

МОДЕЛЬ И МЕТОД ВЕКТОРИЗАЦИИ РАСТРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ЧЕРТЕЖЕЙ ДЕТАЛЕЙ

УДК 004.93:519.71

ЧИЧКАРЕВ Евгений Анатольевич

д.т.н., доцент, профессор, заведующий кафедры информатики, ГВУЗ «ПГТУ», г. Мариуполь,
e-mail:influence@meta.ua

МОЛЧАНОВА Вера Сергеевна

ст. преподаватель кафедры информатики ГВУЗ «ПГТУ», г. Мариуполь,
Научные интересы: распознавание и обработка изображений, методы кодирования изображений
e-mail:vp24@yandex.ua

ВВЕДЕНИЕ

Разработка методов векторизации, гомотопно отображающих растровые копии чертежей в векторные модели для дальнейшей обработки CAD-системами, является актуальной научной проблемой [1-8]. Существующие методы векторизации справляются с векторизацией изображений в общем случае, однако они не учитывают специфики изображений машиностроительных чертежей деталей и CAD-систем, выполняющих их дальнейшую обработку. Так, например, большинство методов векторизации способны распознавать контур как композицию отрезков прямых, а кривые аппроксимируют сплайнами. Однако CAD-системы используют типизированный набор базовых примитивов: отрезок прямой, окружность, эллипс и их дуги; сплайны же используются только для представления иных лекальных кривых. К тому же аппроксимированные сплайнами дуги эллипсов и окружностей, сохраняют форму типизированных примитивов лишь визуально, но не параметрически; это приводит к наруше-

нию гомотопности векторного контура исходному контуру чертежа детали при масштабировании или повороте примитивов. Поэтому, задача разработки методов векторизации, специализированных на изображения машиностроительных чертежей деталей актуальна.

Существующие методы векторизации изображений можно классифицировать по базовому математическому аппарату.

1. Методы интегральных преобразований пространства изображения в пространство параметров примитива [1,2], которые основаны на преобразованиях Радона и Хафа [3]. Они ориентированы на распознавание отрезков прямых и дуг окружностей путём поиска максимума таблично заданной многомерной функции, параметризующей примитив. Различные модификации этих методов в целом сводятся к наложению разнообразных ограничений на параметры примитивов [4-5] и дают хороший результат в частных случаях, не позволяя, однако, параметризовать границы примитивов (а это неотъ-

емлемая часть векторизации растровых изображений чертежей деталей). Кроме того, увеличение количества параметров распознаваемого примитива сложной формы существенно увеличивает ресурсоёмкость, трудоёмкость и сложность методов этой группы.

2. Метод классификации особых точек алгебраических кривых [1] использует инварианты кривых произвольного порядка, позволяет определить тип кривой и вычислить её канонические параметры. Задача распознавания кривой в этом случае сводится к задаче определения коэффициентов алгебраического уравнения $a_1 \cdot x^2 + a_2 \cdot x \cdot y + a_3 \cdot y^2 + a_4 \cdot x + a_5 \cdot y = -a_6$, которому должны удовлетворять точки кривой. Кривая второго порядка вполне определяется 5 точками, никакие 4 из которых не лежат на одной прямой [3]. Недостаток метода состоит в его численной неустойчивости на изображениях, имеющих отклонения от идеальной формы, что характерно для растровых изображений чертежей. Модификации этого метода [6], ориентированные на достижение устойчивости решения, приводят к значительному росту вычислительной сложности задачи и, поэтому, применяются лишь для небольших изображений (что не характерно для чертежей).

3. Метод RANSAC [7] относится к методам аппроксимации множества точек кривой и основан на итеративном сборе статистики о входных данных. При этом на каждой итерации из облака точек изображения случайным образом выбирается подмножество фиксированного размера и аппроксимируется прямой, а количество точек облака, оказавшихся вблизи полученной прямой, запоминается. Прямая, вблизи которой оказалось наибольшее количество точек, считается наилучшей аппроксимацией точек изображения. Эф-

фективность метода зависит от количества итераций, алгоритма выбора подмножеств точек и их количества. Существенным недостатком данного метода является то, что он распознает лишь отрезки прямых.

4. Лингвистические методы векторизации [8-10] предполагают кодирование топологии контура изображения и распознавание примитивов контурным анализом полученных кодов с применением аппарата математической лингвистики. Методы этой группы различаются способами кодирования контура и формальными грамматиками, порождающими примитивы на основе наборов лингвистических правил.

