

# Система распознавания изображений на основе методов стохастической геометрии

Николай Федотов, Михаил Мельников, Роман Костюшин  
Пензенский государственный университет  
Пенза, Россия

## Аннотация

Объектом исследований является теория и принципы построения технических устройств и систем распознавания изображений, инвариантных относительно их аффинных преобразований.

Цель работы – построение теории формирования признаков, инвариантных к преобразованиям подобия и аффинным преобразованиям изображений, а также признаков для выявления параметров (сдвиг, сжатие, растяжение, поворот) таких преобразований изображений, а также разработка алгоритмов программ для персонального компьютера IBM PC, реализующих методы компьютерной генерации таких признаков.

В качестве методов исследования использовались методы интегральной геометрии и функционального анализа, методы цифровой обработки изображений.

В результате проведенных исследований разработана теория признаков, не зависящих от линейных конформных и аффинных преобразований распознаваемых бинарных и полутоновых изображений, предложен ряд базовых функционалов для их формирования, разработаны алгоритмы автоматической генерации подобных признаков, предложена архитектура системы распознавания на персональном компьютере IBM PC, использующая для распознавания такие признаки.

Разработанная теория инвариантных и чувствительных к аффинным преобразованиям изображений признаков, методы их компьютерной генерации и система распознавания изображений, использующая их, применима как для многоцелевых функциональных исследовательских работ в области распознавания изображений, так и для проектирования программно-аппаратного обеспечения устройств распознавания изображений, предназначенных для работы в узко специализированных предметных областях, например, для решения конкретных задач из области технической или медицинской диагностики.

**Ключевые слова:** изображение, распознавание, признак, функционал, сканирование, интегральная геометрия, стохастическая геометрия, тройной признак, компьютер, система, устройство.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Задача распознавания изображений независимо от их аффинных преобразований исторически была сформулирована на самой начальной стадии работ по созданию систем машинного (технического) зрения. Она отличается чрезвычайной сложностью решения, особенно в случае одновременного действия на изображение всех трех компонент аффинного преобразования (сдвиг, поворот, растяжение или сжатие). Известные методы выделения признаков изображений, инвариантных к их аффинным преобразованиям, например, метод моментов или метод дескрипторов Фурье обладают рядом существенных недостатков. Так метод моментов использует функцию точки изображения, как правило, яркостную и не позволяет аккумулировать в генерируемые инварианты моментов информацию об особенностях изображения в локальной окрестности этой точки. Метод дескрипторов Фурье может быть использован только для генерации дескрипторов контура изображения.

Новизна работы заключается в создании принципиально новой теории выделения из изображений признаков, не зависящих от их аффинных преобразований. Разработанная теория не только обобщает метод моментов (инвариантов моментов) и метод дескрипторов Фурье, но и дает возможность выделения большого числа новых признаков, инвариантных к аффинным преобразованиям распознаваемых изображений. В частности, становится возможным выделение признаков, использующих информацию об особенностях изображения в локальной окрестности точек изображения, что невозможно в существующих методах. Методы этой теории позволяют синтезировать не только инвариантные, но и чувствительные признаки изображений, зависящие от их аффинных параметров, что важно при решении целого ряда прикладных задач распознавания, в которых требуется определить положение объекта по его изображению.

Целью работы является разработка признаков, инвариантных и чувствительных к линейным конформным и аффинным преобразованиям бинарных и полутоновых изображений, разработка алгоритмов их компьютерной генерации и архитектуры компьютерной системы, реализующей их.

В качестве методов решения сформулированных задач используются методы интегральной геометрии и функционального анализа, а также методы цифровой обработки изображений.

## 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Методы описания изображений с помощью системы признаков исключительно важны для теории распознавания образов. Традиционно формирование признаков происходит на основе интуиции или абстрактных математических теорий, таких как топология или теория вероятностей. При этом конструируемые признаки распознавания сразу же имеют понятный смысл – например, связность, дисперсия и т. п. Предлагаемый подход с позиции стохастической геометрии отличается тем, что ищутся признаки без известного заранее смысла, принимается во внимание только их полезность для решения задачи классификации.

Данные признаки могут быть вычислены в распараллеленном процессе. Причем большая часть вычислений комбинируется со сканированием, а в результате длительность процесса обработки изображений не многим более времени сканирования.

### 2.1 Трейс-преобразование

Рассмотрим сканирование изображения линиями по всевозможным направлениям. Обозначим через  $M$  множество всех линий. В процессе сканирования могут быть определены некоторые характеристики пересечений изображений со сканирующими линиями. Если в качестве такой характеристики выбрать значение яркости, то в этом случае получим преобразование Радона, а его результатом будет трансформанта. В общем же случае мы будем получать иные трансформанты, которые будем называть трейс-трансформантами. Трейс-трансформанта есть функция, определенная на множестве  $M$ , она может быть векторно-значимая. Операция, которая определяет получение трейс-трансформанты изображения объекта называется трейс-преобразованием.

