

Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова

На правах рукописи



Бакина Ирина Геннадьевна

**Морфологическое сравнение изображений  
гибких объектов на основе циркулярных  
моделей при биометрической идентификации  
личности по форме ладони**

05.13.17 – Теоретические основы информатики

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Москва – 2011

Работа выполнена на кафедре математических методов прогнозирования  
факультета вычислительной математики и кибернетики  
Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
**Местецкий Леонид Моисеевич.**

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
**Моттль Вадим Вячеславович,**  
доктор физико-математических наук  
**Лепский Александр Евгеньевич.**

Ведущая организация: Институт проблем информатики РАН.

Защита диссертации состоится 8 декабря 2011 г. в \_\_\_\_\_ часов на заседании  
диссертационного совета Д 002.017.02 при Учреждении Российской академии  
наук Вычислительный центр им. А.А. Дородницына РАН по адресу: 119333,  
г.Москва, ул. Вавилова, д.40

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ВЦ РАН.

Автореферат разослан 7 ноября 2011 г.

Учёный секретарь

диссертационного совета Д 002.017.02,

д.ф.-м.н., профессор

Рязанов В.В.

## Общая характеристика работы

*Морфологическое сравнение* — сравнение изображений объектов, дающее количественную оценку сходства этих объектов по их форме. Необходимость морфологического сравнения объектов возникает во многих прикладных задачах: в системах компьютерного зрения, при распознавании образов, в компьютерной графике. Примерами таких задач являются: распознавание рукописных символов, жестов руки, позы человека, объектов на аэрофотоснимке местности и т.д. Морфологическое сравнение даёт оценку сходства, на основе которой может решаться задача классификации формы объектов.

Для проведения сравнения форм объектов необходима некоторая мера/метрика, позволяющая оценить сходство этих форм. Она может быть задана как некоторая функция, определённая на так называемых признаках формы (признаковое сравнение). Под признаками формы понимаются различные топологические и метрические характеристики объекта: количество граничных контуров, площадь, периметр, диаметр и т.д. Другой способ задания меры сходства формы основывается на сравнении объектов при их совмещении (беспризнаковое сравнение). Человек, классифицируя формы в повседневной жизни, чаще всего делает это путём её сравнения с некоторой известной ему «эталонной» формой: «здание в форме буквы Н», «грушевидная форма лица», «облако в форме верблюда» и т.д. При этом он неявно «накладывает» эти формы друг на друга и оценивает их сходство. В этом случае сходство форм — это совпадение или их близость при совмещении.

Однако существуют так называемые *гибкие объекты*, форма которых может значительно меняться. Примерами гибких объектов являются фигуры животных и человека. Объектом интереса может быть и часть фигуры человека, например, ладонь. При этом изменения формы гибкого объекта не могут быть абсолютно произвольными, а подчиняются определённым естественным ограничениям. В фигуре животного и человека конечности изгибаются в суставах, но при этом отдельные части фигуры (голень, бедро, плечо и т.д.) сохраняют свою форму. Для сравнения формы гибких объектов признаковое описание оказывается неинформативным, поскольку значения признаков могут сильно варьироваться при изменении формы. Оценка сходства на основе простого совмещения объектов также неприемлема, т.к. части объекта могут занимать различное взаимное положение (рисунок 1а). Однако такое совмещение возможно при определённом изменении положения компонент объекта (рисунок 1б). Таким образом, *оценку сходства изображений гибких объектов* можно было бы выполнить в положении наилучшего совмещения с учётом допустимых трансформаций этих объектов.

Однако существующие модели и методы описания таких объектов переменной формы развиты недостаточно. Традиционные способы представления

