

## СТРУКТУРНАЯ МОДЕЛЬ ПОЛУТОНОВОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ И ЕЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В ЗАДАЧЕ СЕГМЕНТАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Владимир Калмыков, Виталий Вишневский, Татьяна Власова

**Аннотация** Предложена структурная модель полутонового изображения. Структурная модель предполагает инвариантное относительно аффинных преобразований описание выделенных в изображении объектов. Форма объекта полностью определяет его описание и представлена его граничным контуром и функцией оптической плотности, которая определена в пределах этого контура. Предложено определение контура полутонового изображения как последовательности, состоящей из отрезков прямых и дуг кривых, причем эти отрезки прямых и дуги кривых являются особыми линиями поверхности, которая соответствует полутоновому изображению. Рассматривается пример использования структурной модели в процессе обработки полутоновых изображений медицинских препаратов, полученных по методу Кирлиан.

**Ключевые слова:** структурный анализ, полутоновое изображение, контур, строковая модель, Кирлиан, сегментация

**ACM Classification Keywords:** I.5.1 Models, I.3.5 Computational Geometry and Object Modeling.

**Conference:** The paper is selected from XIV<sup>th</sup> International Conference "Knowledge-Dialogue-Solution" KDS 2008, Varna, Bulgaria, June-July 2008

---

### Введение

---

Обработка визуальной информации, в частности полутоновых изображений, относится к наиболее сложным задачам искусственного интеллекта и, в то же время, все более актуальным для практического использования в самых различных отраслях науки и технологий. В настоящее время в средствах искусственного интеллекта полутоновые изображения представлены в растровом виде. Такое представление исключает возможность обработки – преобразования, идентификации объектов, отличающихся аффинными преобразованиями – масштабом, положением в поле изображения, поворотом. В современных средствах обработки визуальной информации практически не используются такие понятия как *контур* объектов полутоновых изображений (за исключением контуров объектов предварительно бинаризованных полутоновых изображений).

В то же время одной из важнейших и наиболее естественных особенностей зрительного восприятия человека является его способность к сегментации поля зрения на объекты, которые отличаются от фона оптической плотностью, цветом, текстурой, др. Основной характеристикой любого объекта является его форма, которая определена контуром – границей между объектом и фоном. Контур, в свою очередь, воспринимается человеком как последовательность отрезков прямых и дуг кривых линий. Форма полутоновых и цветных объектов определяется, кроме того, функцией оптической плотности с учетом цвета, текстуры внутри контура каждого из объектов. Эти особенности зрительного восприятия человека отражены в предлагаемой структурной модели полутонового изображения.

Структурная модель дает возможность однообразного по форме представления произвольных изображений. Задача приведения к структурной модели произвольных изображений, заданных в растровом виде, искаженных помехами в общем случае еще не решена. Однако в отдельных, достаточно многочисленных случаях приведение изображений к структурной модели позволяет существенно повысить скорость и качество обработки визуальной информации, что, в свою очередь, обеспечивает качественное функционирование использующих эти средства информационных технологий. Объекты полутонового изображения, представленные в структурном виде, инвариантны относительно аффинных

преобразований, наилучшим образом подходят в качестве исходных данных для обработки средствами растущих пирамидальных сетей [Гладун,1] и теории распознавания и памяти [Рабинович,2]

Отметим также, что такой структурный анализ формы визуальных объектов, искаженных помехами, хорошо согласовывается с известным стандартом MPEG-7, и может быть к нему адаптирован.

В настоящей работе рассматривается структурная модель полутонового изображения и пример ее использования при разработке информационных технологий для медицинских диагностических систем, в частности, для структурного анализа полутоновых изображений с целью автоматического выделения объектов на примере изображений медицинских препаратов, полученных по методу Кирлиан.