#### 2.1.1 Некоторые свойства трейс-преобразования

Обозначим  $M$  множество линий на плоскости. Каждая линия имеет две ориентации, соответствующие двум направлениям сканирования. Каждая линия описывается уравнением

$$x \cos \Theta + y \sin \Theta = p, \quad (1)$$

где  $\Theta$ ,  $p$  – нормальные координаты, а  $x$  и  $y$  декартовы координаты на плоскости.

Множество  $M$  всех ориентированных линий на плоскости есть цилиндр. Возможен еще вариант: мы можем рассматривать все линии как неориентированные, т.е.  $p$  из (1) неотрицательно и  $M$  в этом случае есть лист Мебиуса.

Пусть  $F$  функция, описывающая образ. Она может быть и векторной функцией. Пусть  $g(F, l)$  функционал двух переменных  $F$  и  $l$ . Таким образом, изображение  $F$  производит функцию  $g(F, \bullet)$ , определенную на множестве  $M$ . Функция  $g(F, \bullet)$  также может рассматриваться, как изображение на множестве  $M$ . Мы назовем это соответствие между  $F$  и  $g(F, \bullet)$  трейс-преобразованием. Вращение изображения  $F$  приводит к перемещению образа  $g(F, \bullet)$ , если  $g$  – натуральное число. Анализируя каким путем трансформанта  $g(F, \bullet)$  реагирует на движение первоначального образа,  $F$  мы приходим к идее тройных признаков.

#### 2.1.2 Тройные признаки

Рассмотрим функцию трех независимых переменных

$$L(\Theta, p, t) = (p \cos \Theta - t \sin \Theta, p \sin \Theta + t \cos \Theta).$$

Пусть  $T$  (или  $P$  или  $\Theta$ ) определены на множестве функций чьи независимые переменные обозначены для простоты через  $t$  (или  $p$  или  $\Theta$ ). Образ записывается функцией  $F$ . Мы формируем тройной признак распознавания  $F$  в виде

$$Y(F) = \Theta (P(T(F(L(\Theta, t, p))))). \quad (2)$$

Доказана теорема I. Если  $T$ ,  $P$ ,  $\Theta$  инвариантны, тогда  $Y(F)$  независима от всех движений образа. Мы можем изобрести десять вариантов реализации для  $T$ , десять для  $P$  и десять для  $\Theta$ . Тогда может быть получена тысяча признаков, определяемых по формуле (2). В процессе экспериментов на компьютере эти признаки могут получить содержательную интерпретацию [1,2,3].

#### 2.1.3 Инвариантные и чувствительные функционалы

Мы называем функционал  $\Xi$  инвариантным (см. выше), если

$$(i1) \quad \Xi(\xi \circ (x + b)) = \Xi \xi \text{ for all } b \in R.$$

Он может иметь дополнительные свойства:

(i2) Существует положительная функция  $\alpha$  и  $\Xi(\xi \circ (ax)) = \alpha(a)\Xi \xi$  для всех  $a > 0$  и  $a \in \text{Dom}(\alpha)$ ; в любом случае  $1 \in \text{Dom}(\alpha)$ ;

(i3) Существует положительная функция  $\gamma$  и  $\Xi(c\xi) = \gamma(c)\Xi \xi$  для всех  $c > 0$  и  $c \in \text{Dom}(\gamma)$ ; в любом случае  $1 \in \text{Dom}(\gamma)$ .

Мы называем функционал  $Z$  чувствительным (см. выше), если

$$(s1) \quad Z(\xi \circ (x + b)) = Z \xi - b \text{ для всех } b \in R.$$

Следующие свойства могут выполняться:

$$(s2) \mathbf{Z}(\zeta \circ (ax)) = \frac{1}{a} \mathbf{Z}\zeta \text{ для } a > 0; \text{ объединяя это}$$

$$\text{с (s1), мы получаем } \mathbf{Z}(\zeta \circ (a(x+b))) = \frac{1}{a} \mathbf{Z}\zeta - b$$

$$\text{или } \mathbf{Z}(\zeta \circ (ax+b)) = \frac{1}{a} (\mathbf{Z}\zeta - b).$$

#### 2.1.4 Поворот, сдвиг и сжатие изображения

Рассмотрим изображения  $F_1$  и  $F_2$ . Предположим, что изображение  $F_2$  получается из изображения  $F_1$  сжатием, поворотом и сдвигом на вектор. Пусть коэффициент сжатия будет  $\mu > 0$ , так что: 1) если  $\mu < 1$ , то изображение  $F_2$  меньше чем изображение  $F_1$  и 2) если  $\mu > 1$ , то изображение  $F_2$  больше чем изображение  $F_1$ .