Учитывая тот факт, что даже небольшие простые изображения чертежей деталей могут содержать множество геометрических примитивов, применение методов из групп (1-3) для решения задачи векторизации растровых изображений машиностроительных чертежей деталей не оправдано из-за их высокой трудо- и ресурсоёмкости, возрастающей с увеличением количества и сложности примитивов. Этих недостатков лишены лингвистические методы векторизации, предполагающие: естественный способ описания растрового изображения цепными кодами Фримена [11-13], выявление синтаксических закономерностей топологии распознаваемых примитивов и лингвистический контурный анализ изображения с целью их векторизации. Следует, однако, отметить, что существующие методы группы (4) оперируют набором лингвистических правил, недостаточным для распознавания и параметризации таких примитивов, как дуги произвольно расположенных окружностей и эллипсов, а также топологически сложных контуров изображений.

Цель работы состоит в разработке оригинальной модели и лингвистических методов векторизации растровых изобра-

жений, позволяющих распознавать и параметризовывать базовые примитивы (включая произвольно расположенные окружности, эллипсы и их дуги) и топологически сложные контуры машиностроительных чертежей деталей.

Статья состоит из 4 разделов. В первом разделе описываются исходные данные и приводятся определения основных понятий. Во втором разделе описывается разработанная лингвистическая модель векторизации растровых изображений машиностроительных чертежей деталей, а в третьем - новые лингвистические методы векторизации таких изображений. В четвертом разделе приведены результаты сравнительного тестирования разработанных методов.

1. Исходные данные и основные понятия

Пусть исходное бинарное растровое изображение контура G_D детали D , очищенное от визуальных искажений, представлено его скелетом G_D^s , заданным конечным облаком точек $G_D^s = \{g(i, j)\}$. В общем

случае под скелетом понимается контур изображения, не содержащий внутренних пикселей (все соседи которых в 8-окрестности, - чёрные) [14]. Под геометрическим примитивом (далее просто примитивом) будем понимать вектор-контур атомарной геометрической фигуры. Пусть вектор-контур \vec{L} формализует параметрически-заданный примитив «отрезок прямой», а вектор-контур \vec{D} – примитив «кривая второго порядка»: \vec{C} – эллипс, \vec{O} – окружность, \vec{ZC} – дуга эллипса, \vec{ZO} – дуга окружности (такой набор примитивов соответствует базовым примитивам CAD-систем). Точки $\{T\}$, ограничивающие примитивы, назовём «характеристическими точками». Под векторизацией G_D^s будем понимать гомотопное отображение $G_D^s \Rightarrow \vec{V}_D$ в вектор-контур \vec{V}_D , представляющий собой цепную композицию ранжированного множества вектор-контуров $\{\vec{L}\}$ и $\{\vec{D}\}$, определённых параметрами $\{P\} = \{P_L, P_C, P_O, P_{ZC}, P_{ZO}\}$ примитивов и соединённых в характеристических точках $\{T\}$ (рис. 1).

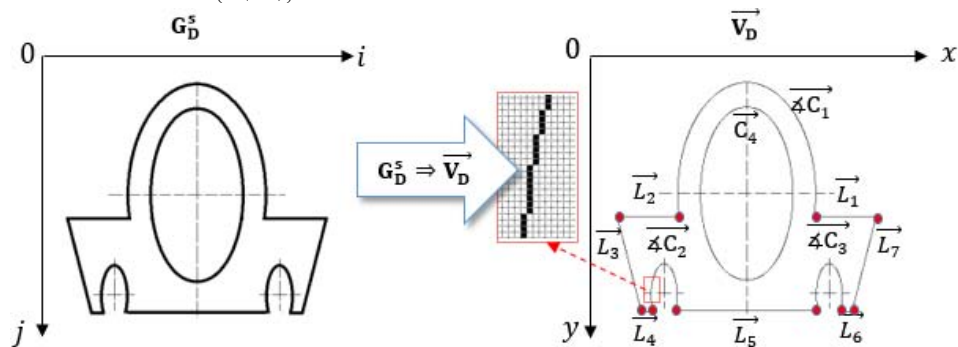


Рис. 1. Пример векторизации G_D^s композицией примитивов $\{(X, Y), \vec{L}, \vec{C}, \vec{ZC}, T\}$