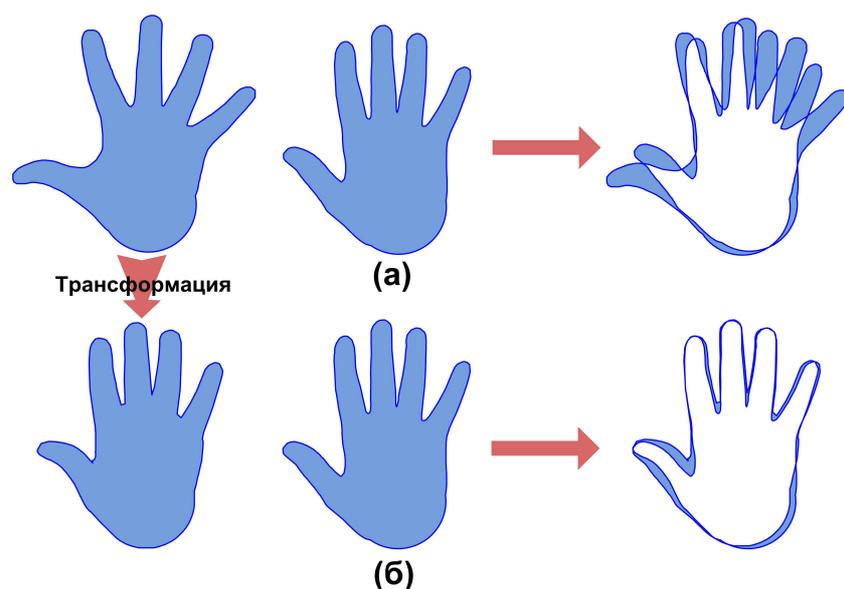


Рис. 1. Сравнение формы гибких объектов — ладоней человека: (а) простое совмещение силуэтов; (б) применение трансформаций к первой ладони и совмещение силуэтов после этого. В последней колонке тёмным цветом выделена симметрическая разность силуэтов ладоней.

формы объектов через задание границы их силуэтов не позволяют корректно описать допустимые трансформации объектов, поскольку в терминах локального изменения границ фигуры невозможно задать требования к сохранению формы её отдельных компонент.

Более адекватным инструментом для описания формы гибких объектов является циркулярное представление<sup>1</sup>. Суть циркулярного представления заключается в построении осевого графа (скелета) формы, с каждой точкой которого связан круг, вписанный в форму (рисунок 2а). Используя это представление, можно преобразовывать форму в некоторое стандартное положение. Этот процесс называется нормализацией. После чего нормализованные фигуры сравниваются непосредственным наложением. Недостатки такого подхода:

1. высокие требования к качеству изображения объекта, которые не всегда легко выполнить на практике (необходимо, чтобы отсутствовали помехи и окклюзии);
2. низкая точность циркулярной аппроксимации объекта (в частности, по одному изображению весьма сложно сформировать описание возможных трансформаций).

<sup>1</sup> Местецкий Л.М. Непрерывная морфология бинарных изображений: фигуры, скелеты, циркуляры. ФИЗМАТЛИТ, 2009. ISBN 978-5-9221-1050-1.

Указанные недостатки существующих методов и практическая востребованность морфологического сравнения гибких объектов обуславливают **актуальность темы** данного исследования.

Таким образом, **целью диссертационной работы** является разработка теоретического аппарата и практических методов моделирования, сравнения и классификации формы гибких объектов.

**Предлагаемый подход к достижению цели:**

1. Формирование эталонной модели гибкого объекта на основе циркулярного представления по нескольким изображениям без окклюзий, что должно обеспечить более высокую точность модели.
2. Сравнение наблюдаемой формы с эталонной моделью на основе подгонки этой модели под рассматриваемую форму. Этот путь позволяет классифицировать форму объектов в изображениях низкого качества, а также допускает наличие окклюзий.

Таким образом, **новизна подхода** состоит в использовании принципа «подгонки эталона под тестовый образец» вместо традиционной подгонки тестового образца под эталоны, представленные в нормализованном виде.

Реализация этого подхода ставит несколько **новых задач**:

1. Построение циркулярной модели гибкого объекта по нескольким эталонным изображениям.
2. Подгонка модели под наблюдаемое изображение (с окклюзиями) с учётом допустимых трансформаций.

**Предлагаемый подход к решению задач** состоит из следующих шагов:

1. Построение циркулярной модели гибкого объекта:
  - а. формирование набора эталонных изображений гибкого объекта без окклюзий;
  - б. описание группы допустимых трансформаций модели и её параметризация;
  - в. идентификация параметров модели на основе эталонных изображений объекта.
2. Сравнение модели и тестовой формы:
  - а. подгонка циркулярной модели под тестовую форму путём применения ряда допустимых деформаций к модели и поиска наилучшего совмещения силуэтов модели и теста;

- б. вычисление меры сходства силуэтов модели и тестовой формы в положении наилучшего совмещения.

На основе полученной меры сходства далее может быть построен метрический классификатор и решаться задача распознавания формы объектов.

**Методы исследований.** В работе использованы методы вычислительной геометрии, вычислительной математики, теории анализа изображений и компьютерной графики.

Для обоснования **достоверности и практической полезности** предлагаемого решения в диссертации рассматривается применение разработанных алгоритмов к решению практической задачи. В качестве прикладной задачи, на которой отрабатывались все шаги предлагаемого метода сравнения форм с окклюзиями, рассматривается задача биометрического распознавания личности по форме ладони. Как показано в диссертации, ладонь человека хорошо описывается предлагаемой моделью. Возможные трансформации ладони при её позиционировании в картинной плоскости видеокамеры описываются группой движений пальцев, что даёт возможность для построения достаточно простой и корректной математической модели. Для этой модели все элементы предлагаемого подхода доведены до рабочих алгоритмов и программной реализации.

