

Геометрическое моделирование растровых изображений документов со слабо формализованным описанием объектов

Д.Ю. Васин¹, В.П. Громов¹, С.И. Ротков²

¹Нижегородский государственный Национальный исследовательский университет им. Н.И.Лобачевского, пр. Гагарина 23, Нижний Новгород, Россия, 603952

²Нижегородский государственный архитектурно–строительный университет, Ильинская 65, Нижний Новгород, Россия, 603952

Аннотация. В работе проанализированы графические документы со слабо формализованным описанием объектов (СФГД), выявлены их базовые особенности, влияющие на выбор моделей, методов и алгоритмов их обработки. В рамках развития комбинаторно – геометрического подхода предложена геометрическая модель описания СФГД с выраженной ориентацией линейных объектов. Предложена технология векторизации растровых изображений СФГД при наличии шумов в исходных данных. Показана эффективность использования расширенного класса векторных моделей (линейная и сегментно–узловая модели) для описания СФГД с выраженной линейной ориентацией объектов, выявленная в ходе практических экспериментов на реальных СФГД.

1. Введение

В последние годы в задачах анализа видеoinформации все большее значение отводится разработке математических методов построения формализованного структурированного описания входной видеoinформации. Задачи, связанные с получением формальных описаний, решаются путем изучения внутреннего строения, структуры и содержания элементов или объектов более простой природы (непроизводных элементов, объектов, выделяемых на обрабатываемых изображениях на различных уровнях обработки и .д.)

В данной работе в качестве исходной информации рассматриваются только изображения большеформатных, семантически–насыщенных, сложноструктурированных графических документов (БФГД). При этом источником, как правило, являются графические изображения (ГИ) на бумажных носителях, а создание цифровых документов необходимо обеспечить в терминах соответствующей проблемной области. На такие документы наносятся условные обозначения объектов четырех классов: точечных (дискретных), линейных, двумерных (площадных) и изображения символов, образуя вкуче пространственно–распределенные данные (ПРД) [1, 2, 5, 6].

Анализ БФГД показал, что значительная часть таких документов выполнена с нарушением правил номенклатурного описания объектов. Выделим такие БФГД в подкласс документов со слабо формализованным описанием объектов (СФГД). К нему отнесем: машиностроительные чертежи, схемы, планы поэтажной застройки зданий, топографические и морские

навигационные карты, данные о поверхности Земли, получаемые с искусственных спутников и пр. Базовые особенности СФГД, влияющие на выбор моделей представления и методов их обработки, рассмотрены в работах [5, 6]. Принятие их во внимание обуславливает повышенные требования к геометрическому моделированию данного класса графических документов (ГД).

2. Проблемы создания автоматических технологий и систем обработки СФГД

С целью автоматизации технологии ввода СФГД в последние годы предложены различные информационные технологии на основе эвристических процедурных методов, а также на базе методов распознавания с учителем, которые эффективны для ограниченного набора объектов с жестким ограничением на их размер и ориентацию. Отметим, что технология автоматического анализа СФГД – сложный многоэтапный процесс, включающий в себя большое количество методов и алгоритмов обработки – фильтрации, сжатия, хранения и поиска, анализа и принятия решений. Для эффективной работы этого «конвейера» очень важно, чтобы все математические модели, методы, алгоритмы и структуры представления данных были взаимосвязаны и взаимозаменяемы, так как очевидно, что сколь угодно высокая эффективность на каком-то отдельном технологическом этапе обработки может быть сведена на нет на других этапах.

Огромная информационная избыточность растровых изображений СФГД (РИСФГД) безусловно повышает требования к автоматическим алгоритмам их обработки. Проблема усугубляется еще больше, если принять во внимание, что автоматическую обработку РИСФГД на нижних уровнях иерархии необходимо проводить в реальном масштабе времени и при ограниченных ресурсах памяти, а разрабатываемые модели и методы должны интегрироваться в существующие технологии и системы.

Следовательно, разрабатываемые модели и методы обработки РИСФГД должны быть технологичными и удовлетворять общим требованиям, предопределенным эффективностью решения задач анализа ГИ в целом [2, 3]:

- технологичности;
- высокой емкостной и временной эффективности;
- естественной интегрируемости в общую схему обработки.