Признак  $\Pi_1$  вычисляется для первого изображения, а признак  $\Pi_2$  - для второго. Выразим признак  $\Pi_2$  через признак  $\Pi_1$ . Их функции представления мы обозначаем теми же буквами  $F_2$  и  $F_1$  для краткости.

Пусть функционалы  $\mathbf{T}$  и  $\Phi$  будут инвариантными по нашему определению. Теперь мы рассматриваем возможности для другого функционала  $\mathbf{P}$  в следующих двух теоремах. Существует операция  $^\perp$ , определенная следующим образом. Пусть  $h$  будет  $2\pi$ -периодической и может быть разложена в ряд  $h(\varphi) = \sum_{i=0}^{\infty} h^{(i)}(\varphi)$ , где  $h^{(i)}$  - это  $i$ -я гармоника Фурье. Тогда  $h^\perp = h - h^{(1)}$ , т.е. эта операция исключает первую гармонику.

**Теорема 1.** Пусть выполняются условия, установленные выше, и также функционал  $\mathbf{P}$  будет инвариантным. Тогда

$$\Pi_2 = \gamma_\Phi(\gamma_P(\alpha_T(v)) \bullet \alpha_P(v)) \bullet \Pi_1,$$

где  $v = 1/\mu$ , (если коэффициент можно вычислить).

Мы можем видеть, что теорема 2 при  $\mu = 1$  выводит теорему 1.

**Теорема 2.** Пусть выполняются условия, установленные выше, функционал  $\mathbf{P}$  является чувствительным и выполняются свойства (s1) и (s2). Предположим  $\Phi u = \Phi(u^\perp)$  для всех допустимых функций  $u$ . Тогда  $\Pi_2 = \gamma_\Phi(\mu)\Pi_1$ , (если коэффициент можно вычислить).

В теореме 3 функционал  $\Phi$  может быть равен модулю амплитуды некоторой гармоники, но первой гармоники.

#### 2.1.5 Понимание смысла признаков

Когда строятся признаки, они должны исследоваться. Их полезность должна быть подтверждена. Можно применить интуицию или теоремы. Однако, основное решение будет приниматься по результатам экспериментов на компьютере. Мы полагаем, и предварительные изучения подтверждают, что некоторые признаки будут полезными и дадут прекрасные отличия. Их смысл можно подтвердить экспериментами на компьютере. Значения можно сформулировать, используя топологическую, геометрическую или обычную терминологию. Пример обычного языка: признак или группа признаков может выбирать один из следующих ответов. Образ нечеткий или четкий, крупный или мелкий, тонкий или грубый, запутанный или ясный, преимущественно горизонтальный или главным образом вертикальный и т.д. Эти характеристики полезны в анализе текстуры.

#### 2.1.6 Примеры функционалов.

##### 2.1.6.1 Примеры trace-функционалов.

Функционал  $\mathbf{T}$  мы называем trace-функционалом. Он применяется к изображению. Для каждой прямой он дает число, индексированное парой параметров  $(\varphi, p)$ . Когда параметры являются дискретными, получается trace-матрица. В столбцах этой матрицы параметр  $p$  является постоянным, но параметр  $\varphi$  изменяется в интервале  $0..2\pi$ . Здесь рассматриваются следующие  $\mathbf{T}$  функционалы для бинарных изображений:

1. Суммарная длина всех отрезков, которые прямая порождает из изображения. Таким образом, мы можем назвать этот вариант функционалом Радона.

2. Максимальная длина из всех отрезков, которые прямая порождает из изображения. Таким образом, мы можем назвать этот вариант функционалом "MaxL".

На рис.1 приведен пример трейс-преобразования бинарного изображения цифры 2 с помощью  $\mathbf{T}$  функционала MaxL..

##### 2.1.6.2 Примеры диаметральных функционалов.

Функционал  $\mathbf{P}$  мы называем диаметральным функционалом. Он применяется к столбцам trace-матрицы. Здесь рассматриваются три его варианта:

1. Первый вариант называется "Norm". Он является стандартной нормой  $Ph = \sqrt{\int h^2}$ . Он инвариантен в смысле (i1).

2. Второй вариант называется "Max". Он является максимумом функций. Он инвариантен в смысле (i1).

