

М.А. Басараб, К.В. Кондрашов

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕОМЕТРИИ КИСТИ РУКИ
МЕТОДОМ R-ФУНКЦИЙ В ЗАДАЧАХ БИОМЕТРИИ**

Рассмотрена геометрическая модель кисти руки, построенная с помощью метода R-функций (функций В.Л. Рвачева), а также ее применение к задаче биометрической идентификации личности. Предложена мера сходства кистей рук на основе алгоритмов контурного анализа. Проведено исследование качества идентификации и производительности предложенного метода.

E-mail: bmic@mail.ru

Ключевые слова: R-функция, биометрическая идентификация.

Введение. Для идентификации личности в современных электронных системах контроля и управления доступом все чаще применяются устройства, использующие в качестве идентифицирующего признака биометрические характеристики. В отличие от систем, основанных на наборе кода и различных видах смарт-карт и ключей, такие устройства предоставляют доступ только определенному человеку — носителю кода.

Достоинства биометрических идентификаторов на основе уникальных биологических, физиологических особенностей человека, удостоверяющих личность, привели к интенсивному развитию соответствующих средств. В настоящее время предъявляются повышенные требования к устройствам биометрической идентификации личности. Прослеживаются следующие тенденции в этой области:

— многокритериальная идентификация (в целях увеличения надежности для идентификации личности используется несколько биометрических характеристик одновременно);

— расширение класса устройств, в которых применяется биометрическая идентификация (ноутбуки, планшетные компьютеры, устройства бытовой техники);

— необходимость разработки экономичных алгоритмов с точки зрения временных затрат и памяти.

Эти тенденции обуславливают актуальность разработки новых методов биометрической идентификации личности. Целью данной статьи является разработка модели кисти руки с помощью метода R-функций и исследование применимости разработанной модели к задачам биометрической идентификации личности.

Модель кисти руки. Пусть на плоскости задана область Ω с границей $\partial\Omega$, необходимо построить функцию $\omega(x, y)$, положительную внутри области Ω , отрицательную вне этой области и равную нулю на границе $\partial\Omega$. Уравнение $\omega(x, y) = 0$ будет в неявной форме определять геометрическое место точек, представляющих границу области.

Предположим, что область Ω образована из исходных областей $\Omega_1, \dots, \Omega_m$ с помощью логических операций над множествами:

$$\Omega = F(\{\Omega_1, \dots, \Omega_m\}, \{\cap, \cup, \neg\}), \quad (1)$$

где \cap — пересечение; \cup — объединение; \neg — дополнение.

Полагаем, что исходные области имеют более простую форму, чем область Ω , и для каждой из них известно уравнение ее границы $\omega_i(x, y) = 0, i = 1, \dots, m$. Метод R -функций позволяет на основе теоретико-множественного описания области Ω получить в аналитическом виде уравнение ее границы $\omega(x, y) = 0$ [1].

R -функцией (функцией В.Л. Рвачева), соответствующей разбиению числовой оси на интервалы $(-\infty, 0)$ и $[0, \infty)$, называется такая функция, знак которой вполне определяется знаками ее аргументов. Здесь во избежание использования трехзначной логики ноль отнесен к положительным числам.

На практике наиболее часто применяется система R -функций N_α :

$$x \wedge_\alpha y \equiv (1 + \alpha)^{-1} \left(x + y - \sqrt{x^2 + y^2 - 2\alpha xy} \right),$$

$$x \vee_\alpha y \equiv (1 + \alpha)^{-1} \left(x + y + \sqrt{x^2 + y^2 - 2\alpha xy} \right),$$

$$\bar{x} \equiv -x.$$

где $-1 < \alpha < 1$. Осуществим в (1) формальную замену Ω на $\omega(x, y)$, Ω_i на $\omega_i(x, y), i = 1, \dots, m$, а символов $\{\cap, \cup, \neg\}$ — на символы R -операций $\{\wedge_\alpha, \vee_\alpha, \bar{}\}$ соответственно. Полученное в итоге аналитическое выражение определяет в элементарных функциях требуемое уравнение границы $\partial\Omega$

$$\omega(x, y) = 0.$$

При этом для внутренних точек области $\omega(x, y) > 0$, а для внешних — $\omega(x, y) < 0$.