Тогда топологию G_D^s можно однозначно моделировать ориентированным графом $\vec{V}_D = [T, \vec{N}]$ с вершинами $\{T\}$ и рёбрами $\{\vec{N}\} / \{\vec{L}, \vec{D}\} \{\vec{N}\}$, представляющими собой вектор-контур примитивов. Так, например, G_D^s внешнего контура детали, изображённый на рис. 1, отобразится в

$$\vec{V}_D = \left\{ \begin{array}{l} (T_1) \vec{L}_1 \rightarrow (T_2) \vec{ZC}_1 \rightarrow (T_3) \vec{L}_2 \rightarrow \\ (T_4) \vec{L}_3 \rightarrow (T_6) \vec{ZC}_2 \rightarrow (T_7) \vec{L}_5 \rightarrow \\ (T_8) \vec{ZC}_3 \rightarrow (T_9) \vec{L}_6 \rightarrow (T_{10}) \vec{L}_7 \rightarrow (T_1) \end{array} \right\}. \text{ Заметим,}$$

что, вследствие растеризации G_D по Брезенхему, представление контура примитивами $\{\vec{N}\}$ неоднозначно; так, например,

\overline{ZO} при небольших R_{ZO} аппроксимируется 8-связным квадратом, а при больших R_{ZO}

она локально эквивалентна \vec{L} (рис. 2).

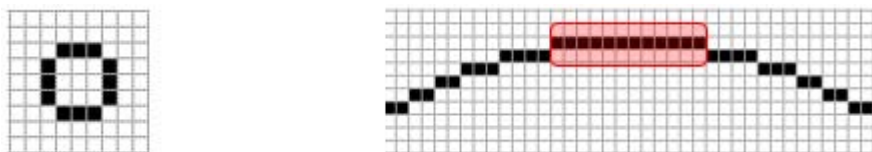


Рис. 2. Неоднозначность растрового представления контура примитивами

Поэтому, граф \overline{V}_D должен быть взвешенным ($f: \vec{N} \rightarrow \diamond$ - весовая функция, $\rho_k^{(u|c|z|o|z|o)}$ - веса рёбер; больший вес ребра определяет наиболее вероятный тип \vec{N} , аппроксимирующего $\{g(i, j)\}$ между начальной и конечной точками с наименьшей погрешностью ε . Графовая модель G_D^s позволяет формализовать контурный анализ G_D (сегментированием G_D^s на связанные растровые примитивы) и синтез вектор-контуров $\{\vec{N}\}$ в вектор-контур \overline{V}_D конкатенацией $\{\vec{N}\}$ в точках $\{T\}$ с оптимизацией графа \overline{V}_D объединением смежных относительно $\{\vec{N}\}$ в типизированный примитив).

2. Метод векторизации растрового скелета контура

2.1. Лингвистическая модель векторного изображения контура детали

Задачу векторизации $G_D^s \xrightarrow{v} \overline{V}_D$ удобно разделить на подзадачи:

1. $G_D^s \xrightarrow{sg} \{\{T\}, \overline{S}_k^{(F)}\}_K$ - распознавание $\{T\}$ и сегментация G_D^s выделением ранжированных вектор-контуров $\{\overline{S}_k^{(F)}\}_K$.
2. $\{\{T\}, \overline{S}_k^{(F)}\}_K \xrightarrow{fr} \{S_k^{(F)}\}_K$ - лингвистическое кодирование $\{\overline{S}_k^{(F)}\}_K$ словами $\{S_k^{(F)}\}_K$.
3. $\{S_k^{(F)}\}_K \xrightarrow{o} \left(\{\vec{N}\} \Rightarrow \{P\} \right)$ - контурный анализ $\{\overline{S}_k^{(F)}\}_K$ лингвистическим разбором

$\{S_k^{(F)}\}_K$ в соответствии с грамматикой Ω с целью распознавания $\{\vec{N}\}$ и их параметризации $\{P\}$.

$$4. \left(\{\vec{N}\} \Rightarrow \{P\} \right) \Rightarrow \left(\overline{V}_D = \bigcup_{k=1}^K [\{T\}, \{\vec{L}, \vec{D}\} \{\vec{N}\}] \right)$$

- синтез \overline{V}_D конкатенацией ранжированных $\{\vec{N}\}$ и оптимизация \overline{V}_D .

2.2. Метод сегментации растрового скелета контура

Метод сегментации G_D^s предусматривает распознавание $\{T\}$, параметризующих $\{\vec{N}\}$ координатами начальной и конечной точек, а также выделение из G_D^s ранжированных вектор-контуров $\{S_k^{(F)}\}_K$.