3. Третий вариант называется "Mid". Он является стандартным центром тяжести, вычисляемым по

формуле  $Ph = \frac{\int ph(p)dp}{\int h(p)dp}$ . Он удовлетворяет

условиям (s1) и (s2), и также он сохраняет условия теоремы 3.

Пример свертки трейс преобразования, приведенного на рис.1 с помощью P функционала Max приведен на рис.2.

### 2.1.6.3 Примеры круговых функционалов.

Функционал  $\Phi$  мы называем круговым функционалом. Он применяется к  $2\pi$ -периодическим функциям. Здесь рассматриваются три его варианта:

1. Первый вариант называется "Log". Он вычисляется по формуле  $\Phi h = \int \ln|h(\varphi) + 1|d\varphi$ , интегрирование распространяется на интервал  $[0, 2\pi]$ . Он инвариантен в смысле (i1).

2. Второй вариант называется "Integ". Он вычисляется по формуле  $\Phi h = \int h(\varphi)d\varphi$ , интегрирование распространяется на интервал  $[0, 2\pi]$ . Он инвариантен в смысле (i1), и также он сохраняет условие теоремы 3.

3. Третий вариант называется "Harm2". Он является амплитудой второй гармоники функции. Он инвариантен в смысле (i1), и также он удовлетворяет условию теоремы 3.

Поэтому, следующие комбинации функционалов  $(P, \Phi)$  соответствуют теореме 2: (Norm, Log), (Norm, Integ), (Norm, Harm2), (Max, Log), (Max, Integ), (Max, Harm2). Следующие комбинации функционалов  $(P, \Phi)$  соответствуют теореме 3: (Mid, Integ), (Mid, Harm2).

Каждый элемент в табл. 1 был вычислен в следующие три стадии. Рассмотрим пример 'Figure-6' и набор функционалов

$(T, P, \Phi) = (MaxL, Max, Log)$ . Во-первых,

функционал T породил трасе-трансформанту (см. Рис. 2). Она изменяется в интервале 0..112. Она выполнена как полутоновое изображение на рис. 2. Мы можем видеть, что она является изображением на цилиндре (соедините левый и правый края) или на листе Мёбиуса (примите во внимание только правую часть рис. 2).

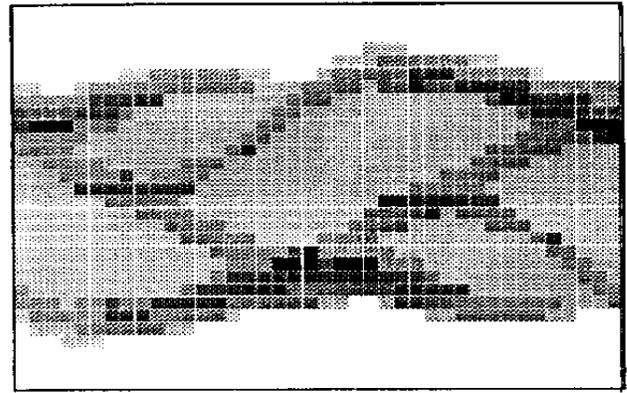


Рис. 1. Трасе-трансформанта

Затем диаметральный функционал P дал  $2\pi$ -периодическую функцию, см. рис. 3. Третьей стадией было получение числа в табл. 1 из этой функции, используя функционал  $\Phi$ .

Наибольшая часть времени вычисления тратится на получение трасе-трансформанты. Однако, мы замечаем, что каждый её элемент можно вычислить независимо.



Рис. 3. Результат применения диаметрального функционала

### 2.1.9 Дополнительные теоретические результаты

Две точки зрения.

В этом параграфе мы вводим некоторые обозначения. Пусть O будет точкой на плоскости, рассматриваемой как начало системы координат, и  $e_1, e_2$  - два базисных вектора. Мы имеем координатную систему, записанную в форме  $(O, e_1, e_2)$  для краткости. Тогда каждая точка M изображения получает координаты:

$M = O + e_1x_1 + e_2x_2$ . Линейное преобразование, имеющее матрицу A и сдвигающий вектор w, дает другую точку M, которая имеет цвет точки M, т.е. мы получаем линейное преобразование изображения в форме

$$M = O + (e_1, e_2)(A(x_1, x_2)' + (w_1, w_2)'),$$

Пусть  $(P, \mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2)$  будет другой координатной системой и  $M = P + (v_1, v_2)(y_1, y_2)^t$ . Пусть матрица  $A$  и вектор  $\mathbf{u}$  соединяют обе системы в форме

$$(v_1, v_2) = (e_1, e_2)A^{-1}, O - P = \mathbf{u} = (v_1, v_2)(w_1, w_2)^t$$

Эти формулы выводят  $(y_1, y_2)^t = A(x_1, x_2)^t + (w_1, w_2)^t$ . Теперь мы не меняем образ, но меняем координатную систему.

