

СИСТЕМНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

УДК 519.2

А.А. Лигун, А.А. Шумейко, Д.В. Тимошенко

ЛОКАЛИЗАЦИЯ И ФОРМИРОВАНИЕ ЛИНИЙ НА
ИЗОБРАЖЕНИИ

В задачах обработки изображений важное место занимает обнаружение и выделение линий и контуров [1]. Контурные области являются областями изображения с высокой концентрацией информации, мало зависящей от цвета и яркости, поэтому в последнее время возрос интерес к методам обработки визуальных данных, базирующихся на анализе контуров, а не на обработке каждого пикселя изображения [2]. Особый интерес такие задачи вызывают при обработке данных фотосъемок и обработке электронных документов [3,4]. На этапе векторизации электронного документа проводится разделение информационных слоев, одним из которых является слой деловой графики (векторная компонента).

Работу с линиями и контурами изображения можно условно разбить на три этапа:

- локализация местонахождения линий;
- формирование структуры линии;
- аналитическое описание линии.

Задаче обнаружения и описания линий посвящено большое количество работ (см., например, [1,5,6]). Чаще всего для выделения линий на изображении, применяют методы, основанные на свертке матрицы изображения с разностными операторами, что позволяет уловить скачек яркости или цвета у контуров. Обычно (см. [5]) для этой цели используют свертку с фильтрами Превитта:

$$\begin{pmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & -1 \end{pmatrix}$$

или фильтрами Собела

$$\begin{pmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{pmatrix}.$$

Такого рода подходы позволяют получать простые и довольно эффективные методы выделения нитевидных структур на изображении в случае, если они достаточно контрастны на окружающих их фоне. Выделение слабоконтрастных, нечетких линий с использованием разностных (градиентных) фильтров приводит к тому, что места изображения, полученного в результате свертки, содержащие линии, имеют тот же уровень значений, что и места с шумом, что не позволяет автоматизировать процесс выделения и описания линий и контуров.

Для иллюстрации предлагаемых методов мы будем использовать фрагменты тестового изображения ISO-400 “Bicycle”.

