

*БУЗОВСКИЙ О.В.,
БОЛДАК А.А.,
НЕВДАЩЕНКО М.В.*

СЕМАНТИКА МОДЕЛЕЙ И РАЗМЕРНОСТЬ ЗАДАЧ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

В статье предложен ряд формализмов, связанных с определением моделей объекта и процесса проектирования. Анализируется иерархическая структура процесса проектирования с позиции оценки сложности модели и взаимосвязь между семантикой модели и размерностью проектных задач. В качестве иллюстрации такой взаимосвязи сформулированы задачи, решаемые при распознавании штриховых изображений. Приведена общая структура системы для распознавания штриховых изображений.

A number of formalisms related to the definition of object models and processes of self projection are suggested in the article. The hierarchical structure of the design process from the position of estimating the complexity of the model and interdependence between the semantics of the model and the dimension of the project objectives are analyzed. As an illustration of such interdependence the tasks solved by recognition of strip images are formulated. General structure of strip images recognition is given.

Введение

Вычислительные возможности современных компьютеров позволяют использовать компьютерную обработку изображений при решении различных прикладных задач, в том числе и задач автоматизации проектирования. Последние, так или иначе, связаны с разработкой проектной документации – различного рода спецификаций и схем, которые отображают семантику проектных решений. Подтверждением прогресса в этой области является наличие средств оптического распознавания [1-3], которые достаточно легко интегрируются в технологический процесс проектирования с элементами автоматизации.

При этом сам термин «распознавание» по отношению к изображению может обозначать как его кодирование, так анализ с целью классификации полученного кода. К сожалению, последняя задача сегодня еще не решена в общем виде, чем и объясняется отсутствие на рынке соответствующих программных средств. Одной из причин этого является отсутствие подходов к моделированию изображений и математическому аппарату их обработки с учетом семантики изображений.

В связи с этим целью работы является снижение трудоемкости разработки программных средств анализа изображения за счет формулировки и применения подходов к построению моделей изображений и способов их пре-

образования с учетом определенной семантики.

Таким образом, в рамках области анализа изображений исследуются модели и преобразования изображений и схем, отличительной особенностью которых является семантика, однозначно заданная с помощью формальных правил построения.

Формирование семантики проектного решения

Прежде чем говорить о моделировании изображения схем необходимо определить принципы и подходы к формированию семантики проектного решения, неразрывно связанной с понятиями объекта и процесса проектирования.

Для различного рода технических задач общий успех их решения в значительной мере определяет формулировка представлений об объекте, относительно которого такая задача решается. Обычно это представление называют моделью, причем сам термин «модель» требует уточнения. Ниже под моделью будем понимать абстракцию в соответствии с определением, введенным Хоаром [4]. Сложность формулировки модели, исключая тривиальные случаи, определяется сложностью самих объектов и проявляется в неформальном характере процедур или правил, которые можно применять для этой цели с учетом характера и особенностей конкретной задачи.

Сложность объекта и, соответственно, его модели, которая обычно определяет размерность задачи анализа, может быть рассмотрена с различных точек зрения. Прежде всего, можно выделить сложность структуры объекта (см. ниже), которая характеризуется количеством элементов, образующих объект, а также количеством и разнообразием типов взаимосвязей между этими элементами. Если количество элементов превышает некоторое пороговое значение, которое не является строго фиксированным, то такой объект может быть назван сложным.

Вторым аспектом сложности является сложность процесса функционирования объекта. Это может быть связано как с непредсказуемым характером его поведения, так и невозможностью формального представления правил преобразования входных воздействий в выходные.

Организация иерархии абстракции (моделей, понятий) позволяет исключить или существенно уменьшить сложность. При этом следует отметить, что существует два независимых подхода к построению таких иерархий. Первый из них акцентирует внимание на отношении обобщения и позволяет перейти от набора частных абстракций к небольшому числу более общих понятий. Второй подход использует отношение агрегации и позволяет представить систему с помощью более простых взаимодействующих компонент.

Цели и задачи проектирования определяются исходя из сформулированной, как правило, в виде технического задания семантики объекта проектирования (ОП) O для формального описания которой можно использовать тройку вида:

$$O = \{F, S, P\},$$

где F , S и P – соответственно функциональное, структурное и параметрическое описания объекта или (F -описание, S -описание и P -описание).