### Структурный анализ полутонового изображения

Основой структурного анализа полутонового изображения является модель, которая определяет его структурные элементы. В соответствии с известными представлениями о механизмах зрительного восприятия такими структурными элементами изображения, в частности, есть объекты, расположенные на фоне, который определяется двумерной функцией оптической плотности. Объекты, в свою очередь, определяются контурами, которые их ограничивают, и двумерной функцией оптической плотности в пределах объекта. Контурные являются замкнутыми последовательностями, которые образованы отрезками прямых и дугами кривых линий.

Под изображением понимают часть плоскости, ограниченную некоторой геометрической фигурой, обычно прямоугольником, каждая точка которой характеризуется определенным значением оптической плотности. Другими словами, на части плоскости, ограниченной прямоугольником с размерами  $X, Y$  определена  $\rho = f(x, y)$ , ( $0 \leq x \leq X; 0 \leq y \leq Y$ ). Этой функции можно поставить в соответствие некоторую поверхность  $z = f(x, y)$  в пространстве  $Oxyz$ .

Предварительно приведем необходимые сведения из области аналитической геометрии в пространстве [Корн, Корн, 3].

Множество точек  $P(x, y, z)$ , координаты которых удовлетворяют системе уравнений

$$x=x(u, v), y=y(u, v), z=z(u, v) \quad (1)$$

при подходящих значениях действительных параметров  $u, v$ , называется **непрерывной поверхностью**, если правые части уравнений являются непрерывными функциями параметров. Поверхность может быть также определена уравнением

$$F(x, y, z) = 0 \text{ или } z = f(x, y).$$

Поверхность может иметь более чем одну полость.

Простой поверхностью называется **непрерывная поверхность**, состоящая из одной полости и не имеющая самопересечений (кратных точек). При этом подразумевается, что простые поверхности являются двусторонними (односторонние поверхности, такие как лист Мебиуса, исключаются).

Точка поверхности (1) называется **регулярной точкой**, если при некотором параметрическом задании поверхности функции (1) имеют в достаточной близости к рассматриваемой точке непрерывные частные производные первого порядка и, по меньшей мере, один из определителей

$$\begin{vmatrix} \frac{\partial x}{\partial u} & \frac{\partial y}{\partial u} \\ \frac{\partial x}{\partial v} & \frac{\partial y}{\partial v} \end{vmatrix}, \begin{vmatrix} \frac{\partial y}{\partial u} & \frac{\partial z}{\partial u} \\ \frac{\partial y}{\partial v} & \frac{\partial z}{\partial v} \end{vmatrix}, \begin{vmatrix} \frac{\partial z}{\partial u} & \frac{\partial x}{\partial u} \\ \frac{\partial z}{\partial v} & \frac{\partial x}{\partial v} \end{vmatrix}$$

отличен от нуля. Простой кусок поверхности, ограниченный замкнутой кривой, называется **регулярным**, если все его внутренние точки регулярные. **Регулярной поверхностью** называется двусторонняя

простая (замкнутая или незамкнутая) поверхность, составленная из конечного числа регулярных кусков с общими регулярными дугами и точками.

Таким образом, каждому полутоновому изображению можно поставить в соответствие регулярную незамкнутую поверхность в пространстве Охур которая состоит из простых кусков поверхности.

Для поверхности, которая соответствует полутоновому изображению, справедливо следующее ограничение. Каждому значению пары координат  $(x,y)$  соответствует одно и только одно значение функции  $\rho(x,y)$ , то есть перпендикуляр к плоскости изображения в любой точке  $x,y$  пересекает воображаемую поверхность один и только один раз.