Мы имеем следующее заключение. Пусть изображение прошло через преобразование. Тогда новое изображение равно тому, которое мы видим первоначальным изображением в координатах  $(P, \mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2)$ , если мы трактуем систему  $(P, \mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2)$  как обычную ортонормальную систему, вектор  $\mathbf{v}_1$  - как направленный вправо и вектор  $\mathbf{v}_2$  - как направленный вверх. Таким образом, линейные преобразования равны фиксации некоторой новой координатной системы.

Определим вектор и стандартную матрицу поворота на угол  $\theta$ .

$$\lambda(\theta) = (\cos \theta, \sin \theta)^t,$$

$$S(\theta) = (\lambda(\theta), \lambda(\theta + \pi/2)).$$

Некоторые свойства чувствительных функционалов.

Рассмотрим дополнительное свойство чувствительных функционалов  $\mathbf{Z}$ :

$$(s3) \mathbf{Z}(c\zeta) = \mathbf{Z}\zeta \text{ для всех } c > 0.$$

Чувствительный функционал не может быть определен на какой-либо периодической функции, поэтому, можно сделать вариант определения для случая периодических функций. Пусть  $\tau$  есть положительное число. Функционал  $\mathbf{Z}$  называется  $\tau$ -чувствительным, если и только если

$$(s1. \tau)$$

$$\mathbf{Z}(\zeta \circ (x + b)) = \mathbf{Z}\zeta - b(\text{modd } \tau) \text{ для всех } b.$$

Более точное определение применяет связи в форме  $\{r + j\tau : j \text{ есть целое}\}$  для описания значений  $\mathbf{Z}$ .

Поворот, сдвиг и сжатие.

Пусть координатные системы  $(O, \mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2)$  и  $(P, \mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2)$  соединены равенствами

$$O - P = (v_1, v_2)s_0\lambda(\psi_0),$$

$(e_1, e_2) = (v_1, v_2)\mu S(\theta), (\mu > 0)$ . Затем мы имеем поворот, сжатие и сдвиг изображения. Определим  $v = 1/\mu$  и  $s_1(\varphi) = s_0 \cos(\varphi - \psi_0)$ ,

$s_2(\varphi) = s_0 \sin(\varphi - \psi_0)$ . Тогда можно доказать следующее равенство (зависимости на координатных системах принимаются во внимание):

$$I(O\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \varphi - \theta, v\rho - v_1s_1(\varphi), vt - v_2s_2(\varphi)) = I(P, \mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \varphi, \rho, t) \text{ (for all } \varphi, \rho, t)$$

$$\Pi_2 = \Pi(P, \mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \Phi, \mathbf{P}, \mathbf{T}, F) = \Phi \circ \mathbf{P} \circ \mathbf{T}(F \circ I(P, \mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \varphi, \rho, t)) = \Phi \circ \mathbf{P} \circ \mathbf{T}(F \circ I(O\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \varphi - \theta, v\rho - v_1s_1(\varphi), vt - v_2s_2(\varphi))).$$

Эта формула дает возможность выразить признак  $\Pi_1 = \Pi(O, \mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \Phi, \mathbf{P}, \mathbf{T}, F)$ .

Комбинированные функционалы.

Этот и следующий параграфы описывают некоторые возможные расширения теории.

Чувствительные функционалы не могут определяться на нулевой функции. Эта ситуация напоминает такую же для полярного угла начала координат в плоскости. Таким образом, мы получаем идею рассматривать пару (или больше) функционалов, один из которых является чувствительным, а другой - инвариантным. Это напоминает рассмотрение полярного угла и радиуса совместно. Когда чувствительный функционал не определен, другой равен нулю. Эта и аналогичные конструкции позволяют развить идеи для анализа изображений с триплексными признаками.

Выявление преобразования изображения.

Когда используется много признаков, возможно распознавать образец и выявлять параметры  $\mu, \theta$  и координаты сдвигающего вектора  $O - P$ , которые являются значениями  $s_0, \psi_0$ . Мы говорили о первой гармонике в параграфе 6. Эта гармоника чувствительна к сдвигу изображения.