Функциональное описание на этом уровне представления является обязательным и должно отражать заданную траекторию O в пространстве времени-состояний, которая определяется реакцией объекта на управляющие и, возможно, пассивные воздействия внешней среды. При этом на форму F -описания в общем случае не накладывается никаких ограничений; это может быть просто вербальное определение назначения, например, «система управления воздушным движением» или «си-

стема управления сотовой телефонной связью». Если объект с заданным F -описанием или документация, по которой он может быть изготовлен, существуют, то задачу проектирования решать не имеет смысла при условии, что параметрическое описание удовлетворяет техническим требованиям. В противном случае такой объект необходимо проектировать.

В процессе проектирования используется известный с древних времен принцип «разделяй и властвуй», связанный с декомпозицией F -описания на некоторые составляющие F_i (второй подход), причем

$$F = S(F_i), \quad i = \overline{1..n},$$

где S -оператор, определяющий такую композицию F_i , которой соответствует исходное F -описание. S -оператор задает S -описание или структуру ОП на рассматриваемом уровне декомпозиции. Некоторой части F_i могут соответствовать существующие объекты, относительно которых не имеет смысла решать задачу декомпозиции и в этом смысле их можно считать элементами несмотря на то, что они могут быть достаточно сложными. Следовательно для таких объектов S -описание отсутствует, что является формальным признаком самого понятия «элемент».

Для оставшейся части F_i вновь необходима декомпозиция и т.д. до тех пор, пока все F -описания не станут элементами. Таким образом,

$$F_i = S_i(F_{i+1}, j), \quad i = \overline{1..n}, \quad j = \overline{1..m},$$

где j определяет номер шага, а i – индекс компоненты на соответствующем шаге декомпозиции. По сути каждый новый шаг соответствует очередному уровню абстракции.

Процесс декомпозиции F -описаний, как правило, неоднозначен, причем множество допустимых вариантов достаточно велико. Выбор варианта декомпозиции обычно определяется его качеством, которое количественно может быть оценено с помощью P -описанием, элементами которого являются количественные оценки свойств ОП называемые параметрами p_i , $i = \overline{1..k}$. Тогда P -описание есть $P = \{p_i\}$, причем P -описание всегда однозначно связано с конкретным S -описанием. В этом случае задача проектирования может быть поставлена как задача оптимизации P -описания на множестве вариантов декомпозиции.

По мере накопления удачного опыта проектирования однотипных объектов у разработчиков обычно складываются шаблонные решения задачи декомпозиции. Эти шаблоны являются обобщенными и связаны с построением иерархии обобщений. Последняя по внешнему виду напоминает схему классификации понятий формальной логики. В этой связи следует заметить, что каждое понятие в логике имеет некоторый объем и содержание. При этом под объемом понятия понимают все другие понятия, для которых исходное может служить определяющей категорией или главной частью. Содержание понятия составляет совокупность всех его признаков или атрибутов, отличающих данное понятие от всех других.

Иерархия понятий имеет следующую структуру. В качестве наиболее общего понятия или категории используется понятие, имеющее наибольший объем и, соответственно, наименьшее содержание. Это самый высокий уровень абстракции для данной иерархии. Менее общие понятия, которые конкретизируют некоторую абстракцию на схеме иерархии будут располагаться на уровне ниже исходного понятия. По мере продвижения по дереву абстракций на более низкие уровни данное общее понятие некоторым образом конкретизируется, тем самым уменьшается его объем и увеличивается содержание.

В общем случае, процесс формирования иерархии обобщений представляет собой разработку методики проектирования, которая сформулирована в терминах, соответствующих категориям этой иерархии и правилам декомпозиции.

Если описанная выше иерархия агрегации строится, как правило, «сверху вниз», то иерархия обобщений – наоборот, «снизу вверх», и в последствии может эффективно использоваться для решения задачи декомпозиции, поскольку ограничивает множество допустимых проектных решений.