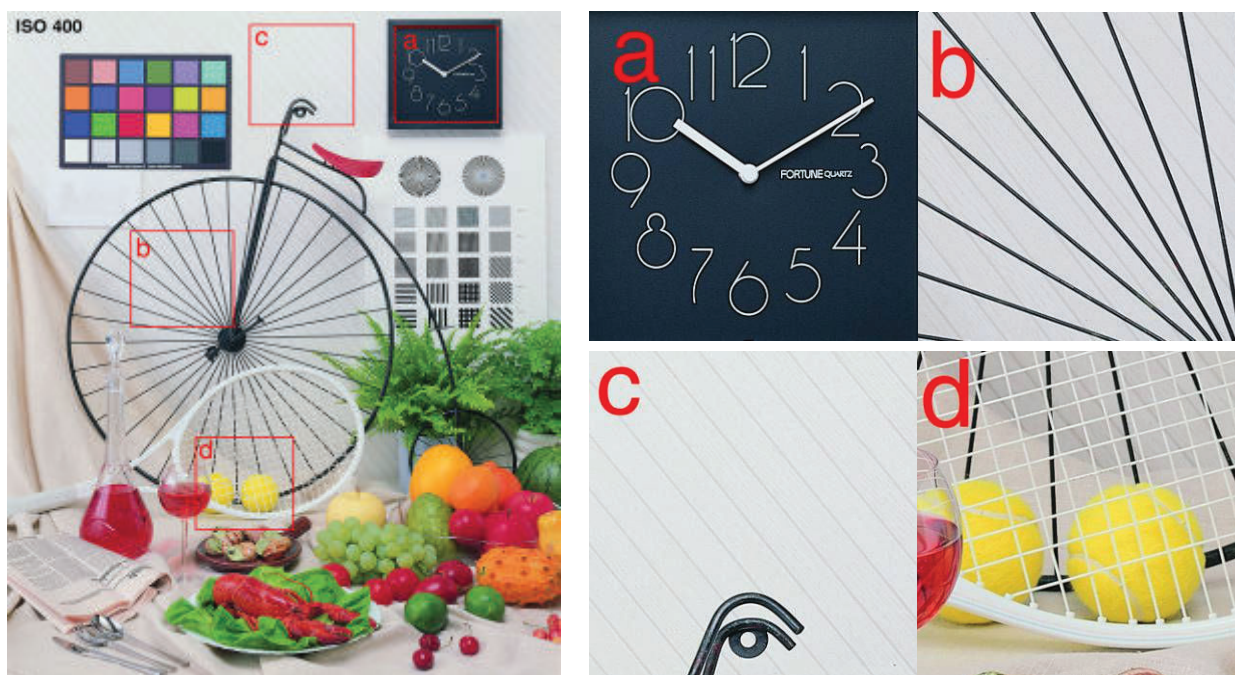


Рисунок 1 – Тестовый пример «Bicycle». На рис 1a и рис. 1b приведены примеры линий, контрастных на окружающем фоне, на рис. 1c и рис. 1d примеры линий, слабоконтрастных на окружающем фоне

На практике задачу выделения линий на изображении, можно разделить на два случая:

1. Выделение четких, контрастных линий, например, фрагменты чертежа или таблицы (рис. 1a, 1b). В этом случае они хорошо поддаются векторизации, и основная проблема состоит в эффективном аналитическом описании.
2. Локализация нечетких, слабоконтрастных линий, например, на отсканированных документах или данных фотосъемок (рис. 1c, 1d). В этом случае основная проблема сосредоточена в способе их обнаружения и выделения.

Целью данной статьи является локализация и формирование слабоконтрастных линий с нечетной структурой относительно фона близлежащих точек. Наши исследования состоят из трех этапов:

- формирование множества точек фона;
- формирование множеств контрастных относительно фона;
- формирование линий.

Формирование точек фона. Понятие локального фона является ключевым и интуитивно под фоном понимается множество точек изображения, каждая из которых имеет достаточное число соседей со схожей яркостью. При этом плохо различимые линии на изображении состоят из точек, которые по своей яркости очень близки к яркости соседних точек фона. Ниже эти понятия мы формализуем.

В дальнейшем мы будем работать с яркостной составляющей изображения, представляющей собой числовую матрицу $Y = \{y_{i,j}\}_{i=1,j=1}^{W,H}$, где компонента яркости определяется, например, следующим образом

$$y_{i,j} = \frac{1}{23}(7r_{i,j} + 14g_{i,j} + 2b_{i,j}),$$

здесь $r_{i,j}, g_{i,j}, b_{i,j}$ цветовые компоненты (красный, зеленый и синий) пикселя с координатами (i, j) . Заметим, что вместо значения яркости можно использовать любую другую компоненту цвета.

Через $C_{i,j}^R = \{(v, \mu) : (i-v)^2 + (j-\mu)^2 \leq R^2\}$ обозначим окрестность точки (i, j) радиусом R (в нашем случае рассматривалось $R=3$) и каждой точке изображения поставим в соответствие среднюю яркость окрестности

$$b_{i,j}^R = \frac{1}{\sum \{1 \mid (v, \mu) \in C_{i,j}^R\}} \sum \{y_{v,\mu} \mid (v, \mu) \in C_{i,j}^R\}. \quad (1)$$

Для заданного $\delta > 0$ определим множество

$$\mathfrak{R}(\delta) = \{(i, j) : |y_{i,j} - b_{i,j}^R| < \delta\}.$$

Все точки этого множества будем называть первичными точками фона по порогу δ . При определении множества первичных точек фона, использовались точки, которые в дальнейшем не вошли в это множество, поэтому переопределим понятие окрестности, опираясь на информацию только о точках из $\mathfrak{R}(\delta)$

$$\tilde{C}_{i,j}^R = \{(v, \mu) \mid (v, \mu) \in C_{i,j}^R, (v, \mu) \in \mathfrak{R}(\delta)\}.$$

Используя уточненное понятие окрестности первичной точки фона, заново найдем значение яркости фона в точке (i, j)

$$\tilde{b}_{i,j} = \frac{1}{\sum \{1 \mid (v, \mu) \in \tilde{C}_{i,j}^R\}} \sum \{y_{v,\mu} \mid (v, \mu) \in \tilde{C}_{i,j}^R\}.$$

Значения яркости точек, принадлежащих линиям, слабоконтрастным относительно окружающего фона, более существенно отличаются от значений яркости фона, чем значения точек, не лежащие на подобных местах. При выделении линий естественно потребовать, чтобы точки, которые могут им принадлежать, не принимали участие в формировании яркости фона. Для этой цели построим следующую процедуру.