Контур каждого куска регулярной поверхности является замкнутой последовательностью регулярных дуг кривых и отрезков прямых. Точки контура не являются регулярными точками кусков простых поверхностей. Точки контура – это граничные точки кусков простых поверхностей. Точки контура образуют особые линии поверхности, которые являются граничными, разделяющими разные куски простых поверхностей. В отличие от бинарных изображений, точки которых могут иметь только два значения оптической плотности – черный или белый, области полутоновых изображений, ограниченные контуром, могут иметь различные законы изменения оптической плотности. Соответственно, количество отличающихся друг от друга соседних кусков простых поверхностей, как правило, больше двух. Значит, контуры полутонового изображения могут и не быть, в общем случае, односвязными последовательностями регулярных дуг кривых и отрезков прямых, а состоят из **ветвей**, соединяющих **узлы**. Ветви являются особыми линиями изображения. Точки контура, за исключением узлов, являются регулярными точками ветвей. Узлы являются особыми точками контура и изображения. Ветви и узлы вместе с законом изменения оптической плотности каждого куска простой поверхности полностью определяют регулярную поверхность и соответствующую ей область изображения. Во многих практических случаях, однако, когда на фоне расположены простые, не соприкасающиеся друг с другом объекты, контуры полутонового изображения являются односвязными последовательностями регулярных дуг кривых и отрезков прямых, что существенно упрощает задачу структурного анализа.

В полутоновом изображении всегда можно выделить области, для которых значение оптической плотности постоянно, либо меняется по определенному закону. Закон изменения оптической плотности определяется  $\text{grad } \rho$  – градиентом оптической плотности. Обычно в пределах одной области  $\rho = \text{const}$ , либо  $\partial\rho/\partial x + \partial\rho/\partial y = \text{const}$ , либо  $\partial^2\rho/\partial x^2 + \partial^2\rho/\partial y^2 = \text{const}$ . В то же время возможны и другие законы изменения оптической плотности.

В соответствии с приведенными определениями полутоновое изображение можно рассматривать как некоторую область регулярной поверхности, состоящую из регулярных кусков простых поверхностей, причем каждый объект изображения соответствует одному или нескольким кускам простых поверхностей.

---

### Цифровая строковая модель произвольного полутонового изображения

---

С поверхностью в пространстве Охур, которой соответствует полутоновое изображение, совмещена решетка  $N \times M \times P$ , и для каждого пиксела изображения определено среднее в пределах его площади значение оптической плотности  $\rho(n,m)$ , принимающее целочисленные значения  $\rho(n,m) = (0,P)$ ;  $n = (0,N)$ ;  $m = (0,M)$ . Сторона решетки с  $N$  клетками расположена вдоль оси Ох, сторона решетки с  $M$  клетками расположена вдоль оси Оу, сторона решетки с  $P$  клетками расположена вдоль оси Оρ. Пусть  $(y\rho)$ ;  $n = (0,N)$  – множество параллельных плоскостей, перпендикулярных оси Ох в трехмерном пространстве Охур. Точно так же  $(x\rho)$ ;  $m = (0,M)$  – множество параллельных плоскостей, перпендикулярных оси Оу. Пересечение поверхности изображения с этими плоскостями образует на каждой из плоскостей  $y\rho$  линию контура  $\rho_n(x)$ , а на каждой из плоскостей  $x\rho$  линию контура  $\rho_m(y)$ , или  $\rho_n(m)$  и  $\rho_m(n)$  для случая дискретизованного изображения.

Выделение регулярных и особых точек регулярных поверхностей может быть выполнено процессе структурного анализа функций  $\rho_n(m)$  и  $\rho_m(n)$  дискретизованного полутонового изображения, что дает возможность представить их как последовательности отрезков цифровых прямых и дуг цифровых кривых в плоскостях  $\rho_{0n}$  при всевозможных значениях  $m = (0, M)$  и  $\rho_{0m}$  при всевозможных значениях  $n = (0, M)$  соответственно. Граничные точки отрезков и дуг являются особыми точками линий пересечения, в то время как иные точки являются регулярными точками линий пересечения. Каждая точка  $t$  дискретизованного изображения принадлежит одновременно двум взаимно перпендикулярным плоскостям  $u_n \rho$  и  $x_m \rho$  и двум пересекающимся линиям контура  $\rho_{nt}(m)$  и  $\rho_{mt}(n)$  соответственно.