### 3. ПРИЗНАКИ, ИНВАРИАНТНЫЕ К ПРЕОБРАЗОВАНИЯМ ПОДОБИЯ

При синтезе признаков, инвариантных к преобразованиям подобия, необходимо выбирать  $\mathbf{T}$  функционалы, удовлетворяющие свойствам инвариантности (i1)...(i4) [1]. Показано, что они сохраняют зависимость от  $k$ . Установлен характер этой зависимости для различных видов  $\mathbf{T}$  функционалов. Полученные результаты приведены в табл.1, где  $\mathbf{T}$  и  $\mathbf{T}'$  значения  $\mathbf{T}$  функционала до и после преобразования; с.к.о. - среднее-квадратическое отклонение. Из табл.1 следует, что функция преобразования изображения  $\mathbf{T}$  функционалом при преобразованиях подобия сдвигается по осям  $\theta, \rho$  (полярным координатам линий сканирования), масштабируется по оси  $\rho$ , а её значения увеличиваются в  $k$  раз.

Таблица 1.

№	T функционал	Зависимость между T и T'
1	$T_1 = \int_l \xi(t) dt$	$T_1' = (1/k)T_1$
2	$T_2 = \text{с.к.о.}(\xi(t))$	$T_2' = \frac{1}{k}T_2$
3	$T_3 = T_1 \cdot T_2$	$T_3' = (1/k^3)T_3$

Это позволяет определить коэффициенты пропорциональности, с которыми при этом изменяются значения P и Ф функционалов. Для комбинаций различных видов функционалов эти коэффициенты приведены в табл.2, где

$P_1 = \sqrt{\int \zeta^2(p) dp}$  - гильбертова норма функции

$\zeta(p)$ ;  $P_2 = \max(\zeta(p))$  - максимум функции

$\zeta(p)$ ;  $P_3 = \text{mes}(\text{sup port } \zeta(p))$  - мера носителя

функции  $\zeta(p)$ . Из табл.2 следует, что инвариантные признаки могут быть получены либо в виде отношений тройных функционалов, использующих одинаковые T и P функционалы, либо в виде отношений тройных функционалов, использующих одинаковые Ф функционалы и разные комбинации T и P функционалов.

Таблица 2

	$P_1$	$P_2$	$P_3$
$T_1$	$k^{-0.5}$	$k^{-1}$	$l$
$T_2$	$k^{-1.5}$	$k^{-2}$	$k^{-1}$
$T_3$	$k^{-2.5}$	$k^{-3}$	$k^{-2}$

При этом отношения должны иметь следующий вид

$$P_{ij} = TF_i^{\alpha_1} / TF_j^{\alpha_2},$$

где  $P_{ij}$  - инвариантный признак;  $\alpha_1, \alpha_2$  - константы.

Показано, что число всех возможных инвариантных признаков, синтезированных описанными выше способами, равно

$$N = 0.5(n_T n_P n_\Phi (n_T n_P n_\Phi - 1) + n_T n_P n_\Phi (n_\Phi - 1)),$$

где  $n_T, n_P, n_\Phi$  - число T, P и Ф функционалов.

Из табл. 2 также следует, что с помощью рассмотренных тройных функционалов может быть определен масштабный коэффициент изображения  $k$ . Для этого достаточно определить отношения значений одинаковых тройных функционалов, вычисленных для оригинала, относительно которого определяется масштабный коэффициент  $k$ , и для распознаваемого изображения. Тогда, например, отношение значений тройных функционалов, содержащих функционалы  $T_1$  и  $P_1$  из табл.2, будет равно  $k$ . Значения масштабного коэффициента, полученные всеми возможными способами, при этом следует осреднить, что повышает достоверность полученной оценки

#### 4. Программно-аппаратное обеспечение системы

Рассматриваемая система позволяет выполнять все основные виды предварительной обработки, обучение распознаванию объектов некоторой конкретной предметной области по их изображениям и собственно распознавание. Система создана на базе персонального компьютера IBM PC Pentium II. Её программное обеспечение разработано для операционной системы Windows 98 с использованием средств визуализированного объектно-ориентированного программирования инструментальной среды C++ Builder 3.0. Программное обеспечение включает следующие основные модули: пользовательский интерфейс; предварительной обработки изображений; обслуживания базы данных предметной области; обучения системы распознаванию в конкретной предметной области; тестирования качества работы системы при распознавании; распознавания объектов в конкретной предметной области.

Модуль пользовательского интерфейса выполнен с применением стандартных визуальных интерфейсных компонент Windows 98. Его отличают наглядность и дружелюбность к пользователю. Наличие развитых меню и окон для вывода оригиналов изображений и результатов их обработки делает работу с системой естественной и удобной.