Для каждой точки окрестности $\tilde{C}_{(i,j)}^R$ найдем ошибку описания ее яркости средним значением фона

$$e_{v,\mu}^{(i,j)} = |y_{v,\mu} - \tilde{b}_{i,j}|, \text{ где } (v, \mu) \in \tilde{C}_{i,j}^R,$$

и построим множество точек $M_{(i,j)}^R$, состоящее из Θ – процентов точек $(v, \mu) \in \tilde{C}_{i,j}^R$, для которых значения ошибок $e_{v,\mu}^{(i,j)}$ максимальны (например, $\Theta \approx 20\%$). Вычислим новые средние значения, удалив точки с максимальным отклонением

$$\tilde{b}_{i,j}^M = \frac{1}{\sum \{1 \mid (v, \mu) \in \tilde{C}_{i,j}^R / M_{(i,j)}^R\}} \sum \{y_{v,\mu} \mid (v, \mu) \in \tilde{C}_{i,j}^R / M_{(i,j)}^R\}.$$

Аналогично предыдущему, собственно фоновыми точками будем считать точки, удовлетворяющие условию

$$|y_{i,j} - \tilde{b}_{i,j}^{M(i,j)}| < \varepsilon, (i, j) \in \mathfrak{R}(\delta), \quad (2)$$

где $\varepsilon > 0$ - параметр, регулирующий количество точек фона.

Все точки, удовлетворяющие условию (2), образуют множество точек фона $\tilde{\mathfrak{R}}(\Theta, \delta)$.

Формирование множеств точек, контрастных на фоне. Точки, принадлежащие множеству $P^\delta = \mathfrak{R}(\delta) / \tilde{\mathfrak{R}}(\Theta, \delta)$, будем называть точками, контрастными на фоне. Все эти точки подозрительны на предмет формирования линий. Через $\{P_k^\delta\}_{k=1}^n$ обозначим множества связанных точек изображения, то есть, для которых выполняется условие связности двух точек (i, j) и (v, μ)

$$\max\{|i - v|, |j - \mu|\} = 1.$$

Мерой множества A будем называть величину

$$M(A) = \sum \{1 \mid (i, j) \in A\}.$$

Заметим, что во множество P^δ могут попасть точки содержащие шум. Поэтому прежде чем, приступить к формированию линий на базе множества $\{P_k^\delta\}_{k=1}^n$, необходимо провести очистку изображения от шумов. Не останавливаясь на этом вопросе подробно, заметим, что фильтрация данных от шума является важной и интересной задачей, существуют различные алгоритмы очистки, в данном случае можно воспользоваться методом удаления элементов с малой мерой. Таким образом, в результате получаем множество $\{P_k^\delta\}_{k=1}^m$ связанных точек, подозрительных на линии слабоконтрастные относительно фона (рис. 2b).

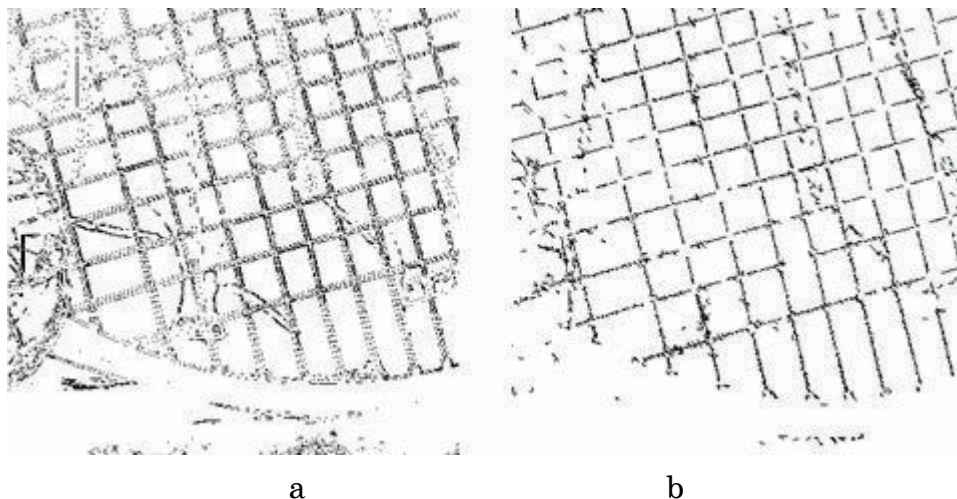


Рисунок 2 – а) выделение нечетких линий с помощью фильтров Собела; б) выделение нечетких линий с помощью предложенного подхода