Разработанный метод распознавания и классификации $\{T\}$ с количеством связей > 2 в шахматной метрике основан на формировании и анализе структур связности $\{T\}$ - отношений «координаты точки» \leftrightarrow «количество связей» \leftrightarrow «код связности». Для этого выполняется однопроходное сканирование G_D^s спроектированными шаблонами связности (табл. 1) и апертурный анализ 8-окрестностей каждой точки $\{g(i, j)\}_0^7 \in G_D^s$, дающий полную информацию о типах $\{T\}$ (изолированные, концевые, угловые, ветвления, пересечения). Точки $\{g(i, j)\}$ чёрного цвета, у которых количество связей ≥ 2 , принадлежат $\{T\}$. Они запо-

минаются в структуре связности, а направления на соседние точки упаковываются в «код связности» (рис. 3).

Распознавание характеристических точек с количеством связей ≤ 2 (точек сопряжений примитивов, например, отрезка прямой с дугой окружности) с помощью шаблонов связности нецелесообразно: достоверность его мала, поскольку требует предварительной типизации и параметризации примитивов (эту проблему полностью решает операция бисекционирования скелета, описанная в разделе 3.2).

Сегментация G_D^s производится стиранием $\{T\}$ вместе с их 8-окрестностями $\{A_i\}_0^7$

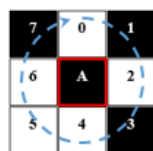
(рис. 4). Тем самым скелет преобразуется в ориентированный граф \overline{V}_D с вершинами в $\{T\}$, направленность рёбер которого обусловлена выбранным направлением обхода.

Реконструкция G_D^s в стёртых «областях разрыва» выполняется на основе анализа распознанных примитивов и кодов связности, что позволяет корректно объединять $\{S_k^{(F)}\}_K$ в областях разрыва выбором пар сегментов со сходными параметрами примитивов, не спутав их при этом с близко расположенными изолированными сегментами G_D^s .

Табл. 1.

Шаблоны связности

Номер	Шаблон	Номер	Шаблон	Номер	Шаблон
0		4		8	
1		5		9	
2		6		10	
3		7		11	



$$1 \cdot 2^7 + 0 \cdot 2^6 + 0 \cdot 2^5 + 0 \cdot 2^4 + 1 \cdot 2^3 + 0 \cdot 2^2 + 1 \cdot 2^1 + 0 \cdot 2^0 = 138$$

Рис. 3. Способ формирования кода связности характеристической точки А

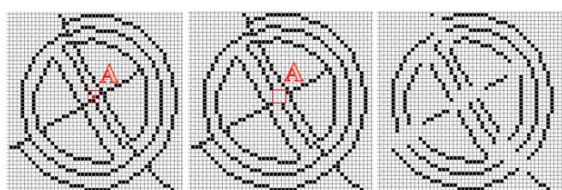


Рис. 4. Пример сегментации G_D^s в характеристической точке A

Достоинством предложенного метода является возможность восстановления гомотопности G_D и G_D^s , которая в процессе скелетизации контура обычно утрачивается именно в точках $\{T\}$. Такой подход также позволяет избежать неоднозначности в выборе очередной точки G_D^s во время его трассировки при лингвистическом кодировании $\{S_k^{(F)}\}_K$.

2.3. Метод лингвистического кодирования сегментов скелета

Для выполнения контурного анализа G_D^s требуется формальное его описание, адекватно отображающее топологию. Естественным методом описания дискретного G_D^s является цепное 8-связное кодирование по Фримену [15], в процессе которого каждой точке $(i, j)_q \in G_D^s$ ставится в соответствие номер $\bar{s}_q \in [0; 7]$ единичного вектора, направленного из текущей точки $(i, j)_q$ контура в следующую $(i, j)_{q+1}$. Цепной Фримен-код сегмента $\bar{s}_k^{(F)}$ с начальной $(i, j)_0$ и конечной $(i, j)_n$ точками целесообразно сформировать как слово: $(i, j)_0, \bar{s}_1, \dots, \bar{s}_q, \dots, \bar{s}_n, (i, j)_n$ где \bar{s}_q – q -ый единичный вектор.