Отметим, что получаемые посредством автоматических процедур векторные модели СФГД, формируют объекты далеко не всегда соответствующие их эталонному описанию и обладающие специфичностью, как по составу, так и по способам их задания. Кроме того, практика обработки СФГД, особенно СФГД, взятых из архивов, выявила новые серьезные проблемы, связанные с переходом от нижнего (пиксельного) уровня представления к векторному. Это приводит в дальнейшем к резкому усложнению процедур автоматического распознавания объектов на СФГД и неизбежному снижению временной эффективности всей технологии обработки этого класса документов, связанному с обязательным интерактивным контролем и редактированием возможных ошибок.

Для того, чтобы избежать многократного дублирования при разработке систем, решающих различные задачи обработки СФГД, целесообразно выделить базовую систему, которую можно рассматривать как инструмент для решения двух основных задач: с одной стороны, это основа для разработки систем, специализированных на конкретную предметную область, а с другой – автоматизированное рабочее место для разработки и исследования алгоритмов обработки СФГД.

В ядро такой системы может быть положен, предложенный в 80–х годах, комбинаторно-геометрический подход (КГП) к обработке РИГД ПРД [1], основу которого оставляют: иерархия математических моделей описания изображения, иерархия структур представления данных, набор эффективных по времени и используемой памяти алгоритмов решения задач вычислительной геометрии, а также специализированных алгоритмов обработки видеоданных. Содержательная суть подхода состоит в следующем: по исходному РИГД строится контурная (КМИ) или линейно–контурная модели изображения (ЛКМИ), т.е. исходному РИГД ставится в соответствие множество точек, многоугольников и ломаных. На основе этого представления строится иерархия взаимосвязанных математических моделей описания, структур представления и принятия решений, в которых объекты также рассматриваются как точки,

многоугольники, ломаные и их совокупности. Построение объектов иерархии моделей изображения выполняется с помощью системы логико–геометрических предикатов (решающих правил), вычисляющих характеристики и отношения между объектами: размеры, расстояния, вложенности, примыкания, пересечения и другие виды отношений взаимного расположения, характеристики формы объектов и их частей.

В итоге, весь сложный комплекс задач, связанный с анализом видеоданных, рассматривается с единой точки зрения построения иерархии взаимосвязанных математических моделей описания, структур представления и принятия решений, нижний уровень которых обрабатывает растровую информацию от первоисточника визуальных данных, а верхний уровень соответствует описанию графических данных на содержательном уровне в терминах пользователя.

Поэтому актуальна задача дальнейшего повышения интеллектуализации информационных технологий автоматической обработки РИСФГД, что привело к необходимости дальнейшего развития КГП и иерархии моделей описания и создаваемых на их основе методов и алгоритмов обработки РИСФГД.

3. Эффективные модели описания СФГД

В рамках КГП под математической моделью изображения будем понимать тройку вида $M_V^\alpha = \{E_V^\alpha, C_V^\alpha, R_V^\alpha\}$, где: $E_V^\alpha = \{e_1^\alpha, e_2^\alpha, \dots, e_s^\alpha\}$ – множество производных элементов модели ранга α ; $R_V^\alpha = \{r_1^\alpha, r_2^\alpha, \dots, r_t^\alpha\}$ – множество допустимых отношений между производными элементами модели ранга α ; $C_V^\alpha = \{c_1^\alpha, c_2^\alpha, \dots, c_n^\alpha\}$ – множество характеристик производных элементов модели ранга α ; $\alpha = 1, 2, 3, \dots, N$ – ранг (уровень) модели [1].

Модель изображения будем считать инвариантной относительно некоторого множества классов изображений ГД, если:

- модель может быть построена для любого документа из этого множества;
- исходное изображение может быть восстановлено по модели с известной точностью.

Изначально, для автоматизации обработки БФГД, были предложены математические модели нижних уровней иерархии для описания изображений, в которых графические изображения представлялись в виде растра (набора пикселей), совокупности линий, контуров и точек (КМИ, ЛКМИ). При этом, ЛКМИ рассматривалась как базовая для всех последующих уровней моделей. На базе КМИ или ЛКМИ строились модели высших уровней. Для них были развиты эффективные методы вычислительной геометрии (метод от общего к частному на базе иерархических структур представления векторных данных), методы распознавания графических объектов (корреляционно–экстремальный метод) и пр [1, 2].