Фактически, иерархия обобщений может быть описана четверкой (Vp, Vc, Pr, Pl) , где $Vp = \{vp_i\}$, $i = \overline{1..n}$ – множество примитивов, соответствующих нижнему уровню иерархии, $Vc = \{vc_i\}$, $i = \overline{1..m}$ – множество конструкций – понятий более высоких уровней иерархии, $Pr = \{pr_i\}$, $i = \overline{1..k}$ – множество допустимых правил (операций), с помощью которых могут

быть заданы отображения $Vp \cdot Vp \rightarrow Vc$, $Vp \cdot Vc \rightarrow Vc$, $Vc \cdot Vc \rightarrow Vc$, $Pl = \{pl_i\}$, $i = \overline{1..l}$ – множество локальных параметров, используемых для оптимизации проектных решений.

Не трудно заметить, что определенная таким образом иерархия представляет собой замкнутую математическую систему (алгебру) относительно множества объектов $Vp \cup Vc$ и набора операций Pr .

Отсутствие в этой системе правил вида $Vp \cdot Vp \rightarrow Vp$ определяет ограничения, связанные с применением данной иерархии обобщений для решения задачи декомпозиции. Эти ограничения состоят в том, что в рамках этой замкнутой системы объекты Vp являются элементарными, но в природе они не существуют, и, следовательно, для них требуется решать задачу проектирования.

В этом случае необходима смена иерархии понятий, которая используется для проектирования, и определение однозначных соответствий между понятиями новой и элементами предыдущей иерархий. Таким образом, определен уровень отрыва методик проектирования, который связан со сменой набора понятий и операций, используемых для решения задачи декомпозиции.

Формальные правила построения схем как формы отображения описанной выше семантики охватывают одну иерархию обобщений и предназначены для построения отображения иерархии агрегации. При этом понятиям иерархии обобщения соответствуют условные графические обозначения (УГО), а операциям (отношениям агрегации) – связи соединяющие УГО. Таким образом, схема может рассматриваться как графовая модель $G = \{N, R \subseteq N \times N\}$.

В общем случае интерпретация (чтение) схемы связано с определением спецификации элементов множества N и агрегации заданным с помощью R .

Штриховые изображения

Схемная документация как форма отображения проектного решения обладает рядом свойств, позволяющих на ее основе формально восстанавливать структуру объекта проектирования (ОП). К таким свойствам относятся [5]:

- использование при начертании простейших геометрических примитивов;

- использование ограниченного множества условных графических обозначений (УГО), которые ставятся в однозначное соответствие элементам структуры ОП;

- наличие правил оформления схем, однозначно определяющих соответствие между отношениями на множестве элементов ОП и геометрическими соотношениями между примитивами и УГО на поле чертежа.

Сказанное выше определяет предпосылки создания системы обработки схемной документации, основная задача которой состоит в распознавании схем.

Решение задач обработки изображений связано с использованием моделей, сформулированных в рамках двух подходов. Суть первого подхода состоит в том, что изображение рассматривается как многомерный информационный сигнал. Чаще всего изображение рассматривают как двумерную функцию распределения некоторой физической величины (в большинстве задач – интенсивности освещения) [6]. Второй подход определяет модель изображения как множество геометрических примитивов, наглядных знаков и их геометрических соотношений, в соответствии которым поставлена определенная семантика [7]. Очевидно, что решение задачи распознавания схем предполагает использование обеих моделей. Более того, необходимо определить соответствие между ними.

Примером семантической модели изображения может служить схема, содержащая геометрические примитивы, образующие УГО, в соответствии которым правила оформления ставят семантику структуры ОП. При этом примечательно то, что множество используемых в схемах примитивов обладают общим свойством – они представляют собой траектории движения пера (обычно круглой формы с постоянным диаметром). В этом случае отличительной особенностью примитивов является форма траектории пера, а не его толщина или цвет. Геометрические примитивы, обладающие перечисленными свойствами можно назвать штрихами.

Таким образом, под штриховым изображением в рамках семантического подхода в дальнейшем понимается изображение, сформированное с помощью штрихов.

В отличие от изображения рукописного текста, схемная документация характеризуется использованием ограниченного множества штрихов (прямая, дуга, окружность), которые

могут быть получены с помощью простейших чертежных инструментов. Это ограничение позволяет в значительной степени упростить задачу распознавания штрихов на схемах. Но при этом следует отметить, что УГО представляют собой структуры штрихов, а схема, в свою очередь, воспринимается как структура УГО. Следовательно, семантическая модель схемы является иерархической и, соответственно, требует применения многоуровневых схем распознавания.