Обход контура сегмента в предложенном методе выполняется усовершенствованным «методом жука» [16], в котором:

1. Поиск очередного направления в единичной 8-окрестности $\{A_q\}_0^7$ точки $(i, j)_q$ выполняется по новой гибридной схеме

направлений: « $0 \rightarrow 4 \rightarrow 2 \rightarrow 6$ » \rightarrow « $1 \rightarrow 5 \rightarrow 7 \rightarrow 3$ », сохраняющей топологию G_D^s . Рассмотрим, например, единичную окрестность некоторой точки (i, j) , в которую попадают точки с координатами $(i \pm 1, j \pm 1)$ (рис. 5). Если обзор окрестности точки (i, j) выполнен по часовой стрелке (схема « $0 \rightarrow 1 \rightarrow \dots \rightarrow 6 \rightarrow 7$ »), то точка $(i, j-1)$ трассируется (рис. 5, а) и код сегмента равен «022», а против часовой стрелки (схема « $0 \rightarrow 7 \rightarrow \dots \rightarrow 2 \rightarrow 1$ ») – точка $(i, j-1)$ не трассируется (рис. 5, б) и код сегмента равен «12».

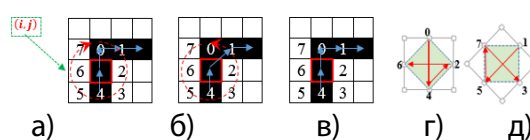


Рис. 5. Схема трассировки фрагмента G_D^s в точке (i, j)

Новый же вариант обзора единичной 8-окрестности каждой точки G_D^s по гибридной схеме направлений (рис. 5, г, д) позволяет сохранять однозначность Фримен-кода G_D^s при любых взаиморасположениях точек G_D^s и любых направлениях обхода контура.

2. Обзор окрестности изображения с целью поиска пути дальнейшего перемещения по контуру в процессе кодирования G_D^s каждый раз начинается не с «0», а с направления перемещения на предыдущей итерации. Это целесообразно поскольку на изображениях чертежей большая часть примитивов представлена линиями, направление перемещения по которым, в целом постоянно.

В случае цепной композиции примитивов в сегменте $\bar{s}_k^{(F)}$ выполняется его лин-

лингвистический анализ рекурсивным бисекционированием слова $S_k^{(F)}$ (рис. 6) (символы непараметризованных фрагментов

секции выделены синим цветом, параметризованных – красным).

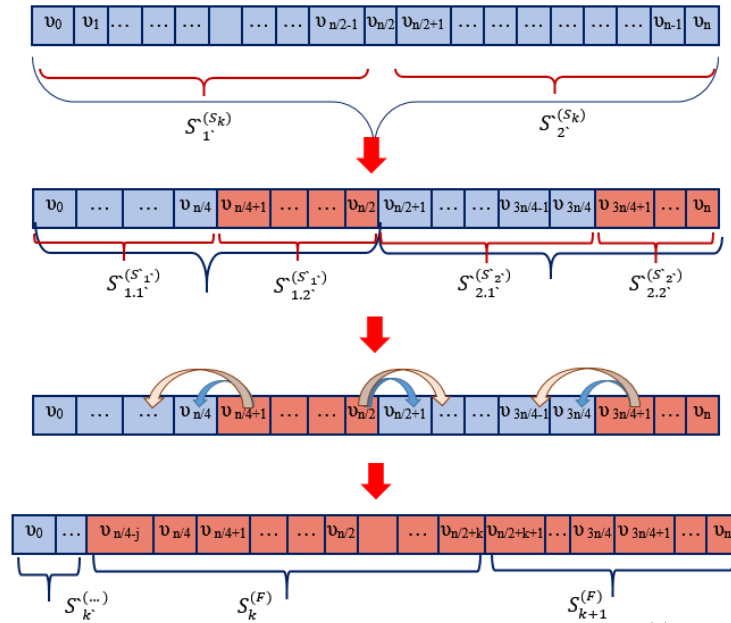


Рис. 6. Пример рекурсивного бисекционирования слова $S_k^{(F)}$

Операция бисекционирования продолжается до тех пор, пока не будут параметризованы все секции $S_k^{(F)}$. Не распознанные вышеописанным методом секции аппроксимируются B-сплайнами.

2.4. Методы распознавание и параметризация примитивов контура

Оригинальные методы распознавания \vec{L} и \vec{D} в $S_k^{(F)}$ основаны на синтаксическом анализе слова $S_k^{(F)}$. $S_k^{(F)}$ состоит из символов $\{v_q\}_Q (v_q \in [0;7])$ Фримен-кода с целью проверки соблюдения выявленных характерных для примитивов лингвистических правил, наличие которых в $S_k^{(F)}$ является необходимым условием классификации примитива. Вследствие погрешностей rasterization, достаточным условием интер-

претации $S_k^{(F)}$ как типизированного примитива, является результат верификации на предмет удовлетворения его геометрическим свойствам. Вес ρ_k ребра \vec{V}_D , описываемого словом $S_k^{(F)}$, определяется отношением количества символов в $S_k^{(F)}$, для которых правила выполняются, к длине $S_k^{(F)}$.