Практика автоматизированной обработки СФГД потребовала расширения существующего класса моделей их описания. Оригинальные расширенные классы растровых и векторных моделей описания РИГД подробно рассмотрены в работах [2– 6]. В частности, на растровом уровне были предложены оригинальные модели растровых простых (РПО) и растровых составных (РСО) объектов. РПО разделяются на растровые линейные (РЛО) и растровые площадные (РПЛО) объекты. Класс векторных моделей был расширен линейной (ЛМИ) и сегментно–узловой (СУМИ) моделями. При этом, КМИ находится во взаимно – однозначном соответствии с РИСФГД, имеет самостоятельное значение, но может рассматриваться и как подготовительный этап формирования линейно–контурной модели, а ЛМИ может рассматриваться как вырожденный случай ЛКМИ. СУМИ – является векторной моделью, целиком описывающей все изображение в виде набора связанных множеств.

На рисунке 1 изображен фрагмент СУМИ СФГД, содержащий изображение элементов, характерных для векторного представления СФГД. Сегмент – ломаная, но в частных случаях отрезок, между пересечениями на изображении данной линии с другими линиями (рисунок 1, позиции 1, 2). При этом сегменты, часто являются границей между двумя контурными объектами. Для участка линии, ограниченного пересечением с другой линией только с одной стороны введено понятие сегмента со свободным концом (рисунок 1, позиция 3).

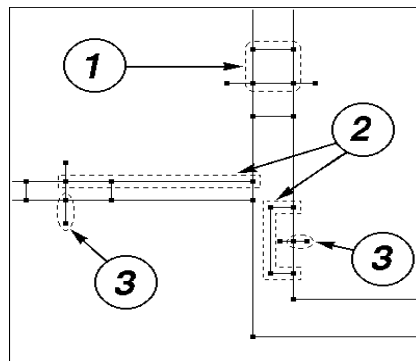


Рисунок 1. Пример представления СФГД в форме СУМИ.

В целях более строгого описания, формализованное представление СУМИ целесообразно связать с теорией графов [5, 6]. Если наложить ограничение, что сегмент СУМИ является исключительно отрезком прямой, ограниченным с обеих сторон узлами, то понятие “сегмент” можно считать синонимом термина “связь”. Таким образом, граф СУМИ есть множество $G = \{U, S\}$, состоящее из двух подмножеств. Подмножество U состоит из элементов типа “узел”: $U = \{U_1, U_2, \dots, U_p\}$, а подмножество S – из элементов типа “связь”: $S = \{S_1, S_2, \dots, S_q\}$. Дополнение каждой вершины графа G идентифицирующим ее номером позволяет отнести данный граф к классу помеченных графов.

Другой особенностью графа СУМИ является изначальное наличие у каждой его вершины-узла характеристики: координаты (X, Y) расположения узла на плоскости. Это обстоятельство позволяет однозначным образом отображать граф G на плоскости, что отличает его от большинства других графов произвольной природы, для которых конкретный вид схематичного изображения (диаграммы графа) зачастую не является существенным. Полная определенность при отображении графа СУМИ на плоскости позволяет говорить об этой модели как о модели изображения.

Применение СУМИ особенно эффективно при обработке СФГД с ярко выраженной топологической нагрузкой на линейные геометрические элементы изображения [3, 4, 6-8]. При этом топологическая модель определяется наличием и хранением совокупностей взаимосвязей, таких как соединенность дуг на пересечениях, упорядоченный набор сегментов, образующих границу каждого контура, и т. п. Топологические свойства фигур не изменяются при любых деформациях, производимых без разрывов или соединений. Топологической особенностью СФГД является массовое присутствие на них растровых прямолинейных объектов, образующих взаимные пересечения. Схожие особенности имеет и изображение диаграммы графа, вследствие чего именно для документов подобного рода применение СУМИ, также описывающейся в терминах теории графов, представляется особенно результативным.

В отличие от объектных векторных моделей СФГД, СУМИ не содержит объектов в обычном понимании, таких как контура, векторизованные линии, отрезки и пр. Переход от СУМИ на уровень объектных векторных моделей представляет собой отдельную задачу. КМИ, ЛКМИ и ЛМИ связаны с теми или иными алгоритмами векторизации СРК и обеспечивают геометрическую интерпретацию изображений в задачах анализа сцен и распознавания, а также метрическое описание информационных компонент растра [1, 2, 4].