Модуль предварительной обработки изображений используется при подготовке из них препаратов, пригодных к распознаванию, для чего в нём реализованы методы сегментации и фильтрации изображений, а также огрубления цветных изображений с целью представления их в виде цветowych мозаик. Они могут применяться к изображениям как отдельно, так и в пакетном режиме. Методы предварительной обработки, отобранные пользователем в интерактивном режиме, могут быть сохранены для последующего использования при обработке изображений, полученных в одинаковых условиях.

Модуль обслуживания базы данных используется на этапе создания описания предметной области, для работы в которой настраивается система. При обучении в базу данных заносятся расклассифицированные препараты, полученные в результате предварительной обработки изображений, а затем для них с использованием **Т**, **Р** и **Ф** функционалов, выбранных пользователем из специального меню, вычисляются значения различных инвариантных и чувствительных триплетных признаков. В этом модуле также предусмотрена оптимизация полученного набора признаков с целью отбора из них наиболее информативных. Она выполняется в соответствии с выбранным пользователем типом решающей процедуры. В системе реализованы следующие виды решающих процедур: алгоритмы вычисления оценок (АВО), алгоритмы типа "Кора", "Selfic", "Clafic" и алгоритмы эмуляции нейронных сетей.

Модуль тестирования используется для получения точечных оценок и доверительных границ для вероятностей правильного распознавания в различных предметных областях. Тестирование может быть выполнено на контрольной выборке, составленной случайным образом или назначенной по усмотрению пользователя. В этом модуле также предусмотрена возможность тестирования методом скользящего экзамена, при котором системой выполняется распознавание изображений всех объектов, описанных в базе данных. Тестирование выполняется с использованием той же решающей процедуры, которая была выбрана пользователем для обучения системы.

Для ускорения работы системы распознавания разработан аппаратный акселератор на чипах TMS320C6000 (сигнальных процессорах с производительностью 160 Мфлоп/с), устанавливаемый в слот ISA-шины IBM PC. Он используется для выполнения наиболее длительных и часто встречающихся операций, к которым относятся процедуры сканирования изображения, вычисления для них значений триплетных признаков и решающие процедуры, используемые в системе. Взаимодействие программных модулей с акселератором осуществляется посредством драйвера, разработанного для операционной системы Windows 98.

Система прошла успешную апробацию при решении целого ряда прикладных задач в области технической и медицинской диагностики, в частности в области гематологии. Опыт её эксплуатации показал, что она одинаково успешно может быть использована как при решении практических задач в области распознавания зрительных образов, так и в качестве мощного инструментального средства для разработки и исследования эффективности новых алгоритмов распознавания, использующих триплетные признаки.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленная теория и разработанные на её основе методики позволяют синтезировать большое количество качественно новых признаков изображений. Их отличительной особенностью является независимость от преобразований подобия, а в более общем случае и от аффинных преобразований распознаваемого изображения. При использовании таких признаков становится возможным создание устройств и систем, способных распознавать изображения независимо от их положения, угловой ориентации и масштаба.

Представленный вариант системы, разработанный авторами на базе IBM PC PENTIUM II и дополненный аппаратным ускорителем на сигнальных процессорах TMS320C6000, имеет высокое быстродействие. Опыт её эксплуатации показал, что она успешно может быть использована для решения широкого круга прикладных задач распознавания черно-белых и цветных изображений в области технической и медицинской диагностики, в частности в области гематологии.

**Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 97-01-00106**

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Федотов Н.Г., Кадыров А.А. Новые признаки изображения, инвариантные относительно группы движений и аффинных преобразований. //Автометрия, № 4, 1997, с.88-92.
2. Федотов Н.Г. Теория признаков распознавания изображений, основанная на стохастической геометрии. Тезисы докладов на 3-ей конф-ии "Распознавание образов и анализ изображений: новые информационные технологии (РОАИ-97)", 1-7 декабря 1997г., Нижний Новгород, РАН - Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, с.278-282.
3. Федотов Н.Г. Новый подход к формированию признаков распознавания изображений с позиций стохастической геометрии. Тезисы докладов 8-ой Всероссийской конференции "Математические методы распознавания образов" (ММРО-8), Москва, 1997, с.113-114.
4. Федотов Н.Г., Мельников М.М., Тужилов И.В., Александров С.В. Принципы построения систем распознавания изображений с помощью признаков, основанных на стохастической геометрии. Тезисы докладов на 3-ей конф-ии "Распознавание образов и анализ изображений: новые информационные технологии (РОАИ-97)", 1-7 декабря 1997г., Нижний

Новгород, РАН - Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, с.172-176.

5. М.М. Мельников. Принципы проектирования стохастических устройств распознавания изображений. Тезисы докладов Международной конференции "Непрерывные и смежные логики в информатике, экономике и социологии", октябрь 1997г., Пенза, Приволжский дом знаний-Пензенский технологический институт, с.41-42.