Нетрудно убедиться в том, что уравнение

$$\omega_i(x, y) = \frac{-x(y_{i+1} - y_i) + y(x_{i+1} - x_i) - x_{i+1}y_i + x_iy_{i+1}}{\sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2}} = 0 \quad (2)$$

— это уравнение прямой, проходящей через точки $A_i(x_i, y_i)$ и $A_{i+1}(x_{i+1}, y_{i+1})$.

Функция ω_i принимает положительные значения в открытой области Ω_i^+ , расположенной слева от вектора A_iA_{i+1} , и отрицательные —

в открытой области Ω_i^- , находящейся справа от него. Таким образом, функции вида (2) позволяют при помощи метода R -функций конструировать уравнения границ произвольных многоугольников на основе их теоретико-множественного описания, получаемого при помощи процедуры выпуклого дополнения многоугольника.

В таблице приведены выражения для R -конъюнкций некоторых основных систем R -функций [2].

Выражения для R -конъюнкций некоторых основных систем R -функций

Обозначение	Выражение для R -конъюнкции
N_α	$x \wedge_\alpha y \equiv \frac{1}{1+\alpha} \left(x + y - \sqrt{x^2 + y^2 - 2\alpha xy} \right), \quad -1 < \alpha \leq 1$
N_0	$x \wedge_0 y \equiv x + y - \sqrt{x^2 + y^2}$
N_1	$x \wedge_1 y \equiv \frac{1}{2} (x + y - x - y) \equiv \min(x, y)$
N_p	$x \wedge_p y \equiv x + y - \left(x ^p + y ^p \right)^{1/p}$

В работе [3] описан алгоритм идентификации групповых точечных объектов по форме яркостного рельефа расфокусированного изображения сцены точечных объектов, называемого ассоциированным сплошным образом. Яркость и положение ассоциированного сплошного образа определяется кумулятивным вкладом каждой точки группового объекта. Поэтому помехоустойчивость подобного представления группового точечного объекта будет более высокой, чем при его задании отдельными точками. Идею этого алгоритма можно применить для решения задачи идентификации личности по контуру ладони, используя в качестве ассоциированного сплошного образа поверхность, описываемую уравнением контура ладони, полученным с помощью метода R -функций.

Примем, что контур ладони представлен в виде последовательности ключевых (начало и конец ладони, концы пальцев, промежутки между пальцами) точек $(x_i, y_i) i = 1, \dots, M$. При этом число M является фиксированным и небольшим ($M \approx 20 \dots 30$ в зависимости от выбора ключевых точек). Рассмотрим две модели контура ладони.

Контур, содержащий 24 точки (рис. 1, а), включает в себя начало и конец ладони, по две точки на конец каждого пальца и каждый промежуток между пальцами, кроме промежутка между указательным и большим пальцами, который представляет собой протяженную область изгиба и потому представлен с помощью пяти точек. Контур, состоящий из 32 точек (рис. 1, б), дополнительно имеет две точки в