**На защиту выносятся следующие основные результаты и положения :**

1. Модель гибкого объекта и метод идентификации её параметров (разметки) по серии бинарных изображений объекта в разных положениях.
2. Метод сравнения формы гибких объектов, основанный на подгонке размеченной эталонной модели под тестовое изображение.
3. Метод идентификации модели ладони по серии изображений.
4. Метод биометрической идентификации личности по форме ладони.

**Апробация работы.** Результаты работы докладывались на следующих конференциях:

- 7-ая международная научная конференция «Интеллектуализация обработки информации» ИОИ'08 (Алушта, 2008) [1];
- XVI международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «ЛОМОНОСОВ-2009» (Москва, 2009) [2];
- всероссийская конференция «Математические методы распознавания образов» ММРО-14 (Суздаль, 2009) [3];

- 19-ая международная конференция по компьютерной графике и зрению «ГрафиКон'09» (Москва, 2009) [4];
- 8-ая международная научная конференция «Интеллектуализация обработки информации» ИОИ'10 (Пафос, 2010) [5];
- международная конференция по теории и приложениям компьютерного зрения "VISAPP—2011" (Португалия, 2011) [6];
- 2-ая научно-техническая конференция «Техническое зрение в системах управления» TVCS'2011 (Москва, 2011) [7];
- международная конференция по анализу и распознаванию изображений "ICIAR—2011" (Канада, 2011) [8];
- всероссийская конференция «Математические методы распознавания образов» ММРО-15 (Петрозаводск, 2011) [9].

Материалы диссертации использованы в работах по грантам РФФИ №№ 08-01-00670, 08-07-00305, 08-07-00270, 10-07-00609, 11-01-00783 и 11-07-00462.

**Публикации.** Материалы диссертации опубликованы в 11 печатных работах, из них 2 статьи в рецензируемых журналах [10, 11], 7 статей в сборниках трудов конференций [1, 3–6, 8, 9] и 2 тезиса докладов [2, 7]. В изданиях, рекомендованных ВАК РФ, опубликовано 2 статьи [8, 11].

**Структура и объём диссертации.** Диссертация общим объёмом 130 страниц состоит из введения, 4 глав, заключения и списка литературы из 73 наименований. В работе содержится 41 рисунок и 1 таблица.

## Содержание работы

Во **введении** содержится общая характеристика работы, обоснование актуальности темы исследования, цели и задачи диссертационного исследования, аргументирована научная новизна исследований, показана практическая значимость полученных результатов, представлены выносимые на защиту научные положения.

В **первой главе** приводится общая постановка задачи сравнения формы гибких объектов и обзор существующих методов её решения. Рассматриваются их достоинства и недостатки, показывается невозможность их прямого применения для распознавания формы объектов с окклюзиями. В качестве практического приложения методов сравнения формы гибких объектов рассматривается задача распознавания личности по форме ладони. Приводится обзор известных методов её решения. По результатам анализа формулируется постановка задач исследования:

1. Задача сравнения формы гибких объектов с окклюзиями. Дано множество бинарных изображений  $n$  гибких объектов:  $I_1^r, I_2^r, \dots, I_N^r$ . Для  $i$ -ого объекта имеется  $k_i$  его изображений без окклюзий:  $\sum_{i=1}^n k_i = N$ . Объект представлен чёрными пикселями на белом фоне, на каждом изображении присутствует только один объект, силуэты объекта на его изображениях различны. *Необходимо* разработать метод сравнения формы гибких объектов, допускающий присутствие окклюзий на тестовых изображениях.
2. Задача сравнения формы ладоней. Имеется база эталонных изображений ладоней  $n$  человек:  $I_1^r, I_2^r, \dots, I_N^r$ . Для  $i$ -ого человека имеется  $k_i$  изображений его ладони:  $\sum_{i=1}^n k_i = N$ . На всех изображениях пальцы хорошо отделены друг от друга и могут быть легко сегментированы. Также имеется набор  $m$  тестовых изображений, возможно, с частично соприкасающимися пальцами:  $I_1^t, I_2^t, \dots, I_m^t$ . *Необходимо* разработать метод сравнения эталонных и тестовых изображений ладоней.

**Вторая глава** содержит описание предлагаемого решения задачи сравнения формы гибких объектов с окклюзиями. В главе рассматриваются: 1) модель гибкого объекта; 2) методы построения силуэта модели; 3) метод идентификации параметров модели; 4) метод сравнения модели и произвольного силуэта объекта.