Следующим этапом является формирование из множеств $\{P_k^\delta\}_{k=1}^m$ собственно линий.

Формирование линий. Сложность топологической структуры множеств $\{P_k^\delta\}_{k=1}^m$ не позволяет реализовать их эффективную обработку, поэтому является актуальным описание множеств $\{P_k^\delta\}_{k=1}^m$ объектами более простой конструкции – линиями, чему посвящены дальнейшие наши построения.

Так как любое связанное множество можно представить в виде подмножества объединения кругов, то $P_k^\delta \subset \bigcup_{(i,j) \in B_k} C_{(i,j)}^{R_{(i,j)}}$. Связное

множество $B(P_k^\delta) = \{(i_\nu, j_\nu)\}_{\nu=1}^{N_k}$ будем называть каркасом множества P_k^δ , если оно дает решение следующей экстремальной задачи

$$\begin{cases} \sum_{(i,j) \in B_k} M(C_{(i,j)}^{R(i,j)}) \rightarrow \min; \\ P_k^\delta \subset \bigcup_{(i,j) \in B_k} C_{(i,j)}^{R(i,j)}. \end{cases} \quad (3)$$

Каркас множества описывает геометрическое поведение множества в целом, поэтому для описания $\{P_k^\delta\}_{k=1}^m$ воспользуемся их представлением через каркасы. Заметим, что получение каркаса множества с использованием решение задачи (3) трудоемко и, вообще говоря, не требуется для корректного описания множества. Поэтому рассмотрим далее способ построения множества, близкого к каркасу, конструирование которого существенно проще.

Граничной точкой множества будем называть точку, с которой соседствует, хотя бы одна точка, не принадлежащая этому множеству. Контуром будем называть такую замкнутую последовательность граничных точек, у которой ν и $(\nu+1)$ -я точка связны, но каждая точка граничит не более чем с двумя граничными точками.

Под однопиксельной линией будем понимать связное множество, каждая точка (пиксел) которого соседствует не более чем с тремя точками множества (рис. 3б). Под строго однопиксельной линией будем понимать такую однопиксельную линию, у которой удаление любой точки, кроме концевой, приводит к потере связности (рис. 3а).

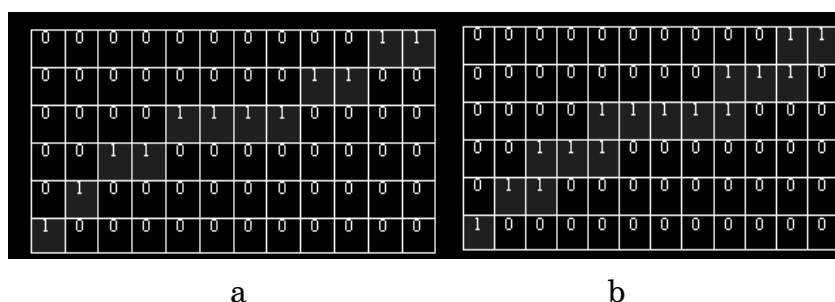


Рисунок 3 – а) строго однопиксельная линия; б) однопиксельная линия

Операцией депиляции над множеством A для заданной окрестности $D_{i,j}^N$ будем называть присоединение к множеству всех точек окрестности $D_{i,j}^N$, построенной вокруг каждой точки (i, j) множества A .

$$D(A) = A \cup \{(v, \mu) \mid (v, \mu) \in D_{i,j}^N, \forall (i, j) \in A\}.$$

Операцией эпиляции $E(A)$ над множеством A будем называть удаление из множества A всех граничных точек, которые не нарушают связность A .