Из определения регулярной поверхности следует, что точка поверхности является регулярной, если она является регулярной точкой горизонтальной и вертикальной линий пересечения.

Если же точка поверхности является особой точкой хотя бы одной из линий – горизонтальной и/или вертикальной линий пересечения, то такая точка является особой – граничной точкой регулярной поверхности – области полутонового изображения.

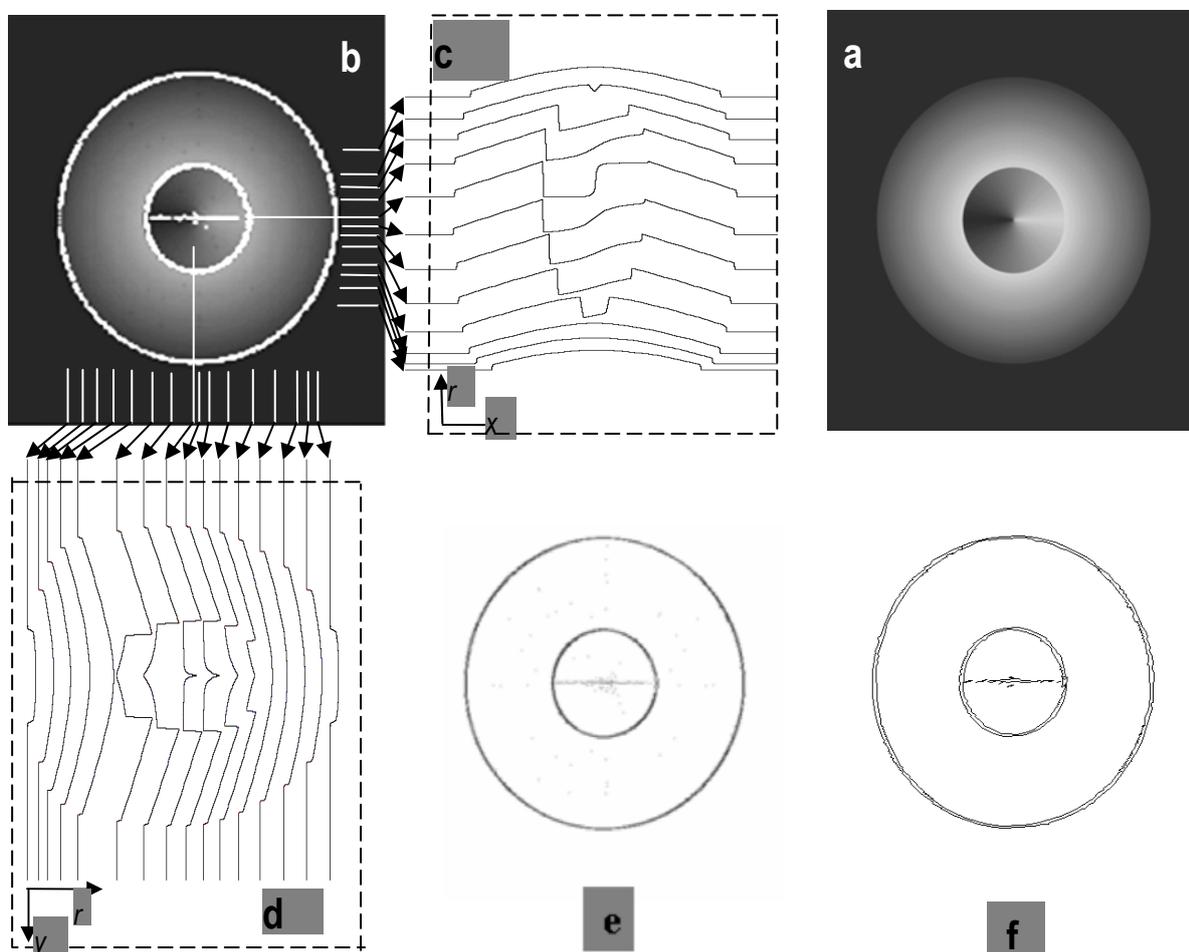


Рис.1. Выделение контуров на полутоновом изображении, выполнено программами, реализующими строковую модель изображения и обработку контуров: а – модельное полутоновое изображение; б – то же самое изображение с выделенными особыми точками; с – кривые оптической плотности –  $r$  – горизонтальных строк; д – кривые оптической плотности –  $r$  – вертикальных строк; е – изображения контуров, образованные отдельными особыми точками; ф – связанные изображения контуров.

Граничные точки областей полутонового изображения (его регулярной поверхности) образуют линии контуров в плоскости  $xOy$ . Линии контуров, в свою очередь, содержат регулярные и особые точки.

Структурный анализ полутонового изображения, в частности, должен содержать следующие операции.

1. Выделение особых точек регулярных поверхностей (областей изображения).
2. Построение особых линий изображения (контуров), которые ограничивают объекты, по особым точкам регулярных поверхностей.
3. Выделение структурных элементов контуров - отрезков прямых и дуг кривых линий.

На рис. 1 представлен пример структурного анализа с использованием строковой модели, а именно выделение контуров на полутоновом изображении. Программы выполняют над изображением (рис. 1а) следующие операции. Для каждой вертикальной и горизонтальной строк изображения строятся графики функций оптической плотности, примеры которых изображены на рис. 1с,d. Для каждого графика определяется последовательность элементов, из которых он состоит, - отрезков цифровых прямых и дуг цифровых кривых. Граничные точки между элементами графика являются особыми точками графика данной строки и всего полутонового изображения. Особые точки изображения выделены на рис. 1b белым цветом. Особые точки принадлежат линиям контура полутонового изображения. По особым точкам построены контуры полутонового изображения. На рис. 1е представлены контуры в растровом виде, образованные отдельными особыми точками. Им соответствуют контуры в векторном виде - рис. 1f.

### Эксперименты по обработке изображений, полученных по методу Кирлиан

Рассмотрим использование структурной строковой модели цифрового изображения на примере обработки изображений медицинских препаратов, полученных по методу Кирлиан.