4. Постановка задачи

Векторизация является базовой операцией в большинстве систем обработки и анализа ГИ. Если РИСФГД состоит в основном из взаимодействующих линейных протяженных объектов (схемы, технические чертежи и планы, гидрографические карты и планы) с четко выраженным направлением их ориентации, то в случае значительных объемов исходных растровых данных, штриховая форма представления позволяет сократить их и построить простые и надежные алгоритмы векторизации и, в случае необходимости, геометрической сегментации на линейные и площадные растровые объекты, т.е. осуществить эффективное геометрическое моделирование РИСФГД, а в случае малых объемов исходных растровых данных возможно

построение достаточно эффективных во временном смысле алгоритмов непосредственно по РИСФГД в пиксельной форме.

Если РИСФГД векторизуемых объектов не содержит искажений и шумов, то существующие локальные алгоритмы векторизации вполне удовлетворительно справляются с этой задачей, хотя надо иметь в виду, что получаемые при этом векторизованные объекты требуют дополнительного сглаживания либо аппроксимации, а это не всегда удается сделать успешно, то есть одновременно удовлетворить требованиям метрической точности аппроксимации и геометрической достоверности векторизованного объекта [1, 2, 4].

В рамках данной работы исходными данными для предлагаемой технологии векторизации является бинарное растровое изображение (БРИСФГД) с геометрическими размерами $N \times M$, являющееся описанием РИСФГД исходного документа как двухслойного пиксельного объекта:

$$R_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если пиксель относится к знаковому слою;} \\ 0, & \text{если пиксель относится к фоновому слою} \end{cases} \quad i = 1, \dots, N; \quad j = 1, \dots, M$$

Искомую геометрическую модель будем искать как совокупность множеств производных геометрических элементов: топологических узлов U , сегментов S , контуров K (рис.2): $U = \{U_i\}$, $i = 1, 2, 3, \dots, N_u$; $S = \{S_i\}$, $i = 1, 2, 3, \dots, N_s$; $K = \{K_i\}$, $i = 1, 2, 3, \dots, N_k$.



Рисунок 2. Производные элементы геометрической модели изображения.

На рисунке 2 показаны эти элементы на фоне РИСФГД, где:

- области 1 определяют фоновый растровый слой;
- области 2 определяют знаковый растровый слой;
- линии и узлы 3 определяют топологические узлы и короткие сегменты;
- линии 4 определяют сегменты осевых линий;
- линии 5 определяют контура площадных объектов.

5. Оригинальные процедуры и операции формирования геометрической модели СФГД

Предлагается набор усовершенствованных и оригинальных алгоритмов векторизации СФГД на базе низкоуровневой модели описания РИСФГД.

Описание состава множеств производных геометрических элементов.

Топологический узел описывается набором числовых характеристик $U\{x, y, swT, spN\}$, где x, y – растровые координаты узла, причем узловой пиксель всегда принадлежит знаковому слою; $swT = \{0, 1, \dots, v\}$ – коэффициент топологической связности, определяющий число исходящих из узла сегментов; $spN = \{N_1, N_2, \dots, N_s\}$ – список номеров сегментов, исходящих из данного узла.

Сегмент $S = \{x_1, y_1, \dots, x_t, y_t\}$ является межузловым фрагментом осевой линии и состоит из совокупности связанных пикселей знакового слоя, принадлежащих осевым линиям РЛО, где t – число узлов линейной аппроксимации множества связанных пикселей межузловых промежутков осевой линии.

Контур $K = \{x_1, y_1, \dots, x_k, y_k\}$ является описанием границ РПЛО совокупностью связанных граничных пикселей знакового слоя, где k – число узлов линейной аппроксимации множества граничных пикселей РПЛО.

Двухслойная модель растровых пиксельных данных и выбранная модель векторного описания позволяют легко расширить существующие методы и алгоритмы для векторного описания

совокупности РСО многоцветных документов, включая полноцветные растровые изображения ДЗЗ, а также растровые гиперспектральные изображения (ГСИ), прошедшие процедуру цветового (спектрального) расслоения (кластеризации).

Структурный анализ знакового слоя БРИСФГД показывает, что данный слой содержит следующие РСО:

- шумовые достаточно малых геометрических размеров («снег»);
- малогабаритные, являющиеся изображениями элементов множества дискретных знаков;
- крупноразмерные, представляющие собой изолированные линейные и площадные знаки, либо конгломерат из результатов наложения (слипания, касания) линейных, дискретных и площадных знаков.