Применение операции депиляции позволяет соединить несколько множеств в одно связное. Таким образом, последовательное применение эпиляции и депиляции улучшает структуру множеств, что есть подготовкой множества к построению каркасов.

Каркас множества будем искать в виде строго однопиксельной линии, путем последовательного изъятия из этого множества точек, не нарушая связность множества в целом.

Приведем алгоритм построение каркаса для множества точек A .

Шаг 1. Построение маски множества. Поставим в соответствие множеству точек A матрицу $\{a_{i,j}\}_{i=1,j=1}^{W^A,H^A}$, где

$$a_{i,j} = \begin{cases} 1, (i, j) \in A; \\ 0, (i, j) \notin A. \end{cases}$$

Шаг 2. Нахождение контура множества. Задаем правило обхода граничных точек. Для построения контура будем обходить каждую граничную точку в положительном направлении и при этом каждый элемент контура p_k будем характеризовать парой точек $V(p_k)$ и $U(p_k)$, где $V(p_k)$ координаты k -ой точки контура, а $U(p_k)$ - координаты точки, из которой при заданном обходе была добавлена k -я точка, то есть $U(p_k) = V(p_{k-1})$.

Построение контура начинается с произвольной граничной точки множества A . Продвигаясь по направлению контура, присоединяем очередной элемент. Матрица $\{a_{i,j}\}_{i=1,j=1}^{W^A,H^A}$ отображает влияние каждой точки на формирование контура. Добавляя k -й элемент в контур, увеличиваем на единицу значимость точки в матрице $\{a_{i,j}\}_{i=1,j=1}^{W^A,H^A}$ с координатами $(V(p_k)_x, V(p_k)_y)$. По определению контур является замкнутым, поэтому процесс должен завершиться, когда в контур будет добавлен элемент, совпадающий с первым, то есть $V(p_k) = V(p_1)$. Но для корректной обработки ситуации петель этого сравнения не достаточно, поэтому необходимо сравнивать все характеристики элемента, то есть и $U(p_k)$. Ввиду того, что первый элемент не

обладает информацией о $U(p_1)$. Будем считать, что контур построен, если выполнено следующие условия

$$\begin{aligned} V(p_k) &= V(p_2); \\ U(p_k) &= U(p_2). \end{aligned}$$

Последние два добавленных элемента необходимы для алгоритмизации остановки формирования контура, то есть не должны влиять на формирование матрицы $\{a_{i,j}\}_{i=1,j=1}^{W^A,H^A}$.

Шаг 3. Изымание контура множества из изображения. После построения контура анализируем влияние каждой граничной точки при формировании контура. Заметим, что одна и та же граничная точка может присутствовать в нескольких элементах контура, в этом случае она существенна для связности множества A и не может быть удалена.

Для того чтобы эффективно анализировать вхождения каждой граничной точки в элементы контура, не используя дополнительный поиск, была введена матрица $\{a_{i,j}\}_{i=1,j=1}^{W^A,H^A}$. Исходя из ее значений, легко проанализировать влияние граничных точек на формирование контура. Элементы $a_{i,j}$ могут принимать значения:

1 – если точка не входит в контур;

>2 – если точка входит в контур не один раз, а, значит, ее удаление; приведет к нарушению связности множества A .

2 – если точка, требует дополнительного анализа на удаление.

Удаление точки (i, j) сопровождается установкой значения элемента матрицы $a_{i,j} = 0$. Точки, соответствующие значениям 2 и имеющие среди соседей точки, которым соответствуют 1 – удаляются. При этом, возможен распад множества A на несвязанные подмножества. Подмножества, которые состоят из значений ≥ 2 , приводятся к строго однопиксельной линии. Заметим, что для строго однопиксельной линии легко находятся концы - это точки, которые имеют только одного соседа, принадлежащего линии. Очевидно, что разрыв связности может происходить в окрестности концов строго однопиксельных подмножеств. Для того чтобы избежать разрыва линии, каждый конец полученных фрагментов помещается в окрестность 5×5 . Если в этой окрестности лежит хотя бы одна точка, равная 1, то возвращаем в этой окрестности ту точку, которая восстановит связность. Одновременно восстанавливаем точки,

которые имели в своих соседях более трех удаленных точек со значением 2.

Контур удаляется до тех пор, пока множество A не будет представлять собой строго однопиксельную линию. Рис. 4 иллюстрирует данный алгоритм.