В разделе 2.1 определяется модель  $G$  гибкого объекта. Пусть  $T$  — связный планарный граф евклидовой плоскости  $\mathbb{R}^2$ . С каждой точкой  $t \in T$  графа  $T$  связан некоторый круг  $c_t$  с центром в этой точке. Семейство кругов  $C = \{c_t, t \in T\}$  называется *циркулярным графом*. Граф  $T$  называется *осевым графом (скелетом)* циркулярного графа. Объединение  $S = \bigcup_{t \in T} c_t$  всех кругов

семейства  $C$ , как точечных множеств, называется *силуэтом* циркулярного графа (рисунок 2а).  $\mathcal{S}(\cdot)$  — оператор, ставящий в соответствие гибкому объекту  $G$  его силуэт:  $\mathcal{S}(G)$  — силуэт  $G$ . Множество допустимых преобразований  $V$  циркулярного графа, обладающее свойством сохранения односвязности силуэта циркулярного графа и образующее группу, называется *деформациями*.

*Циркулярной моделью гибкого объекта* называется циркулярный граф и его группа деформаций:  $G = (C, V)$ .

В разделе 2.2 показывается, что силуэт гибкого объекта, являющийся объединением бесконечного числа кругов, может быть представлен как объединение конечного числа бициклов. Пусть имеются два круга  $O_1$  и  $O_2$  на плоскости, к ним проведены две внешние касательные так, что центры кругов находятся по одну сторону от каждой них:  $A_1A_3$  и  $A_2A_4$ , где  $A_1, A_2 \in O_1$ , а  $A_3, A_4 \in O_2$  (рисунок 2б). Фигура, ограниченная отрезками касательных

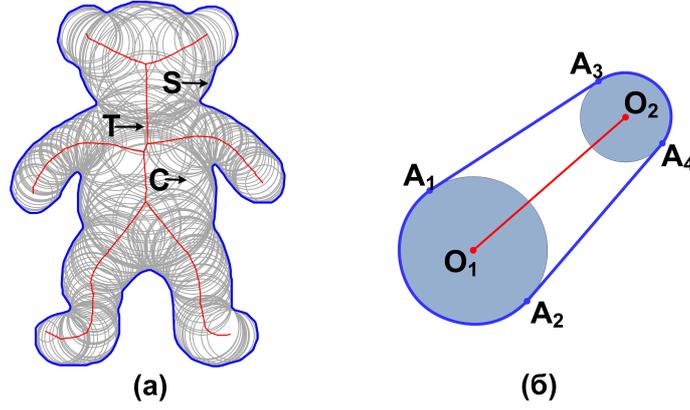


Рис. 2. (а) Циркулярное представление формы объекта; (б) бицикл.

$A_1A_3$ ,  $A_2A_4$  и двумя дугами окружностей  $\smile A_3A_4$ ,  $\smile A_2A_1$ , называется *бициклом*. Тогда задача построения силуэта модели есть задача построения объединения конечного числа бициклов.

В работе предложено два метода построения силуэта модели:

1. Алгоритм парных пересечений. Позволяет строить силуэт произвольного гибкого объекта. Основан на поиске всех точек пересечений бициклов с последующим прослеживанием внешней огибающей бициклов. Временная сложность алгоритма  $O(n_b^2)$ , где  $n_b$  — число бициклов.
2. Восстановление силуэта модели по силуэтам компонент постоянной формы. Предназначен для построения силуэтов гибких объектов, представимых в виде объединения конечного числа компонент, форма которых при трансформациях не меняется. Каждая компонента аппроксимируется простым многоугольником, после чего задача сводится к построению объединения фиксированного числа многоугольников. Алгоритм имеет сложность  $O((n_b + n_0) \log n_b)$  в худшем случае и  $O(n_b + n_0)$  в среднем, где  $n_0$  — общее число точек пересечения границ компонент.

**В разделе 2.3** рассматривается метод идентификации параметров модели, который формулируется в терминах оптимизационной задачи. Пусть имеется несколько моделей одного гибкого объекта:  $G_1, \dots, G_n$ ,  $G_i = G_i(\vec{p})$ , где  $\vec{p}$  — неизвестный вектор параметров этих моделей (одинаковый для всех моделей),  $n_p$  — размер вектора параметров  $\vec{p}$ , а  $P \subseteq \mathbb{R}^{n_p}$  — допустимое множество значений  $\vec{p}$ . Пусть  $\mu^* = \mu^*(G, S)$  — мера, задающая сходство гибкого объекта  $G$  и некоторой формы  $S$ . Вводится интегральная мера сходства всех моделей одного гибкого объекта как  $\mu_{av} : \mathbb{R}^{n_p} \rightarrow \mathbb{R}_+$ :

$$\mu_{av}(\vec{p}) = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{\substack{i,j=1,\dots,n \\ i \neq j}} \mu^*(G_i(\vec{p}), S(G_j(\vec{p}))) \quad (1)$$