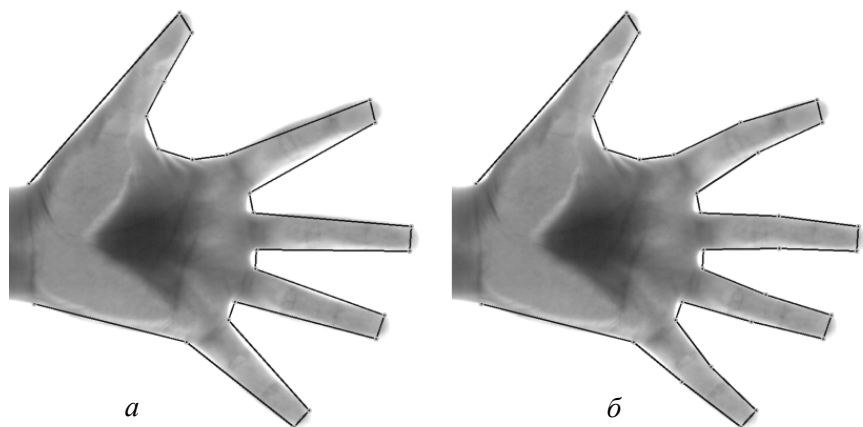


Рис. 1. Контуры ладони, содержащие 24 (а) и 32 точки (б)

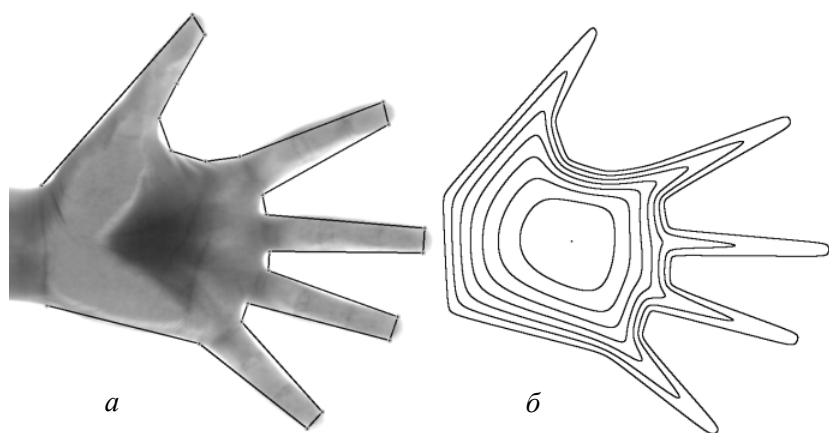


Рис. 2. Контур ладони (а) и сечения соответствующей поверхности, построенной с помощью метода R -функций (б)

середине каждого из пальцев, кроме большого, что позволяет учесть их возможный изгиб.

Мера сходства контуров ладоней. В изложенном в работе [3] алгоритме идентификации используется сравнение сечений ассоциированного сплошного образа в виде линий уровня. Пример линий уровня поверхности, задаваемой уравнением контура ладони, полученным с помощью метода R -функций, приведен на рис. 2.

Каждая линия уровня описывается комплекснозначным цепным кодом контура. Таким образом, линия уровня может рассматриваться как элемент k -мерного комплексного векторного пространства C^{k^k} :

$$\Gamma = \{\gamma(n)\}_{0,k-1} = \{\gamma(0), \gamma(1), \dots, \gamma(k-1)\}.$$

В работе [3] в качестве меры сходства таких заданных контуров, инвариантной к повороту, масштабированию и сдвигу в плоскости

изображения, предложено использовать нормированное скалярное произведение контуров

$$\eta_{C^k} = \frac{(\Gamma, N)_{C^k}}{\|\Gamma\| \|N\|}, \quad (3)$$

где скалярное произведение контуров и норма определены стандартным для пространства C^k способом.

Введем на основе (3) меру сходства двух ладоней, используя сечения соответствующих им поверхностей, полученных с помощью метода R -функций. Пусть заданы контуры ладоней Γ и N ; $\omega_\Gamma = 0$, $\omega_N = 0$ — уравнения контуров, полученные с помощью метода R -функций. Выберем число необходимых сечений поверхностей S , описываемых функциями ω_Γ , ω_N . Введем следующие обозначения:

$$M_\Gamma = \max_{x, y \in \Gamma} \omega_\Gamma(x, y),$$

$$M_N = \max_{x, y \in N} \omega_N(x, y).$$

Запишем неявные уравнения сечений поверхностей, задаваемых уравнениями ω_Γ , ω_N :