На основе идеи дискретизации контура [11, 12] и анализа $S_k^{(F)}$ различных прямых (рис. 7) для распознавания \vec{L} предложены следующие лингвистические правила:

- 1) при $v_q = v_{q+1}$ \vec{L} наклонён к оси абсцисс под $\angle \alpha = n \cdot 45^\circ$ (n – кратность);
- 2) при $|v_{q+1} - v_q| \leq 1$ или $|v_{q+1} - v_q| = 7$ (причём при $v_{q+1} \neq v_q$ обязательно соблюдение $v_q = v_{q+2}$) $S_k^{(F)} \equiv \vec{L}$;

5) если $k = 0$ (k - угловой коэффициент \vec{C}), то количество m ведущих кодов в коде $S_k^{(F)}$ постоянно и зависит лишь от выбора начальной точки обхода: $m = 8 \forall w_7 - w_0 \in \{1, 7\}$ и $m = 9 \forall w_8 = w_0$;

б) вследствие центральной симметрии \vec{C} справедливо: $z_q = z_{q+4} \pmod{8}$;

7) вследствие замкнутости \vec{C} для $S_k^{(F)}$ справедливо: $|v_{z_q} - v_0| \leq 1$ и $|v_{z_q} - v_0| = 7$.

Примитив может быть параметризован как \vec{C} , если $\rho_k^{(C)} \geq \delta^{(C)}$ (экспериментально подтверждена корректность результатов при $\delta^{(C)} \approx 0.91$).

Правила распознавания \vec{C} применимы для \vec{ZC} , охватывающей большую ось; в противном случае информации о форме одной четверти \vec{C} достаточно для реконструкции остальных частей симметрированием \vec{ZC} ; для этого выполняется поиск в сегменте $S_k^{(F)}$ точек пересечения \vec{ZC} с полуосями, реконструируется \vec{C} и анализируется слово $S_k^{(F)}$.

Правила параметризации \vec{C} :

1) из выражения $2a = \max_{i,j \in [1,n-1]} \left\{ \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \right\}$ по коду $S_k^{(F)}$ считаются расстояния между всеми парами точек $\{A(x, y)_i, B(x, y)_j\} (i \neq j)$ сегмента $S_k^{(F)}$, а пара точек A и B , расстояние между которыми максимально, определяет концы полуоси «а» ($a = |AB|$);

2) согласно $k = (y_B - y_A) / (x_B - x_A)$, $x_B \neq x_A$, $b = y_A + k \cdot x_A$ рассчитываются k и b уравнения прямой $y = k \cdot x + b$, задающей полуось «а»;

3) координаты $(x, y)_0$ центра \vec{C} рассчитываются по формулам: $x_0 = (x_A + x_B) / 2$, $y_0 = (y_A + y_B) / 2$, а для расчёта координат $(x, y)_{F_1}$ фокуса F_1 и $(x, y)_{F_2}$ фокуса F_2 применяется итерационная процедура:

Шаг 1. Пусть точки $(x_{F_1}^*, y_{F_1}^*) \equiv A$ и $(x_{F_2}^*, y_{F_2}^*) \equiv B$ (A и B симметричны относительно центра \vec{C}) представляют собой потенциальные фокусы эллипса: $(x_{F_1}, y_{F_1}) = (x_{F_1}^*, y_{F_1}^*)$ и $(x_{F_2}, y_{F_2}) = (x_{F_2}^*, y_{F_2}^*)$.

Шаг 2. Для точек $\{(x, y)_i\} \in S_k^{(F)}$ по формуле

$\sqrt{(x_i - x_{F_1})^2 + (y_i - y_{F_1})^2} + \sqrt{(x_i - x_{F_2})^2 + (y_i - y_{F_2})^2} = 2a \pm \varepsilon$ рассчитывается сумма расстояний от точки $(x, y)_i$ до потенциальных фокусов.

Если для текущей точки $(x, y)_i$ «а» не удовлетворяет выражению, то точки $(x^*, y^*)_{F_1}$ и $(x^*, y^*)_{F_2}$ смещаются на 1 позицию ближе к центру \vec{C} и выполняется переход к шагу 1. В противном случае фокусы считаются найденными: $(x, y)_{F_1} = (x^*, y^*)_{F_1}$, $(x, y)_{F_2} = (x^*, y^*)_{F_2}$ и по формулам:

$c = |OF_1|$, $b = \sqrt{a^2 - c^2}$ рассчитывается размер полуоси «b».