Неизвестный вектор параметров модели есть решение оптимизационной задачи:

$$\vec{p}^* : \mu_{av}(\vec{p}^*) = \min_{\vec{p} \in P} \mu_{av}(\vec{p}) \quad (2)$$

**В разделе 2.4** предлагается алгоритм сравнения модели  $G$  и произвольной формы  $S$ , основанный на подгонке размеченной модели под эту форму. По определению  $G = (C, V)$ , где  $V$  — множество допустимых деформаций модели. Пусть  $\vec{a}$  — набор параметров деформаций, а  $A$  — множество допустимых значений  $\vec{a}$ . Тогда  $v(\vec{a}) \in V$  есть трансформация, однозначно определяемая вектором параметров  $\vec{a}$ . Обозначим через  $v(G, \vec{a})$  объект, получаемый в результате применения деформации  $v(\vec{a})$  к гибкому объекту  $G$ , а через  $\mathcal{S}(v(G, \vec{a}))$  — его силуэт. Пусть  $\mu$  есть некоторая мера, позволяющая определить сходство силуэтов двух произвольных объектов.

Тогда деформация, реализующая наилучшее совмещение силуэтов эталона  $G$  и теста  $S$ , может быть найдена как решение оптимизационной задачи:

$$\vec{a}^* : \mu(\mathcal{S}(v(G, \vec{a}^*)), S) = \min_{\vec{a} \in A} \mu(\mathcal{S}(v(G, \vec{a})), S) \quad (3)$$

А мера сходства модели и формы определяется как:

$$\mu^*(G, S) = \min_{\vec{a} \in A} \mu(\mathcal{S}(v(G, \vec{a})), S) \quad (4)$$

**В разделе 2.5** на основе предложенной модели гибкого объекта и метода её подгонки под произвольную форму при сравнении формулируется алгоритм решения прикладных задач, общая постановка которых имеет вид: *Дано  $n$  бинарных изображений гибкого объекта  $\mathcal{F}$  в разных положениях:  $I_1, \dots, I_n$ , а также силуэт  $S$ . Необходимо определить меру сходства гибкого объекта  $\mathcal{F}$  и силуэта  $S$ .*

Предлагаемый алгоритм (обычным шрифтом выделены общие элементы подхода, а курсивом отмечены те, которые должны быть определены для конкретной решаемой задачи):

1. Построение моделей гибкого объекта по изображениям  $I_1, \dots, I_n$ . Необходимо:
  - а. Построить циркулярный граф  $C_i$  по исходному изображению  $I_i$ . В результате будем иметь  $n$  неразмеченных моделей гибкого объекта  $\mathcal{F}$ :  $G_1, \dots, G_n$ .
  - б. *Определить (вербально) допустимые преобразования модели. На основе этого определить способ параметризации модели, т.е. указать вектор параметров  $\vec{p}$  и множество его допустимых значений  $P$ .*

- в. Сформировать интегральную меру сходства  $\mu_{av}(\vec{p})$  для моделей  $G_1, \dots, G_n$  по формуле (1) и поставить задачу минимизации (2) для поиска оптимального вектора параметров  $\vec{p}^*$ .
- г. Решить оптимизационную задачу из предыдущего пункта, выбрав наиболее подходящий метод минимизации. В результате будем иметь  $n$  размеченных моделей гибкого объекта.

2. Сравнение модели  $G_i$  и силуэта  $S$ . Необходимо:

- а. Выбрать меру  $\mu$  для определения сходства пары совмещённых силуэтов и метод её вычисления.
- б. Ввести способ параметризации деформаций модели, т.е. указать вектор параметров  $\vec{a}$  и множество его допустимых значений  $A$ . Также необходимо указать способ построения объекта, получающегося в результате применения деформации, задаваемой вектором параметров  $\vec{a}$  к модели  $G_i$ , т.е.  $v(G_i, \vec{a})$ .
- в. Поставить задачу определения сходства модели гибкого объекта  $G_i$  и силуэта  $S$  как задачу поиска наилучшего совмещения силуэтов деформированной модели  $G_i$  и представленного силуэта  $S$  по формуле 3).
- г. Решить оптимизационную задачу из предыдущего пункта, выбрав наиболее подходящий метод минимизации.
- д. Численная оценка сходства модели и силуэта будет иметь вид (4).

3. Определение сходства гибкого объекта  $\mathcal{F}$  и представленного силуэта  $S$ . Необходимо:

- а. Сформировать оценку сходства гибкого объекта  $\mathcal{F}$  и силуэта  $S$  на основе имеющихся  $n$  оценок сходства этого силуэта и каждой из моделей  $G_1, \dots, G_n$ .