Ограничения, наложенные на класс штриховых изображений, позволяют сформулировать множество классификационных признаков в рамках сигнальной модели.

Поскольку устойчивая идентификация штрихов возможна только в случае использования равномерного фона изображения, то гистограмма интенсивности идеального штрихового изображения представляет собой функцию вида:

$$H(i) = \alpha_1 \cdot \delta(I_1, i) + \alpha_2 \cdot \delta(I_2, i), \quad (1)$$

где I_1 и I_2 – значения интенсивности для фона и штрихов соответственно, $\delta(x, y)$ – функция Кронекера, α_1 и α_2 – весовые коэффициенты ($\alpha_1 + \alpha_2 = 1$).

На Рис.1 приведена гистограмма интенсивности идеального штрихового изображения, которая существенно отличается, например, от типовой гистограммы фотографии (Рис.2).

Анализ гистограммы реального штрихового изображения (Рис.3), позволяет определить множество задач предварительной обработки, необходимой для приведения реальных изображений к виду, пригодному для дальнейшего распознавания.

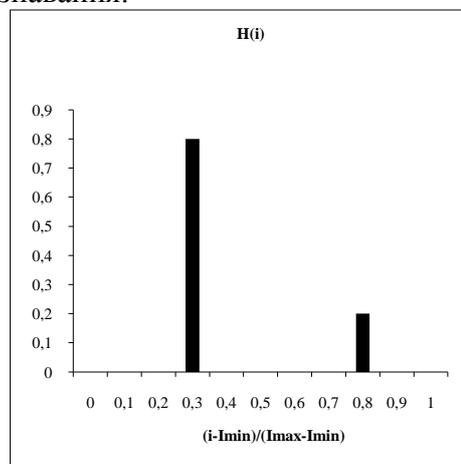


Рис.1. Гистограмма интенсивности идеального штрихового изображения

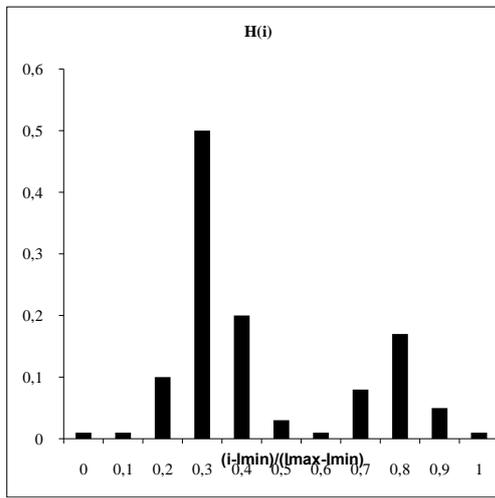


Рис.2. Гистограмма интенсивности фотографического изображения

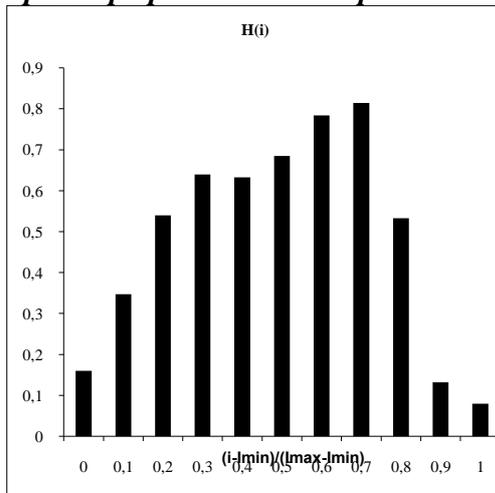


Рис.3. Гистограмма интенсивности реального штрихового изображения

Штриховые изображения характеризуются также специфическим распределением $I(x, y)$, где I – интенсивность, x и y – геометрические координаты, которое представляет собой кусочно-постоянную функцию с уровнями интенсивности I_1 и I_2 . При этом штрихам соответствуют связанные геометрические области с постоянной интенсивностью I_2 . Более того, можно указать минимально допустимую площадь такой области – она равна площади пера. Это особенность дает возможность использовать эффективные методы кодирования, основанные на прослеживании границ областей одинаковой интенсивности (контуров) [5]. Вид функции распределения $I(x, y)$ для штриховых изображений обеспечивает также высокую помехоустойчивость, поскольку предопределяет эффективную реставрацию реальных изображений с помощью методов цифровой фильтрации.