$$\omega_\Gamma = \frac{iM_\Gamma}{S+1}, \quad i = 1, \dots, S,$$

$$\omega_N = \frac{iM_N}{S+1}, \quad i = 1, \dots, S,$$

и обозначим их комплекснозначно кодированные контуры через Γ_i и N_i соответственно. Следовательно, наборы комплекснозначных кодов контуров Γ_i , $i = 1, \dots, S$ и N_i , $i = 1, \dots, S$, составляют описание формы соответствующих контуров ладоней Γ и N поверхностей.

Составим вектор модулей нормированного скалярного произведения контуров Γ_i и N_i :

$$\eta = \left\{ \left| \frac{(\Gamma_i, N_i)_{C^k}}{\|\Gamma_i\| \|N_i\|} \right| \right\}_{i=1, \dots, S}. \quad (4)$$

Компоненты вектора (4) характеризует сходство формы отдельных сечений ассоциированных сплошных образов контуров двух ладоней. Исходя из экстремальных свойств нормированного скалярного произведения, компоненты вектора η достигают значения 1, если одно из сечений совпадает с другим сечением, возможно, повернутым, масштабированным и сдвинутым в пространстве изображения, и принимают значения, меньшие 1 в других случаях.

Если контур одной ладони совпадает с повернутым, масштабированным и сдвинутым контуром другой ладони, все компоненты вектора η принимают значение 1, а сам вектор принимает экстремальное значение

$$\eta_{\text{экс}} = \{1, \dots, 1\}_{1, \dots, S}.$$

Таким образом, в качестве меры сходства контуров ладоней Γ и N можно использовать норму вектора η . Для получения меры сходства, максимальное значение которой составляет 1, вычислим отношение нормы вектора η к норме вектора $\eta_{\text{экс}}$:

$$d(\Gamma, N) = \frac{\left\| \left\{ \left\{ \frac{(\Gamma_i, N_i)_{C^k}}{\|\Gamma_i\| \|N_i\|} \right\}_{i=1, \dots, S} \right\} \right\|}{\left\| \{1, \dots, 1\}_{i=1, \dots, S} \right\|}. \quad (5)$$

Исходя из свойств нормированного скалярного произведения, полученная мера сходства d (5) представляет собой характеристику сходства двух контуров ладоней, инвариантную к линейным преобразованиям сдвига, поворота и масштаба.

Описание тестовых данных. Для проведения экспериментов были получены изображения ладоней 15 человек, у каждого человека было снято два изображения ладони левой руки. При первоначальном тестировании первое изображение из каждой пары, соответствующей одному человеку, использовалось для формирования информации, вносимой в базу данных. Второе изображение применялось для проверки идентификации.

Для увеличения объема тестовой выборки использовалась интерполяция между контурами ладоней разных людей. Усредняя контуры двух ладоней при исходных 15 контурах можно получить $C_{15}^2 = 105$ новых контуров, которые можно применить для наполнения базы данных. Поскольку контуры представляют собой элементы линейного пространства C^k , то операция усреднения контуров Γ и N может быть определена как: $\text{mean}(\Gamma, N) = \frac{1}{2}(\Gamma + N)$.

Сравнительное исследование систем R -функций. Для сравнительного тестирования качества идентификации личности различными системами R -функций и их скорости работы использовался набор входных данных, включающий 15 пар изображений ладоней индивидов. База данных наполнялась на основе информации, полученной из 15 первых изображений в каждой паре. Второе изображение использовалось в качестве контрольного изображения. Качество идентификации личности определялось как отношение количества правильно идентифицированных контрольных объектов к общему объему тестовой выборки, т. е. находилась точность идентификации (TPR — true positive rate).