**В третьей главе** рассматривается полномасштабная реализация предложенного подхода к решению прикладной задачи — биометрической идентификации личности по форме ладони.

**В разделе 3.1** содержится описание циркулярной модели ладони человека. Модель ладони представима в виде объединения шести компонент фиксированной формы: пяти пальцев и пясти (рисунок 3б). Допустимые деформации ладони: сдвиг ладони, поворот ладони, поворот пальцев ладони. С точки зрения циркулярного графа это есть: сдвиг циркулярного графа, поворот циркулярного графа и поворот его ветвей. Модель ладони параметризуется следующим вектором:  $\vec{p} = (\{S_i, O_i\})_{i=1}^5$ , где  $S_i$  — основание  $i$ -ого

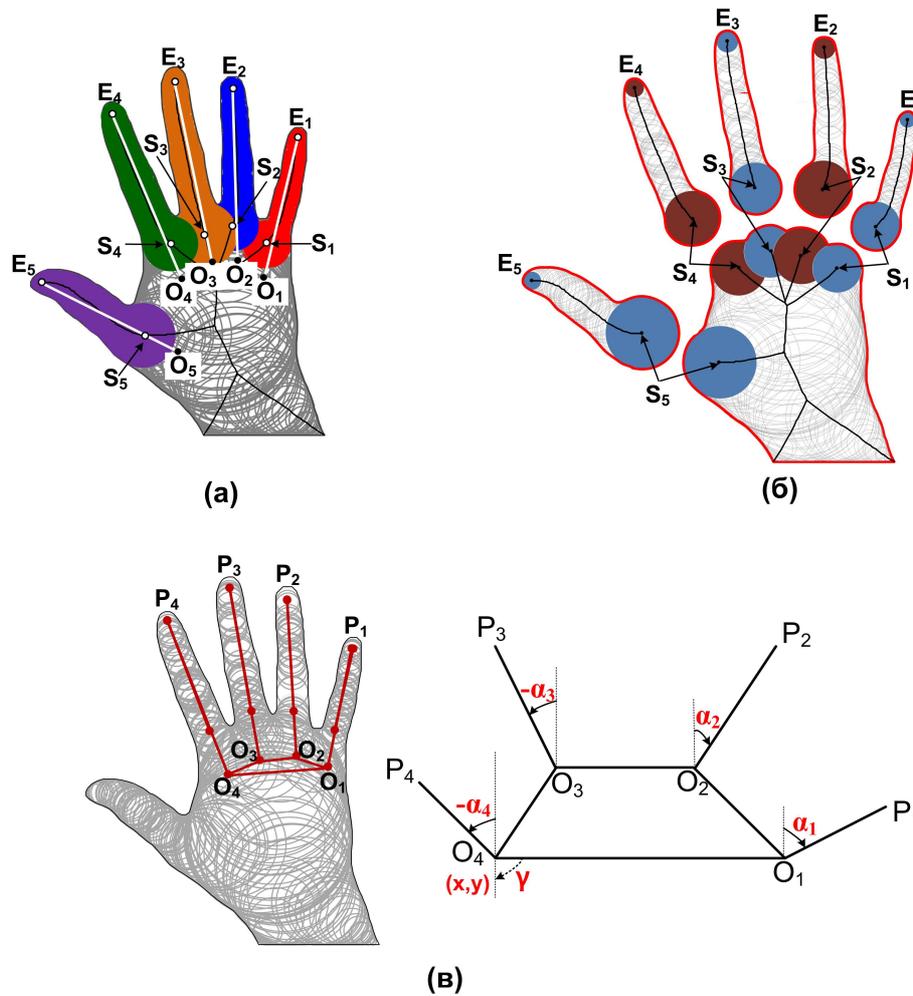


Рис. 3. (а) Циркулярное представление изображения ладони; (б) разложение на компоненты постоянной формы; (в) параметризация деформаций модели.

пальца,  $O_i$  — его точка поворота (рисунок 3а). Считается, что часть ветви циркулярного графа из вершины  $S_i$  до терминальной вершины  $E_i$  этой ветви образует палец.

Силуэт модели ладони после деформации восстанавливается по силуэтам её компонент алгоритмом, описанным в предыдущей главе.

**В разделе 3.2** предлагается метод определения точек поворотов пальцев по серии снимков ладони в разных положениях.

Пять самых длинных ветвей циркулярного графа ладони определяют пять пальцев. Положение кончиков  $P_i$  и оснований пальцев  $R_i$ , как вершин осевого графа, ищется на основе локальных ограничений на радиус кругов в этих вершинах и на угол между двумя отрезками, соединяющими центр круга с точками касания круга и границы ладони (рисунок 4а).  $P_iR_i$  — ось пальца. В работе исследована возможность решения задачи идентификации по четырём пальцам (большой палец исключается из рассмотрения).