Таким образом, выделенный класс штриховых изображений обладает рядом специфиче-

ских свойств как на уровне сигнальной, так и на уровне семантической модели. Следовательно, для этого класса может быть очерчено множество задач обработки таких изображений и определены эффективные методы их решения.

Обработка штриховых изображений рассматривается в контексте решения задачи распознавания схемной документации. При этом обработка изображений может быть разделена на этапы, связанные с предварительной обработкой, подготовкой и распознаванием.

Под предварительной обработкой понимается преобразование реальных изображений к виду, пригодному для решения последующих задач.

Применительно к штриховым изображениям предварительная обработка состоит в преобразованиях, позволяющих привести гистограмму интенсивности к виду (1), реставрировать форму распределения $I(x, y)$, осуществить геометрическую привязку отдельных фрагментов изображения, произвести контурное кодирование штрихового изображения.

Решение первой задачи сводится к повышению контрастности изображения, которое может эффективно осуществляться с помощью известного метода эквализации [6], с последующим применением порогового фильтра, формирующего бинарное изображение.

Вторая задача определяет необходимость подавления пиксельного шума в бинарном изображении и решается с помощью методов ранговой фильтрации. При этом размер маски фильтра выбирают в зависимости от диаметра пера.

Необходимость геометрической привязки фрагментов обусловлена тем фактом, что в большинстве случаев форматы сканирующих устройств существенно меньше размеров реальных чертежей. В связи с этим производят сканирование отдельных, частично перекрывающихся фрагментов и их наложение с целью получения единого изображения схемного документа. Известные методы корреляционной привязки, к сожалению, обладают высокой вычислительной сложностью, что не позволяет использовать их в полной мере для автоматического решения данной задачи. (Функция оператора в данном случае состоит в указании окна перекрытия фрагментов, в пределах которого осуществляется привязка.)

Методы контурного кодирования позволяют снизить информационную избыточность

изображения, что в большой степени определяет эффективность методов решения задач препарирования.

Под препарированием в контексте рассматриваемой задачи понимается получение множества признаков изображения, необходимых для распознавания. Фактически, препарирование – это этап обработки, позволяющий связать сигнальную и семантическую модели. Применительно к обработке штриховых изображений препарация предполагает получение описания штрихов, достаточного для их однозначной идентификации. Исходя из определения штриха, можно заключить, что такое описание должно быть инвариантным по отношению к толщине штриха и, по возможности, полно описывать форму траектории пера. Это означает, что основным признаком штриха можно считать серединную ось. (Эффективным методом скелетизации посвящена работа [5].) При этом следует отметить, что при скелетизации следует отдавать предпочтение методам, позволяющим получить описание формы штриха в аналитическом виде, поскольку в этом случае имеется возможность использования эффективных аналитических и численных методов анализа форм кривых.

Следует отметить, что в том случае, когда разрешающая способность сканирующих устройств недостаточна, наблюдается значительное влияние помех дискретизации на форму штриха. В этом случае необходима предварительная реставрация формы контуров. Задача реставрации формы контура может рассматриваться как задача фильтрации одномерного сигнала с равномерно распределенным шумом. В дальнейшем с помощью методов численного дифференцирования определяются узловые точки аппроксимации контура. Описанный метод позволяет классифицировать сегменты контура по степени аппроксимирующего полинома.

Как уже отмечалось, семантическая модель схемы является иерархической. В связи с этим схема решения задачи распознавания приобретает следующий вид.

На первом этапе на основе анализа формы производится классификация штрихов, и определяются их геометрические соотношения. Второй этап связан с распознаванием таких геометрических объектов как многоугольники. Задача выделения УГО сводится к определению пространственных соотношений между первичными штрихами и объектами, полученными на втором этапе. Результатом

решения задачи является набор распознанных УГО (входящих во множество предопределенных) и набор неклассифицированных примитивов. При этом должна предоставляться возможность ведения статистики по результатам распознавания, ошибкам, неклассифицированным объектам и т.п. На последнем этапе производится классификация УГО (согласно имеющейся базе данных схемных элементов), обучение системы в случае введения/выявления новых классов элементов или изменения существующих, а также приведение распознанного документа к требуемому формату.