Если же в результате выполнения этой итерационной процедуры фокусы найти не удалось, то считается, что сегмент $S_k^{(F)}$ не описывает эллипс.

Частным случаем \vec{C} является \vec{O} ; при этом $R = a = b$ (R - радиус \vec{O}), а параметр k не учитывается. Сегмент $S_k^{(F)}$ может быть отнесен к классу «окружность», если он успешно прошёл верификацию на при-

надлежность классу «эллипс» и $a = b \pm \varepsilon$ (ε – погрешность расчёта).

Векторное изображение \vec{v}_D синтезируется как композиция распознанных примитивов $\{S_k^{(F)}\}_1^K$ конкатенацией соседних слов $S_k^{(F)}$ и $S_{k+1}^{(F)}$ с добавлением недостающего слова $S_k^{(F)}$ в место их слияния на основе сохранённых ранее кодов связности (тем самым производится оптимизация \vec{V}_D).

Не распознанные вышеописанными методами примитивы, аппроксимируются B-сплайнами.

3. Результаты экспериментов

На основе предложенных в статье методов векторизации G_D^s разработан про-

граммный комплекс ВЕКТОРИЗАТОР, который позволил получить образцы, пригодные для сравнительного анализа качества результатов векторизации растровых изображений машиностроительных чертежей деталей с результатами существующих альтернативных векторизаторов. Результат этого анализа на 40 образцах показал улучшение базовых показателей качества распознавания типов примитивов ($PCRE_{L|O|C|Z|OC}$) в среднем на 49,53% и оценок гомотопности (MSE, PSNR, UIQI, SSIM, Precision, Recall, F-measure, Accurase) исходного растрового и результирующего векторного изображений - в среднем на 18,61% (табл. 2). Эти результаты свидетельствуют о достоверности и эффективности разработанных моделей и методов.

Табл. 2.

Результат сравнительного анализа показателей качества векторизации G_D^s

Критерий качества векторизации	Метрика	Альтернативные векторизаторы					Разработанный ВЕКТОРИЗАТОР	Улучшение метрики, %	Усреднённое улучшение в целом, %
		WinTopo	VectorNow	Vextractor	Img2CAD	Spotlite			
Критерии оценки достоверности распознавания типов примитивов	$PCRE_L, \%$	82,65	66,57	42,41	71,42	92,41	98,72	1,30	49,53
	$PCRE_O, \%$	0,00	0,00	8,33	0,00	37,92	100,00	22,09	
	$PCRE_C, \%$	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	15,00	
	$PCRE_{Z(OC)}, \%$	0,00	0,00	30,00	0,00	40,00	100,00	30,00	
Критерии оценки гомотопности	MSE	0,05	0,06	0,05	0,06	0,06	0,04	0,27	18,61
	PSNR	18,95	18,92	18,91	18,79	18,39	20,63	0,08	
	UIQI, %	24,34	24,51	25,02	22,88	20,30	70,92	44,70	
	SSIM, %	99,87	99,87	99,87	99,87	99,86	99,94	0,06	
	Precision, %	91,79	90,34	88,88	85,31	78,01	75,47	-20,81	
	Recall, %	28,49	28,76	28,70	30,48	24,47	71,74	41,64	
	F-measure, %	43,15	43,14	42,89	43,75	36,73	73,35	27,93	
Accuracy, %	94,65	94,35	94,63	94,47	93,83	96,35	1,49		

ВЫВОДЫ

В данной статье описана разработанная оригинальная модель и новые методы

векторизации растровых изображений инженерных чертежей деталей. Сравнительный статистический анализ разрабо-

танных методов и их аналогов на тестовых изображениях чертежей показал существенное улучшение усреднённых базовых показателей качества на всех этапах трансформации растрового образа скелета детали в гомотопный ему векторный образ. Это подтверждает достоверность и эффективность разработанных методов.

