенных классификатором указанного типа. Достоверность распознавания для всех алгоритмов в составе системы составила не менее 98 %.

Система верификации подписи.

В системе реализована возможность выбора информативных признаков на основе нескольких типов преобразований с последующей классификацией в пространстве дискриминантных векторов, построенных различными способами. Различные комбинации алгоритмов селекции признаков и классификации позволяют синтезировать несколько распознающих схем.

Реализованы статистические методы распознавания: на основе комбинации 1- и 2-мерных усеченных преобразований Адамара и спектра связности на этапе сжатия данных и дискриминантных классификаторов с использованием преобразований Фоли-Сэммона (Хотеллинга) и синтетических дискриминантных функций.

Заключение

В статье представлен комплекс методов предварительной обработки и идентификации изображений. Приведена базовая технология обработки, основу которой составляют дискретные преобразования в различных ортогональных базисах, которые используются на различных этапах обработки в сочетании с другими методами. Приведены также методы, ориентированные на обработку изображений конкретных областей приложений: топологического слоя интегральной схемы, рукописных символов, подписей, транспортных регистрационных номеров.

В целом использование предложенных методов при разработке СТЗ позволяет в несколько раз сократить объем вычислительных операций при увеличении достоверности распознавания объектов на изображениях.

Литература

1. Форсайт Д., Понс Ж. Компьютерное зрение. Современный подход. Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2004. – 928 с.
2. Методы компьютерной обработки изображений / Под. ред. В.А. Сойфера. – М.: Физматлит, 2003. – 784 с.
3. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. – М.: Техносфера, 2005. – 1072 с.
4. Дудкин А.А., Мачнев А.Г., Селиханович А.М. Итеративный алгоритм дискретного ортогонального преобразования сигналов в базисе двумерных функций // Computing. – Тернополь, 2002. – Т. 1. – Вып. 1. – С. 101-107.
5. Садыхов Р.Х., Селиханович А.М. Система распознавания рукописных символов с использованием дескрипторов формы // Цифровая обработка изображений. – Минск, 1998. – С. 120-129.
6. Селиханович А.М., Садыхов Р.Х., Мачнев А.Г. Алгоритм выделения контуров на основе базиса двумерных функций Хаара // Proc. of Fifth International Conf. PRIP'99. – 1999. – Vol. 2. – P. 168-172.
7. Садыхов Р.Х., Вершок Д.А. Алгоритм выделения информативных признаков на основе преобразования Радона в системе распознавания рукописных признаков // Известия НАН Беларуси: Сер. физ.-техн. наук. – 1998. – № 3. – С. 103-107.
8. Садыхов Р.Х., Самохвал В.А. Идентификация сигнатур на основе аппарата дискриминантных функций // Известия НАН Беларуси: Сер. физ.-техн. наук. – 1997. – № 3. – С. 123-126.
9. Садыхов Р.Х., Мачнев А.Г. Систематические процессоры цифровой обработки изображений в двумерных базисах. – Мн.: ИТК АНБ, 1996. – 82 с.
10. Вершок Д.А., Дудкин А.А., Калюта А.Г., Селиханович А.М. Система цифровой обработки изображений слов интегральных микросхем // Идентификация образов. – Мн.: ИТК АНБ, 2001. – № 2. – С. 72-87.