Каркас программной системы обработки изображений

Множество математических моделей и их преобразований, применяемых при решении задач обработки изображений схем, может быть представлено иерархической структурой, в которой на нижнем уровне иерархии расположены сигнальные модели, верхние уровни соответствуют семантическим моделям изображений. Решение конкретной задачи соответствует пути в такой иерархии, который начинается на нижних, и заканчивается на верхних ярусах.

На основе такого подхода можно предложить математическую схему для решения задач обработки изображений (Рис.4), которая включает в себя отдельные стадии, каждая из которых может рассматриваться как отдельная задача. Более того, такие задачи могут быть классифицированы по признаку моделей, используемых ими в качестве исходных и результирующих. Следовательно, можно определить множество программных классов и их интерфейсов, составляющих устойчивый каркас системы обработки изображения (Рис.5).

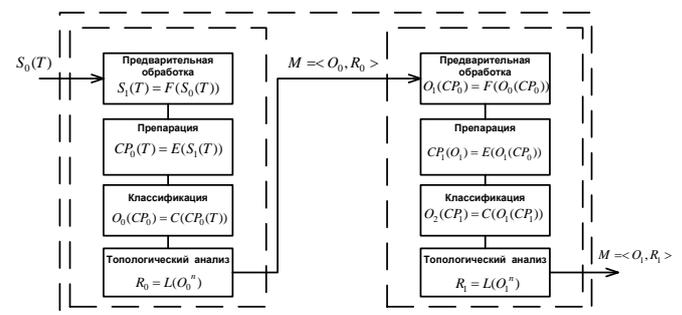


Рис.4. Математическая схема решения задач обработки изображений

$S(T)$ – функция пространственного распределения вектора характеристик сигнала;

T – пространственный базис;
 I – вектор характеристик сигнала;
 $SP_i, i = 1, \dots, n$ – скалярная характеристика сигнала;
 O – множество экземпляров;
 $CP_j, j = 1, \dots, m$ – классификационный признак;
 R – структура изображения;
 $v_1 : C(S) \rightarrow O, v_2 : L(O') \rightarrow R$ – классификация экземпляров и определение структуры изображения.

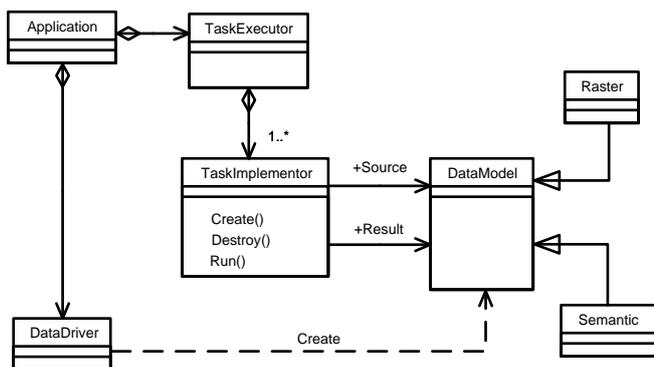


Рис.5. Схема классов для каркаса системы обработки изображений

Класс Application, который реализует интерфейс пользователя программы, использует экземпляр класса TaskExecutor, представляющий собой механизм последовательного запуска стадий обработки. Стадии обработки на диаграмме представлены абстрактным классом TaskImplementor, который имеет методы, необходимые для создания, запуска и уничтожения экземпляра, а также использует в качестве исходных данных и результатов экземпляры абстрактной модели данных (DataModel). Сигнальная и семантическая модели являются разновидностями такого класса. Создание экземпляров данных поручается драйверу (DataDriver), который ориентирован на конкретный формат внешних файлов и находится под управлением самого приложения. Эта схема дает возможность, используя различные форматы внешних визуальных данных, преобразовать их во внутренний формат реализовать последовательность стадий обработки, которые зарегистрированы в списке механизма последовательного запуска.