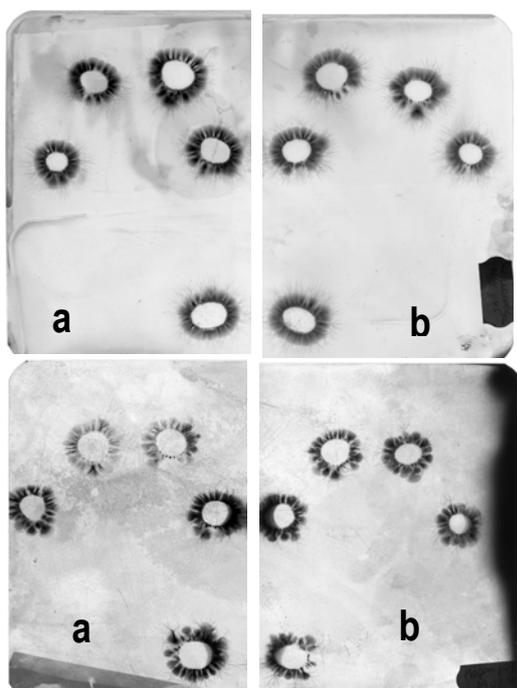


Рис. 2. Примеры изображений Кирлиан: свечения пальцев а)левых, б)правых рук

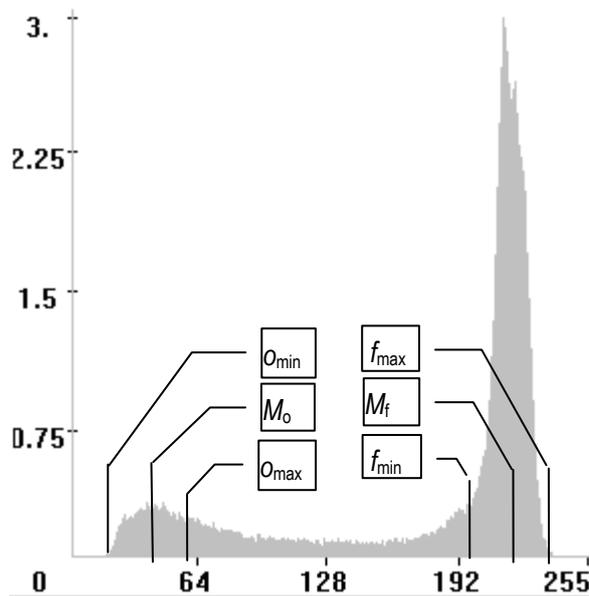


Рис. 3. Гистограмма яркости (оптической плотности) изображения. По оси абсцисс определены значения яркости. По оси ординат – условные значения, пропорциональные количеству пикселей, соответствующих данному значению яркости.

$M_o, M_f$  – средние значения яркости объектов и фона;  $O_{min}, O_{max}, f_{min}, f_{max}$  – минимальные и максимальные значения яркости объектов и фона.

Изображения медицинских препаратов вообще содержат объекты, форма которых очень изменчива, но, в то же время, именно в форме содержится диагностическая информация, достаточно уверенно определяемая специалистами при визуальной оценке. Как правило, такие изображения искажены помехами. Изображения медицинских препаратов используются в процессе принятия решений в медицинских диагностических системах. Изображения, которые получены в процессе функционирования таких систем, далеко не всегда могут быть достаточно высокого качества, что значительно снижает возможность их быстрого и полного восприятия экспертами при минимальных расходах времени. В то же время именно в процессе анализа больших количеств таких изображений могут быть полученные новые знания о состоянии здоровья групп населения. Время обработки и принятия решения, так же как и количество экспертов в медицинских диагностических системах, как правило, ограничено. Без автоматизации обработка таких объемов визуальной информации перестает быть эффективной: снижаются качества обработки, растет количество ошибок.

Изображения, полученные по методу Кирлиан (далее изображение Кирлиан), являются снимками, выполненными на специальной фотопленке, размером А4, на которых зафиксированы свечения от каждого из десяти пальцев (рис. 2).

Для изображений характерны нестабильность и неравномерность фона, значительное количество помех, которые по уровню яркости и величине сравнении с объектами, неустойчивость формы и уровня яркости самих объектов.

Хотя по содержанию обработки в настоящее время эти изображения могли бы считаться бинарными, однако, даже задача бинаризации таких изображений не может считаться тривиальной, не говоря уже о задачах последующей обработки, в частности, задачи выделения и идентификации объектов с целью диагностики. Имеется стандартное программное обеспечение для обработки изображений Кирлиан, полученных на специальных приборах отдельно для каждого пальца [Коротков,4]. Однако использование таких приборов усложняет диагностику, поскольку состояние организма исследуемого за время последовательной фиксации свечений каждого из десяти пальцев может существенно измениться.

Чтобы использовать стандартное программное обеспечение для изображений Кирлиан, на которых одновременно зафиксированы все пальцы рук (рис. 2), необходимо предварительно сегментировать такие изображения и повернуть изображение каждого пальца таким образом, чтобы оно отвечало его вертикальному расположению.