Предполагается, что точка поворота пальца  $O_i$  находится на его оси  $P_iR_i$ .

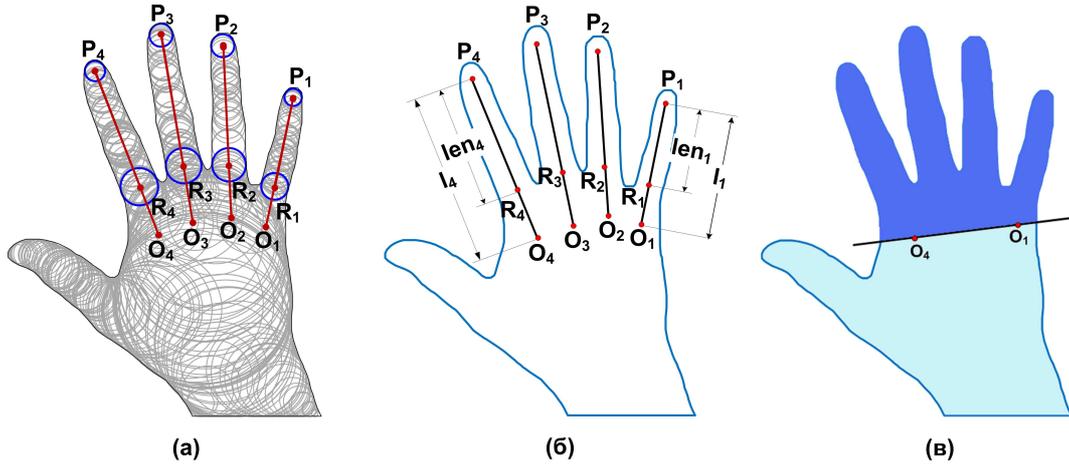


Рис. 4. (а) Поиск кончиков и оснований пальцев; (б) поиск точек поворотов и (в) выделение области ладони для сравнения.

В качестве точки  $S_i$  рассматривается вершина осевого графа, ближайшая к точке  $O_i$ . В результате возможен переход от вектора параметров модели  $\vec{p}$  к вектору параметров  $\vec{l} = (l_1, l_2, l_3, l_4)$ , где  $l_i = |P_i O_i|$  (рисунок 4б). Пусть  $len_i = |P_i R_i|$  — длина  $i$ -ого пальца ладони.

Для определения точек поворотов пальцев предлагается два метода:

1. Экспертное назначение (по одному изображению ладони).
2. Оптимизационный подход (по серии снимков ладони).

В экспертном методе в качестве точки поворота пальца назначается точка на оси пальца, отстоящая от его основания на  $k\%$  его длины, где  $k$  — параметр метода:

$$l_i = \left(1 + \frac{k}{100}\right) \cdot len_i \quad (5)$$

В оптимизационном подходе вектор параметров  $\vec{l}$  является решением задачи (2), сформулированной для модели ладони. Пусть задана функция  $\mu^* = \mu^*(G_1, G_2)$ , определяющая степень сходства моделей ладоней  $G_1$  и  $G_2$ .

Интегральная мера сходства  $n$  ладоней согласно (1) есть:

$$\mu_{av}(\vec{l}) = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{\substack{i,j=1,\dots,n \\ i \neq j}} \mu^*(G_i(\vec{l}), G_j(\vec{l})) \quad (6)$$

Тогда оптимизационная задача (2) для  $\mu_{av} : \mathbb{R}^4 \rightarrow \mathbb{R}_+$  имеет вид:

$$\vec{l}^* : \mu_{av}(\vec{l}^*) = \min_{\vec{l} \in L} \mu_{av}(\vec{l}) \quad (7)$$

где  $L \subseteq \mathbb{R}^4$  задаёт допустимое множество для  $\vec{l}$ . Экспериментально показано, что оно может быть ограничено пространственным параллелепипедом:  $L = \{l_i \in [1.2 len_i, 1.5 len_i] | i = 1, \dots, 4\}$ .

Таким образом, имеем задачу минимизации функции четырёх переменных. Функция  $\mu_{av}$  неотрицательна и конечна, дифференцируемость и гладкость не гарантированы. Функция в общем случае является многоэкстремальной.