Предложенные методы ориентированы на их практическое использование в CAD-системах, на их основе разработан программный комплекс, автоматизирующий

трудоёмкие этапы преобразования растрового образа скелета детали в гомотопный ему векторный образ и позволяющий: снизить затраты ручного труда, уменьшить сроки разработки проектов, повысить качество и совместимость полученных векторных образов с CAD-системами. Практическая значимость результатов исследований подтверждается актами внедрения на промышленных предприятиях.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Sorokin A. I. Raspoznavanie prostykh linij na izobrazhenii / A. I. Sorokin, S. A. Zapryagaev // *Prikladnaya informatika*. – 2009. – №4. – С. 76–84.
2. Kudrina M. A. Ispolzovanie preobrazovaniya Xafa dlya obnaruzheniya pryamyyh linij/ M. A. Kudrina // *Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk*. – 2014. – №4 (2). – С. 476-478.
3. Deans R. The Radon Transform and Some of Its Applications / R. Deans // New York: John Wiley & Son. – 1983. – P. 304
4. Kudrina M. A. Vektorizaciya rastrovyyh izobrazhenij s ispolzovaniem preobrazovaniya Xafa / S. A. Kiryakov, K. A. Kudrin, O. A. Degtyareva // *Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma «Nadezhnost i kachestvo»*. - tom.1. – 2013. – С. 337- 340.
5. Smereka M. Circular object detection using a modified Hough transform/ Smereka M., Duleba I.// *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science*. – Vol. 18, Iss. 1, №1. – 2008. – P. 85-91.
6. Ning J. Interactive image segmentation by maximal similarity based region merging / J. Ning, L. Zhang, D. Zhang, CWu // *Pattern recognition*. – Vol. 43, Iss. 2. – 2010. – P. 445 – 456.
7. Fischler M. A. Random Sample Consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. / M. A. Fischler, R. C. Bolles // *Communications of ACM*. –1981. – vol. 6(24). – P. 381-395.
8. Parzhin Yu. V. Vektorizaciya struktury konturnyyh izobrazhenij pri reshenii zadach raspoznavaniya/ Yu. V. Parzhin, N. Yu. Lyubchenko, N. M. Nenasheva// *Sistemi obrobki informacii*. – 2004. – vip. 3. – С. 157–161.
9. Rusyn B. P. Strukturno-lingvisticheskie metody raspoznavaniya izobrazhenij v realnom vremeni/ B. P. Rusyn. – К.: Nauk. dumka. - 1986. - 125 s.
10. Lingvisticheskie metody v zadachax raspoznavaniya izobrazhenij/ V. A. Tupikov, V. A. Pavlova, S. N. Kryukov i dr. // *Izvestiya YuFU. Texnicheskie nauki*. – 2015. - №1(162). – С. 142-151.
11. Kalmykov V. G. Strukturnyj metod raspoznavaniya otrezkov cifrovyyh pryamyyh v konturpx binarnyyh izobrazhenij / V. G. Kalmykov // *Iskusstvennyj intellekt*. – 2002. - №4. – С. 450-457.
12. Vishnevskij V. V. Strukturnyj analiz cifrovyyh konturov izobrazhenij kak posledovatelnosti otrezkov pryamyyh i dug krivykh / V. V. Vishnevskij, V. G. Kalmykov // *Iskusstvennyj intellekt*. – 2004. - №3. – С. 479-488.
13. Deglina Yu. B. Avtomatnoe raspoznavanie ocifrovannyh mnogougolnikov / Yu. B. Deglina, V. A. Kozlovskij, K. A. Kostogryz// *Iskusstvennyj intellekt*. – 2004. - №3. – С. 443-452.
14. Molchanova V. S. Vosmisvyaznyj asimmetrichnyj algoritm skeletizacii binarnyyh izobrazhenij / V. S. Molchanova // *Visnik Sums'kogo derzh. un-tu. Seriya: Texnichni nauki*. – 2013. – №2. – С. 43–50.
15. Furman Ya. A. Vvedenie v konturnyj analiz; prilozheniya k obrabotke izobrazhenij i signalov / A. V. Kreveckij, A. K. Peredreev, A. A. Rozhencov. – М.: Fizmatlit, 2003. – 592 s.
16. Ablamejko S. V. Obrabotka izobrazhenij: tehnologiya, metody, primenenie / S. V. Ablamejko, D. M. Lagunovskij. – Minsk: Amalfeya. – 2000. – 304 s.
17. Rodzhers D. Algoritmicheskie osnovy mashinnoj grafiki / D. Rodzhers. – М.: Mir. – 1989. – 512 s.
18. Akopyan A. V. Geometricheskie svojstva krivykh vtorogo poryadka / A. V. Akopyan, A. A. Zaslavskij. – М.: МСНМО. – 2007. – 136 s.

Рецензент: д.т.н., проф. Рудакова А.В.
Херсонский национальный технический университет