11. Doudkin A.A., Selikhanovich A.M., Sadykhov R.Kh. and Vershok D.A. Contour Extraction Algorithms for LSI Circuit Video Image Processing // Proc. of the International Workshop on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems. – Foros (Ukraine). – 2001. – P. 69-72.
12. Ваткин М.Е., Дудкин А.А., Инютин А.В. Сегментация многокадровых цветных изображений топологического слоя интегральной схемы // Искусственный интеллект. – 2005. – № 3. – С. 619-630.
13. Ваткин М.Е., Дудкин А.А. Алгоритмы совмещения частично перекрывающихся кадров изображений // Анализ цифровых изображений. – Минск: ОИПИ НАН Беларуси, 2003. – С. 25-32.
14. Дудкин А.А., Вершок Д.А. Построение векторного описания перекрывающихся кадров изображения // Известия ТРТУ. – Таганрог: ТРТУ, 2005. – № 9. – С. 197-203.
15. Садыхов Р.Х., Селиханович А.М. Алгоритм распознавания рукописных символов на основе профильных проекций в базисах ортогональных функций // Автоматика и вычислительная техника. – Рига, 1998. – С. 26-34.
16. Калабухов Е.В., Садыхов Р.Х. Алгоритм предварительной обработки изображения на основе клеточного автомата в системе распознавания рукописных символов // Цифровая обработка изображений. – Мн., 1998. – С. 110-119.
17. Садыхов Р.Х., Маленко О.Г. Метод устранения разрывов при структурном распознавании рукописных символов // Известия НАН Беларуси: Сер. физ.-техн. наук. – 1999. – № 1. – С. 94-96.
18. Князев В.Н., Садыхов Р.Х. Методы и алгоритмы распознавания номерных знаков автомобилей // Информатика. – Мн.: ОИПИ НАН Беларуси, 2004. – № 2. – С. 45-46.
19. Маленко О.Г., Садыхов Р.Х. Система автоматического поиска и распознавания номеров железнодорожных вагонов // Материалы международной научно-технической конференции «Новые информационные технологии в науке и производстве». – Мн.: БГУИР. – 1998. – С. 255-258.
20. Дудкин А.А., Вершок Д.А., Селиханович А.М. Выделение контуров на полутоновых изображениях топологических слоев интегральных микросхем // Искусственный интеллект. – 2004. – № 3. – С. 453-458.
21. Дудкин А.А., Вершок Д.А. Аппроксимация прямыми линиями контуров объектов на полутоновых изображениях // Известия ТРТУ. – Таганрог: ТРТУ, 2005. – № 9. – С. 190-196.
22. Садыхов Р.Х., Маленко О.Г., Селингер М.Л. Система распознавания рукописных символов на базе нейронных сетей и структурных методов // Нейрокомпьютеры: разработка и применение. – 2004. – № 1. – С. 32-39.
23. Садыхов Р.Х., Муравин А.Л. Алгоритмы вычисления геометрических моментов изображения посредством преобразования Хартли // Известия НАН Беларуси: Сер. физ.-техн. наук. – 2004. – № 2. – С. 79-83.
24. Sadykhov R.Kh., Samokhval V., Podenok L. Face Recognition Algorithm on the Basis of Truncated Walsh-Hadamard Transform and Synthetic Discriminant Functions // Proc. of the 6-th IEEE Intern. Conf. Automatic Face and Gesture Recognition. – Seoul (Korea), 2004. – P. 219-222.
25. Дудкин А.А., Ивкин А.В., Садыхов Р.Х. Объектная модель системы технического зрения // Proc. of the 5th Int. Conf. PRIP'99. – 1999. – Vol. 2. – P. 253-258.
26. Doudkin A., Ivkin A., Sadykhov R. Architecture of Computer Vision Software System // Proc. of Int. Conf. on Neural Networks and Artificial Intelligence. – Brest. – 1999. – P. 173-177.

Р.Х. Садыхов, О.А. Дудкин

Обработка изображений и идентификация объектов в системах технического зору

Розглянуто методи обробки зображень і розпізнавання, орієнтовані на застосування в системах технічного зору (СТЗ). Представлено типову структуру СТЗ і описаний ряд програмних систем обробки зображень, розроблених у лабораторії ідентифікації систем ОІПІ НАН Білорусі.

R.Kh. Sadykhov, A.A. Doudkin

Image Processing and Object Identification in Computer Vision Systems

Methods and algorithms for image processing and recognition are considered, that are applied into computer vision systems. An architecture of a typical computer vision software system is proposed on the basis of analysis of most common processing methods. Short descriptions of some software systems developed in laboratory of System Identification of UIIP of NAS of Belarus are given.

Статья поступила в редакцию 11.07.2006.