Описанный каркас, основанный на использовании абстрактных классов, может повторно использоваться при разработке различных программных систем обработки изображений, освобождая тем самым ресурсы команды разработчиков, необходимые для выполнения научно-исследовательских работ.

Известно, что разработчики программного обеспечения стремятся к узкой специализации, что позволяет им сократить затраты на исследовательские работы за счет использования опыта, полученного в предыдущих проектах. Такой опыт, как правило, оформлен в виде типовых решений (шаблонов), программных библиотек и т.п. Рассмотренный каркас создает предпосылки для создания подобных библиотек, начиная со средств доступа к данным, и заканчивая реализациями стадий обработки изображений.

Библиотека программных ресурсов имеет четыре уровня инструментария для реализации средств обработки изображений (Рис.6). Базовый уровень связан с реализацией сигнальной и семантической моделей изображений, которые могут использоваться как при обработке на различных стадиях, так и при реализации драйверов данных, опирающихся на это базовое представление моделей изображений. Уровень математического аппарата содержит модули средств, реализующих математические методы преобразования изображений, которые используются для решения базовых задач обработки визуальной информации. Реализация этих задач сконцентрирована на прикладном уровне. Верхний уровень содержит средства для организации интерфейса пользователя и контроллеров задач обработки, что позволяет уменьшить затраты на разработку новых или модификацию функциональности существующих программ.

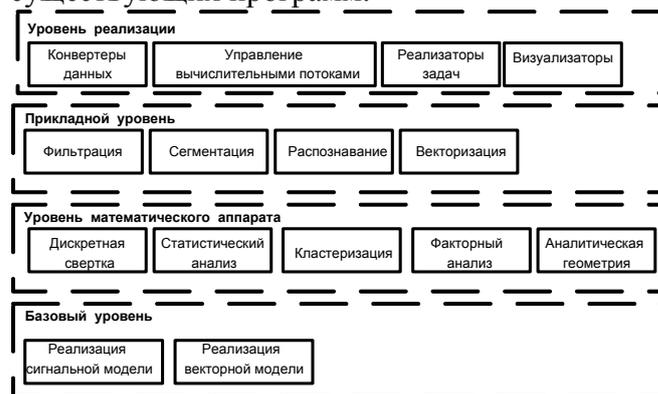


Рис. 4. Библиотека программных ресурсов для построения систем обработки изображений

Заключение

В работе сформулирован подход к построению моделей и преобразований изображений, который отличается от известных тем, что учитывает семантику последних. Это позволяет получать формализованные математи-

ческие схемы решения задач анализа изображений с учетом их семантики. Формализация математической схемы решения задачи анализа изображений создает предпосылки к созданию унифицированного программного каркаса, использование которого существенно снижает затраты на разработку специализирован-

ных программных средств связанных с анализом изображений.

В качестве примера применения сформулированного подхода приведено решение задачи анализа изображений схем в технологических процессах автоматизированного проектирования.

Список литературы

1. ABBYY FineReader [Электронный ресурс] / Компания ABBYY – ведущий разработчик ПО в области распознавания, обработки данных и лингвистики – Электрон. дан.. – ABBYY, 2004. Режим доступа: <http://www.abbyy.ru/finereader/>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус.
2. Readiris [Электронный ресурс] / I.R.I.S. – OCR software and Document Management solutions – Электрон. дан.. – I.R.I.S. s.a., 2009. Режим доступа: <http://www.irislink.com/>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. англ.
3. SILVERCODERS OCR Server [Электронный ресурс] / SILVERCODERS – Quality and Competence – Электрон. дан.. – SILVERCODERS, 2005. Режим доступа: <http://silvercoders.com/>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. англ.
4. Дал У., Дейкстра Э., Хоор К. Структурное программирование. – М.: Мир, 1975. – 245с.
5. Александров В.В., Горский Н.Д. Алгоритмы и программы структурного метода обработки данных. – Л.: Наука, 1983, – 208с.
6. Александров В.В., Горский Н.Д. Представление и обработка изображений: рекурсивный подход. – Л.: Наука, 1985, – 190с.
7. Анисимов Б.В., Курганов В.Д., Злобин В.К. Распознавание и цифровая обработка изображений. – М.: Высшая школа, 1983, – 296 с.