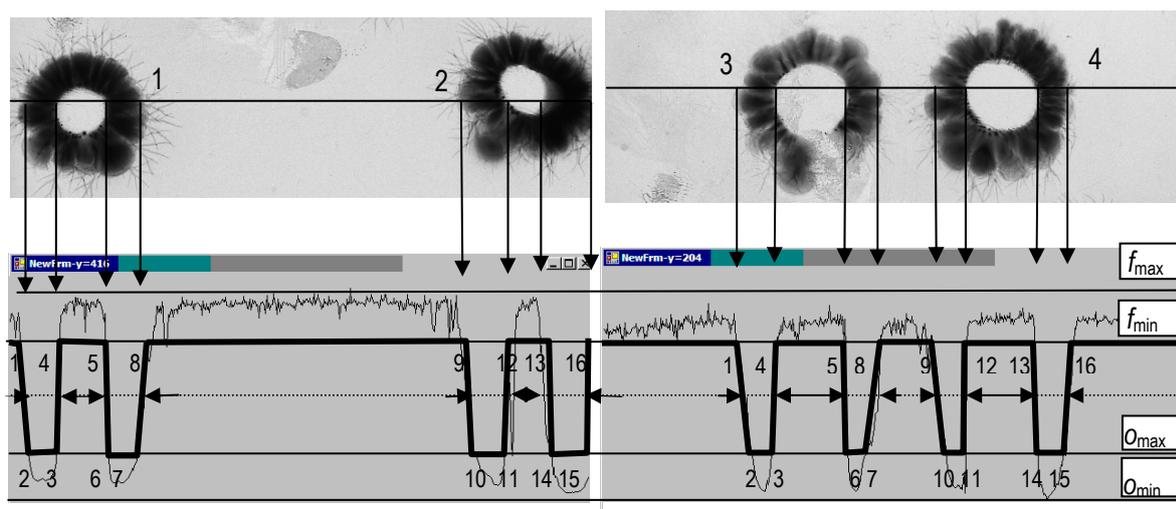


Рис.4. Выделение особых точек в местах пересечения объектов горизонтальными строками.

Предлагаемое программное обеспечение предназначено для автоматической сегментации изображений Кирлиан от пяти пальцев на изображения от каждого пальца отдельно. Работа программы заключается в выполнении следующих операций.

- Вычисляют гистограмму оптической плотности исследуемого изображения Кирлиан (рис.3). По гистограмме, после ее сглаживания, определяют минимальное значение яркости объектов  $O_{min}$ , как минимальное значение яркости пикселей изображения, максимальное значение яркости фона  $f_{max}$ , как максимальное значение яркости пикселей изображения. Определяют также среднее значение яркости объектов  $M_o$ , как первый максимум при росте значений яркости, начиная с нуля, и фона  $M_f$ , как первый максимум при убывании значений яркости, начиная с максимального (255).
- На основании предположения о симметричности распределения случайных величин яркости пикселей фона и объектов вычисляют минимальное значение яркости пикселей фона как  $f_{min} = M_f - (f_{max} - M_f)$  и максимальное значение яркости пикселей объектов как  $O_{max} = M_o + (M_f - O_{min})$ .
- Вычисляют функции яркости (оптической плотности) горизонтальной строки  $r(m,n)$   $m = 1, M$  для всех горизонтальных строк изображения  $n = 1, N$  (рис.4).
- Определяют функцию на изображении

$$v_b(m,n) = \begin{cases} f_{min}, & \text{при } r(m,n) \geq f_{min}; \\ O_{max}, & \text{при } r(m,n) \leq O_{max}. \end{cases}$$