В рамках КГП, предложенной авторами оригинальной иерархической модели представления растровых и векторных ПРД и в развитие существующих методов и алгоритмов, предлагается следующая последовательность оригинальных процедур и операций построения геометрической модели СФГД по совокупности РСО БРИСФГД, обеспечивающая высокий уровень достоверности при семантической расшифровке документа .

Этап 1 построение по знаковому слою БРИСФГД РСО – модели

1.1 составление списка знаковых пикселей знакового слоя Z растра R_1 :

$ListZP = \{Pix_i=1\} (i=1, 2, 3, \dots, Nz)$, где: Pix_i – знаковый пиксель с координатами x_i, y_i ;
 Nz – число знаковых пикселей слоя Z ;

1.2 пока список $ListZP$ не пуст, из него извлекается очередной, еще не кластеризованный пиксель, и, начиная с него, формируется РСО путем кластеризации по 8 – связной окрестности;

1.3 после завершения процедуры кластеризации множество пикселей, составляющих очередной РСО, преобразуются в векторный контур (этап 2) и вычеркиваются из списка $ListZP$;

1.4 если список $ListZP$ пуст, то этап построения РСО – модели считается завершенным.

Этап 2 контурный анализ РСО – модели

2.1 выделение из знакового слоя растра для каждой РСО множества граничных пикселей G ;

2.2 построение КМИ отслеживанием по пикселям G границ РСО, составляющих слой Z

2.3 параметризация всех построенных контуров измерением для каждого контура следующих геометрических характеристик: p_1 – длина контура по его периметру; p_2 , p_3 – ширина и высота описанного вокруг контура прямоугольника минимальной площади со сторонами, параллельными осям координат; p_4 – площадь контура;
 $p_5 = p_4 / p_1^2$ – внешний аспект контура.

2.4 сегментация контуров по параметрам $p_1 - p_5$ на: – шумовые, с их последующим удалением из исходного слоя Z ; дискретных знаков; изолированных площадных объектов; штриховых линейных отрезков малой длины и формирование из них множества V с последующим удалением соответствующих РСО из исходного слоя Z .

Таким образом, выходным результатом этапа является сформированная КМИ, содержащая векторизованные элементы слоя Z и модифицированный растр \tilde{R}_1 , не содержащий РСО, описывающих векторизованные объекты.

Этап 3 расщепление крупногабаритных РСО знакового слоя на площадные и линейные знаки и описание их набором геометрических элементов типа узлов, сегментов и контуров

3.1 расщепление модифицированного знакового слоя пикселей \tilde{R}_1 по его скелетонной модели [7] на следующие типы: «линейные» пиксели, принадлежащие осевым линиям РЛО; «площадные» пиксели, принадлежащие РПЛО; «узловые» пиксели, принадлежащие узловым точкам пересечения РЛО и РПЛО.

Операция выполняется методом последовательных, параметрически управляемых D – кратных морфологических пиксельных операций диффузии и дилатации [26, 27], где D – полутолщина РЛО.

Классификация пикселей на перечисленные выше типы выполняется на базе оригинальных распознающих масочных фильтров, позволяющих с большой достоверностью опознавать на пиксельном уровне заданные типы графических ситуаций.

- 3.2 для «узловых» пикселей измеряются их координаты и они заносятся в множество V векторных данных, как векторное описание топологических узлов искомой геометрической модели.
- 3.3 по «линейным» пикселям выполняется отслеживание межузловых промежутков осевой линии, ее линейная аппроксимация и занесения результатов отслеживания в множество V как сегментов ЛРО.
- 3.4 для «площадных» пикселей выполняется процедура D -кратного «напыления» и последующего построения контура площадного объекта с дальнейшей линейной аппроксимацией и занесением аппроксимированного контура в множество V .
- 3.5 для узловых пикселей по построенной метрике узлов, сегментов и контуров вычисляются их топологические характеристики: коэффициенты связности K_{sw} и список номеров исходящих из узлов сегментов.

Целевое параметрическое управление входным для всей процедуры параметром D (полутолщина ЛРО) можно получить по скелетону РИСФГД.

Таким образом, после завершения всех операций будет сформировано множество V векторных данных, состоящее из элементов следующих типов: узловых точек, контуров, сегментов, однозначно определяющих искомую геометрическую модель исходного СФГД.