6. Федотов Н.Г., Мельников М.М., Александров С.В., Пикулин В.В. Интерактивная система исследования моделей инвариантного распознавания изображений. Тезисы докладов 2-ой Международной конференции "Интерактивные системы: Проблемы человеко-машинного взаимодействия", 15-17 сентября 1997г., Ульяновский государственный технический университет, с.37-38.

7. Тужилов И.В. Концепция трассировки СБИС. - "Информационные технологии в проектировании и производстве". - 1977.-Вып.1.-с.49-53.

8. Мельников М.М., Костюшин Р.А. Интерактивная система проектирования надежных устройств распознавания изображений. Тезисы докладов на Международной научно-технической конференции "Актуальные проблемы анализа и обеспечения надежности и качества приборов, устройств и систем", 25-31 мая 1998г., Пенза, ПГУ.

9. Мельников М.М. Концепция инвариантного распознавания изображений. Тезисы докладов на III Международной научно-технической конференции "Новые информационные технологии и системы", 10-12 декабря 1998г., Пенза, ПГУ.

10. Мельников М.М. Информационное обеспечение систем инвариантного распознавания изображений. Там же.

11. Мельников М.М., Федотов Н.Г. Система инвариантного распознавания изображений. Там же.

12. Федотов Н.Г., Мельников М.М., Тужилов И.В. и др. Система распознавания изображений на основе методов стохастической геометрии. Тезисы докладов на конференции "Распознавание образов и изображений: РОАИ - 4 - 98 ", 11-17 октября 1998г., Новосибирск.

13. Федотов Н.Г., Тужилов И.В. Нейрокомпьютерная технология для систем автоматической генерации признаков распознавания образов // "Информатика-Машиностроение". - 1998. - Вып. 1(19). - С. 38-41.

14. Федотов Н.Г., Мельников М.М., Тужилов И.В., Александров С.В. Принципы построения систем распознавания изображений с помощью признаков, основанных на стохастической геометрии // III конференция "Распознавание образов и анализ изображений: новые информационные технологии (РОАИ)". 1-7 декабря 1997 года. Тез. докл. - Нижний Новгород: НИИ прикладной математики и кибернетики при ННГУ, 1997. - Ч. II. - С. 172-176.

15. Fedotov, N.G., and I.V. Tuzilov. "Neural Computing Procedures to Make Decisions in Systems with Pattern Recognition Feature Automatic Generations." International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM'98). Proceedings. St. Petersburg, Russia, 22-26 June 1998. St. Petersburg: St. Petersburg Electrotechnical University, 1998, vol. 1, pp. 337-40

16. Kadyrov A., Tkacheva O., Shcherbakov M.A. A novel approach for recognition of images and their orientation // Fourth IMA International Conference on Mathematics in Signal Processing: Conference Digest, University of Narvik, UK, 1998 Part 2- P. 9-12.

## "Pattern Recognition System based on Methods of Stochastic Geometry"

### CONCLUSION

The introduced theory and designed on its basis the techniques allow to synthesize a great number of qualitatively new features of the images. Their distinctive feature is the independence from homothetic transformations, and in more general case from affine changes of the recognized image. At usage of such features becomes possible the creation of devices and systems which are capable to recognize the images irrespective of their position, angular orientation and scale.

The introduced variant of the system, designed on the base of IBM PC PENTIUM II and supplemented with the hardware booster on signal processors TMS320C6000, has a fast response time. The experience of its maintenance has shown, that it can be successfully utilised for solution of wide range of applied tasks of recognition of the black-and-white and colour images in the field of technical and medical diagnostics, in particular in Haematology.

### Авторы:

Федотов Николай Гаврилович (Nikolay G. Fedotov) д.т.н., профессор, член-корреспондент РАН, заведующий кафедрой "Экономической кибернетики" Пензенского государственного университета

Адрес: 40, ул. Красная, Пенза, 440017, Россия, Пензенский государственный университет, кафедра "Экономическая кибернетика"

Телефон: (841-2)663744

Телефакс: (841-2)666493

E-mail: fedotov@diamond.stup.ac.ru

Мельников Михаил Михайлович (Melnikov Michail Michaylovich) к.т.н., докторант кафедры "Экономическая кибернетика" Пензенского государственного университета

Телефон: (841-2)663744

Телефакс: (841-2)666493

Костюшин Роман Александрович (Kostuchin Roman Alexandrovich) аспирант кафедры "Экономическая кибернетика" Пензенского государственного университета

Телефон: (841-2)550199  
Телефакс: (841-2)666493  
E-mail: s12@dionis.sura.com.ru