Семейство R -функций N_α порождается R -конъюнкцией

$$x \wedge_\alpha y \equiv \frac{1}{1 + \alpha} \left(x + y - \sqrt{x^2 + y^2 - 2\alpha xy} \right).$$

Для семейства N_α исследовалось качество идентификации личности при варьировании параметра α в интервале $[0, 1]$. Шаг изменения параметра выбирался равным 0,1; 0,05; 0,025 в зависимости от характера поведения исследуемой закономерности.

Результаты исследования зависимости качества идентификации от количества ключевых точек, выделяемых в контуре ладони, и от значения параметра системы R -функций приведены на рис. 3, а.

Следовательно, при использовании семейства R -функций N_α оптимальны значения параметра α , принадлежащие интервалу $[0,75, 0,85]$ (выделен цветом, см. рис. 3, а), и описание контура ладони при помощи 32-х точек. Применение этих параметров позволяет достичь 100 %-ной точности идентификации личности на рассмотренных данных.

Семейство R -функций N порождается R -конъюнкцией

$$x \underset{p}{\wedge} y \equiv x + y - \left(|x|^p + |y|^p \right)^{1/p}.$$

Для семейства N исследовалось качество идентификации при варьировании параметра p в интервале $[1,5, 14]$. Шаг изменения параметра выбирался равным 0,5; 1,0; 2,0 в зависимости от характера поведения исследуемой закономерности.

Результаты исследования зависимости качества идентификации от количества ключевых точек, выделяемых в контуре ладони, и параметра системы R -функций приведены на рис. 3, б. Таким образом, при использовании семейства R -функций N оптимальны значения параметра p , принадлежащие интервалу $[10, 12]$ (выделен, см. рис. 3, б), и описание контура ладони при помощи 24-х точек. С помощью этих параметров также достигается 100 %-ная точность идентификации личности на используемых данных.

Исследование производительности. Для оценки производительности метода вычислялось среднее время обработки одного изображения ладони для каждого из исследуемых семейств R -функций. Усреднение времени в рамках одного семейства R -функций проводилось как по времени в тестовой выборке, так и по значению варьируемого параметра семейства. Результаты исследования среднего времени обработки одного изображения ладони, мс, приведены ниже (в числителе даны значения среднего времени обработки изображения для 24 ключевых точек, в знаменателе — для 32 ключевых точек):

N_α	119/148
N	59/904
p	

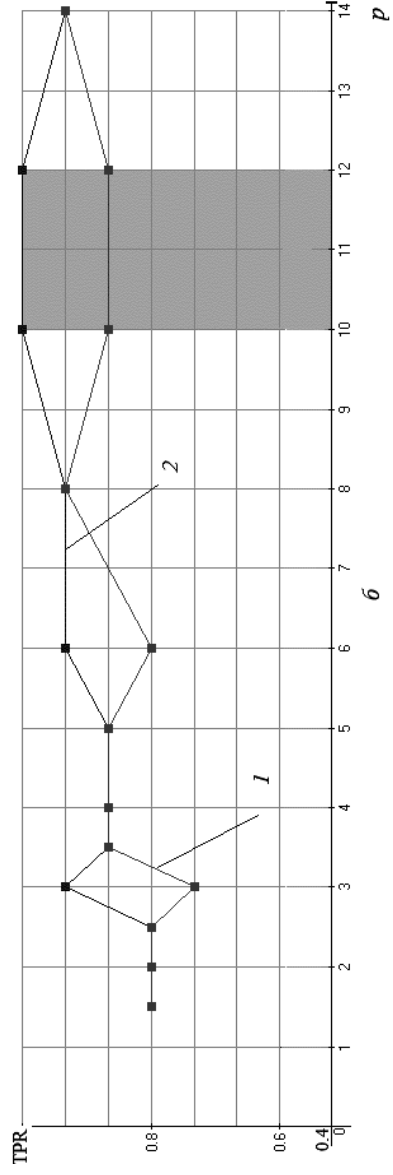
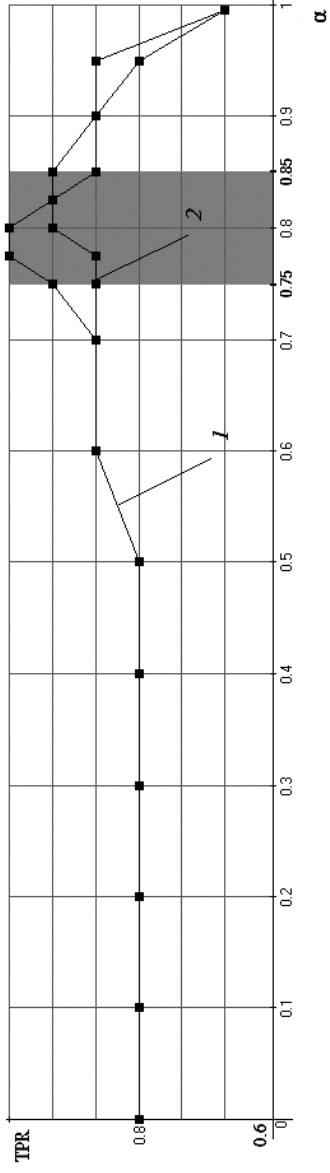