Адекватная геометрическая модель с расщеплением на контурные (площадные) и линейно протяженные объекты с топологическими характеристиками их взаимодействия типа касания или пересечения показана на рисунке 2.

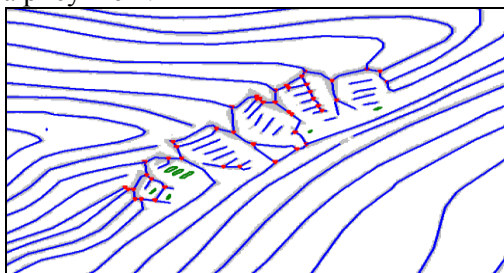


Рисунок 3. Фрагмент геометрической модели СФГД карты рельефа местности с выраженной нагрузкой линейными знаками.

Для поддержания всего многообразия алгоритмов классификации знакового наполнения графических документов, полученное таким образом множество векторных элементов V дополняется для текущего документа описанием его знакового пиксельного слоя Z в штриховом формате, что позволяет конструировать алгоритмы распознавания знаков по их комбинированному согласованному синхронному описанию (векторному и пиксельному). Эта возможность выгодно отличает предлагаемые методы и алгоритмы описания РИСФГД от существующих.

Рисунок 3 содержит фрагмент геометрической модели СФГД карты рельефа местности с выраженной нагрузкой линейными объектами, полученной путем применения рассмотренной технологии.

6. Заключение

В ходе проведенных исследований проанализированы документы, относящиеся к СФГД, выявлены их базовые особенности, влияющие на выбор моделей, методов и алгоритмов их обработки. Показана эффективность использования расширенного класса векторных моделей (ЛМИ и СУМИ) для описания СФГД с выраженной линейной ориентацией объектов, выявленная в ходе практических экспериментов на реальных СФГД.

7. Литература

- [1] Васин, Ю.Г. Комбинаторно–геометрический подход в задачах анализа сложной графической информации / Ю.Г. Васин, О.А. Башкиров, Б.М. Чудинович // Автоматизация обработки сложной графической информации: Межвуз. сб. науч. тр. ГГУ. – Горький, 1987. – С. 5-32.
- [2] Васин, Ю.Г. Математические модели структурированного описания графических изображений / Ю.Г. Васин, О.А. Башкиров, С.Б. Рудометова // Автоматизация обработки сложной графической информации: Межвуз. сб. науч. тр. ГГУ. – Горький, 1984. – С. 92-116.
- [3] Васин, Д.Ю. Автоматизация ввода символов на базе низкоуровневых моделей описания графических изображений // Приволжский научный журнал. – 2015. – Т. 3, № 35. – С. 109-115.
- [4] Васин, Ю.Г. Робастная векторизация графических документов с выраженной ориентацией линейных объектов / Ю.Г. Васин, Д.Ю. Васин, В.П. Громов, С.И. Ротков // Международная научная конференция по физико-технической информатике СРТ, 2018. – С. 313-317.
- [5] Харари, Ф. Теория графов / Ф. Харари. – М.: Мир, 1973. – 300 с.
- [6] Кристофидес, Н. Теория графов. Алгоритмический подход / Н. Кристофидес. – М.: Мир, 1978. – 432 с.
- [7] Гонсалес, Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс. – М: Техносфера, 2012. – 1104 с.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований, гранты РФФИ № 17-07-00543 и №18-07-00715.

Geometric modeling of raster images of documents with a weakly formalized description of objects

D.Yu. Vasin¹, V.P. Gromov¹, S.I. Rotkov²

¹Lobachevsky State University (National Research University), Gagarin Avenue 23, Nizhni Novgorod, Russia, 603952

²Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineeringamara University, Ilinskaya street 65 Nizhni Novgorod, Russia, 603952

Abstract. The paper analyzed graphic documents with a weakly formalized description of objects (WFDO), revealed their basic features that affect the choice of models, methods and algorithms for their processing. In the framework of the development of a combinatorial-geometric approach, a geometric model for the description of the WFDO with a pronounced orientation of linear objects is proposed. The technology of vectorization of bitmap images of WFDO in the presence of noise in the initial data is proposed. The efficiency of using an extended class of vector models (linear and segment – node models) for describing WFDO with a pronounced linear orientation of objects, revealed during practical experiments on real WFDO, is shown.