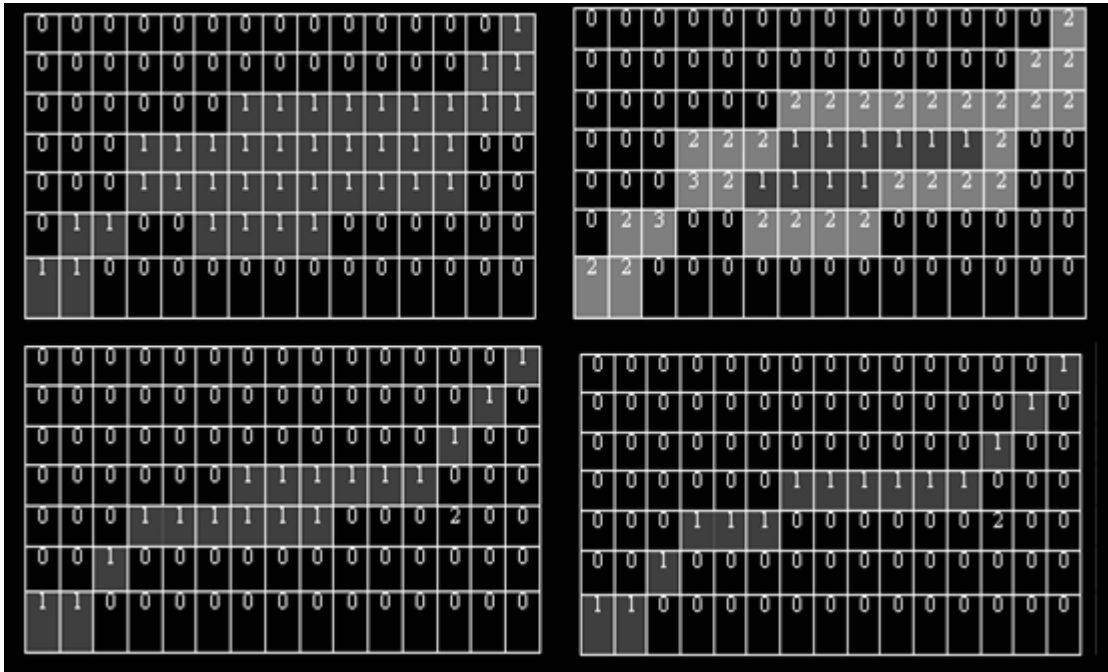


Рисунок 4 – Пример поэтапного удаления контура из множества

Итогом данного этапа является построение каркаса множества (рис. 5).



Рисунок 5 – а) фрагмент нечетко выраженных линий; б) этот же фрагмент после обработки

Выводы

Представленные подходы позволяют выделить линии, которые неявно выражены на окружающем фоне, и улучшить их представление для дальнейшего описания. Заметим, что алгоритм построения каркаса множеств может быть использован, например, в задачах обработки результатов аэрокосмических съемок, распознавания текста (в том числе и рукописного), анализа структуры дендритов и т.д.

ЛИТЕРАТУРА

1. Введение в контурный анализ; приложения к обработке изображений и сигналов/ Я.А.Фурман, А.В.Кревецкий, А.К.Передреев, А.А.Роженцов, Р.Г.Хавизов, И.Л.Егошина, А.Н.Леухин. Под ред. Я.А.Фурмана. – 2-е изд., испр. – М.: Физматлит, 2003. – 592 С.
2. Когут П.І., Сердюк М.Є. Алгоритмічний підхід до задач каркасної інтерполяції статичних зображень. // Математичне моделювання, 2 (16), 2007. – С. 21-25.
3. Лигун А.О., Шумейко О.О., Тимошенко Д.В. ALLDocument – технологія нового покоління для збереження, передачі та відображення електронних документів. – Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, №9 (103), Частина 1, 2006, С. 83-85.
4. Specification of DJVu Image Compression Format. AT&T, 1999, 39 P.
5. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений . – М.: Техносфера, 2005. – 1070 С.
6. Лигун А.А., Шумейко А.А. Асимптотические методы восстановления кривых. – К.: Институт математики НАН Украины, 1997. – 358 С.

Получено 19.04.2007 г.