Рис. 3. Зависимость качества идентификации личности (TPR) от количества ключевых точек контура ладони и от значений параметров α и p систем R -функций $N_\alpha(a)$ и $N_p(b)$:

1, 2 — 32 и 24 ключевые точки соответственно

Таким образом, семейство R -функций N_α имеет существенно лучшую производительность по сравнению с производительностью семейства N . При использовании оптимальных параметров производительность семейства N_α превышает производительность семейства N более чем в 4 раза.

Исследование качества идентификации. Исходя из рассмотренных результатов исследовали сочетающую высокую производительность с высоким качеством идентификации систему R -функций $N_{0,8}$.

В целях более подробного исследования качества идентификации личности применялся набор исходных данных, полученный с использованием интерполяции между контурами ладоней. При этом для 15 имеющихся человек в базу данных была внесена информация, полученная из контура, усредненного по двум результатам сканирования ладони каждого человека. В базу данных также были добавлены 105 объектов, полученных с помощью методики усреднения контуров ладоней различных людей. Следовательно, общий объем базы данных составил 120 объектов. В качестве контрольных объектов использовались 30 имеющихся изображений ладоней. По результатам эксперимента были правильно идентифицированы 25 изображений из 30. Таким образом, точность идентификации составила (TPR) 0,833, что является не очень высоким результатом. Детальный анализ случаев неверной идентификации показывает, что все пять ошибочных результатов возникли, когда ладонь некоторого человека была сопоставлена с объектом из базы данных, полученным в результате усреднения контура ладони этого человека с контуром ладони другого человека. Ошибки идентификации частично обусловлены использованным методом увеличения объема тестовых выборок.

Заключение. Предложенный метод определения меры сходства контуров кистей рук показал свою применимость к задаче биометрической идентификации личности. Однако полученные результаты являются предварительными в связи с малым объемом использованной тестовой выборки. Для получения более достоверных результатов исследования качества идентификации требуется провести тестирование на большем объеме исходных данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рвачев В.Л. Теория R -функций и некоторые ее приложения. — Киев: Наукова думка, 1982. — 552 с.
2. Кравченко В.Ф., Басараб М.А. Булева алгебра и методы аппроксимации в краевых задачах электродинамики. — М.: Физматлит, 2004. — 308 с.
3. Введение в контурный анализ и его приложения к обработке изображений и сигналов / Я.А. Фурман, А.В. Кривецкий, А.К. Передреев, А.А. Роженцов и др. — М.: Физматлит, 2002. — 592 с.

Статья поступила в редакцию 4.07.2012