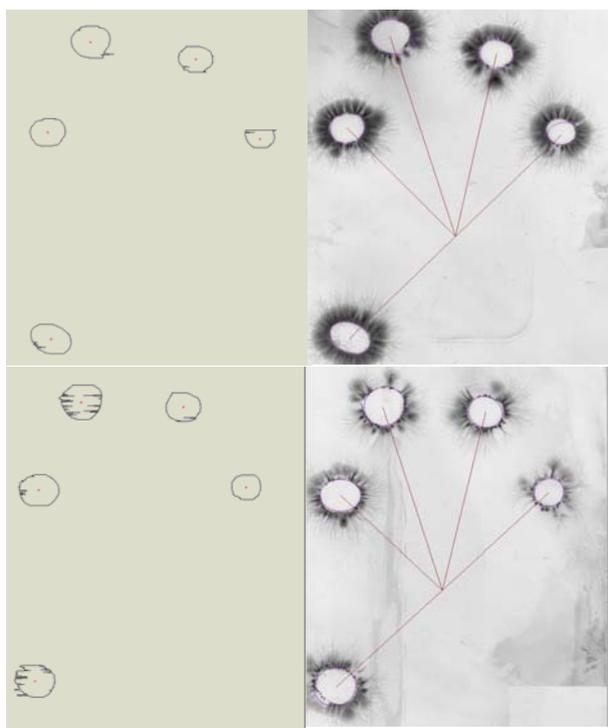


Рис.5. Внутренние контуры объектов (слева).  
Аппроксимация контуров эллипсами (справа).

Эта функция не является результатом бинаризации, поскольку не рассмотрены значения функции яркости  $O_{max} < r(m,n) < f_{min}$ . Пиксели с такими значениями функции яркости являются промежуточными между пикселями фона и объекта и не имеют существенного значения для выделения объектов на изображении, по крайней мере, для решения задач по обработке изображений Кирлиан.

Данное преобразование изображения, с учетом динамического диапазона изображения, является нелинейным изменением количества уровней квантования с 256 до 3 и позволяет в значительной мере исключить влияние помех. Примеры функции  $v_b(m,n)$  изображены на рис.4 ломаной линией. Числами 1,4,5,8,9,12,13,16, определены особые точки изображения, которые принадлежат фону. Числами 2,3,6,7,10,11,14,15 определены особые точки изображения, которые принадлежат объектам.

Строят внутренний и, при необходимости, внешний контуры объектов, по выделенным особым точкам рис.5. Если контуры определены, то объекты выделены успешно.

Определяют положение объектов свечения пальцев относительно центра ладони. Аппроксимируют внутренние контуры эллипсами, определяют угол поворота каждого пальца, вращают изображение свечения пальца до соответствия вертикальному положению пальца (рис.5) и формируют результирующие файлы изображений.

---

### Заключение

---

1. Предложенная структурная модель позволяет строить описания объектов полутонового изображения инвариантные к аффинным преобразованиям.
  2. Проведенные эксперименты подтвердили большую сложность задач обработки полутоновых изображений и, в то же время, показали возможность и эффективность обработки полутоновых изображений с использованием структурной модели полутоновых изображений.
  3. На основе проведенных экспериментов может быть разработана информационная технология, которая может быть использована при создании медицинской диагностической системы.
- 

### Литература

---

- [1] Гладун В.П. Планирование решений. – Киев: Наукова думка, 1987. – 167с.
- [2] Рабинович З.Л. О естественных механизмах мышления и интеллектуальных ЭВМ // Кибернетика и системный анализ. – 2003. -№5 С.82-88
- [3] Корн Г. и Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. - Москва: Наука, 1974.
- [4] Коротков К.Г. Основы ГРВ биоэлектрографии. - СПб., 2001. - 134 с.
- 

### Информация об авторах

---

**Владимир Калмыков** - старший научный сотрудник, кандидат технических наук, Институт проблем математических машин и систем, просп. акад. Глушкова 42, 03680, Киев 187, Украина; e-mail: [kvq@immsp.kiev.ua](mailto:kvq@immsp.kiev.ua)

**Виталий Вишнееский** - заведующий отделением, старший научный сотрудник, кандидат технических наук, Институт проблем математических машин и систем, просп. акад. Глушкова 42, 03680, Киев 187, Украина; e-mail: [vit@immsp.kiev.ua](mailto:vit@immsp.kiev.ua)

**Татьяна Власова** – научный сотрудник, Институт проблем математических машин и систем, просп. акад. Глушкова 42, 03680, Киев 187, Украина; e-mail: [chery@immsp.kiev.ua](mailto:chery@immsp.kiev.ua)