В диссертации задача (7) была решена двумя способами — полным перебором по дискретной сетке, а также методом Нелдера-Мида<sup>2</sup>. Начальный 4-симплекс для метода Нелдера-Мида содержал следующие 5 пространственных точек:  $\vec{l}^1, \vec{l}^2, \vec{l}^3, \vec{l}^4, \vec{l}^5$ , где:

$$\vec{l}^i = (k_1^i \cdot len_1, k_2^i \cdot len_2, k_3^i \cdot len_3, k_4^i \cdot len_4) \quad (8)$$

$$k_j^i = \begin{cases} 1.45, & \text{если } i = j; \\ 1.35, & \text{если } i \neq j. \end{cases} \quad (9)$$

Параметры метода: коэффициент отражения  $\alpha = 1$ , коэффициент сжатия  $\beta = 0.5$  и коэффициент растяжения  $\gamma = 2$ .

**В разделе 3.3** предлагается метод сравнения модели ладони и некоторого тестового изображения (возможно, с окклюзиями). Вводится параметризация трансформаций модели:  $\vec{a} = (\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, x, y, \gamma)$ , где  $(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4)$  — набор углов между осями пальцев и вертикальной осью ординат,  $(x, y)$  — координаты точки  $O_1$  в глобальной системе координат,  $\gamma$  — угол между прямой  $O_1O_4$  и осью ординат (рисунок 3в). Для тестовой формы всегда можно построить циркулярное представление, однако его параметры могут быть не определены (в случае окклюзий).

Основные шаги при сравнении модели и формы:

1. Начальная укладка модели.
2. Подгонка модели под тестовую форму.

Начальная укладка модели включает в себя следующие шаги:

1. совмещение кончиков средних пальцев;
2. совмещение осей средних пальцев;
3. исключение области большого пальца;
4. исключение области запястья.

---

<sup>2</sup> Nash J.C. Compact Numerical Methods for Computers: Linear Algebra and Function Minimisation // International Series on Biometrics. Adam Hilger, 1990.

Последние два пункта выполняются путём рассмотрения области ладони, лежащей выше прямой  $O_1O_4$  (рисунок 4в).

Мера сходства двух нетрансформированных ладоней  $G_1$  и  $G_2$  вводится как:

$$\mu(G_1, G_2) = \frac{\text{Area}(\mathcal{S}(G_1) \setminus \mathcal{S}(G_2)) + \text{Area}(\mathcal{S}(G_2) \setminus \mathcal{S}(G_1))}{\text{Area}(\mathcal{S}(G_1) \cup \mathcal{S}(G_2))} \quad (10)$$

Согласно (4) мера  $\mu^*$  выглядит следующим образом:

$$\mu^*(G_1, G_2) = \min_{\vec{a} \in A} \mu(\mathcal{S}(v(G_1, \vec{a})), G_2) = \mu(v(G_1, \vec{a}^*), G_2) \quad (11)$$

В силу способа укладки ладони однозначно определяются три компоненты вектора параметров — это координаты точки  $O_1 = (x, y)$  и угол  $\gamma$ . Таким образом, вектор параметризации  $\vec{a}$  существенно зависит от четырёх величин  $\vec{a} = (\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4)$ . Вычислим значения этих углов по тестовой модели и обозначим их через  $\alpha_1^t, \alpha_2^t, \alpha_3^t$  и  $\alpha_4^t$ . Тогда допустимое множество  $A$ :

$$A = \{\alpha_i \in [\alpha_i^t - \Delta\alpha_i, \alpha_i^t + \Delta\alpha_i] | i = 1, \dots, 4\} \quad (12)$$

Проведённые эксперименты показали, что значения  $\Delta\alpha_i = 5^\circ$  вполне достаточно для получения хорошего совмещения силуэтов сравниваемых ладоней.

Процесс вычисления  $\mu^*$  — процесс подгонки одного гибкого объекта под другой, т.е. подгонка эталонной ладони под тестовую. Предлагаемый метод подгонки включает в себя два основных шага:

- построение начального приближения;
- поиск локального минимума.

Обозначим через  $\vec{a}^0 = (\alpha_1^0, \alpha_2^0, \alpha_3^0, \alpha_4^0)$  начальное приближение для вектора параметров  $\vec{a}$ . Тогда:

$$\alpha_i^0 = \alpha_i^t, i = 1, \dots, 4 \quad (13)$$

В силу начальной укладки гибкого объекта  $\alpha_3^t = 0$ .

Поиск локального минимума функции  $\mu$  проводился в работе двумя способами — полным перебором по дискретной сетке и методом Нелдера-Мида. Метод Нелдера-Мида запускался с начальным 4-симплексом, содержащим 5 точек из  $A$ :  $\vec{a}^1, \vec{a}^2, \vec{a}^3, \vec{a}^4, \vec{a}^5$ , где:

$$\vec{a}^i = (\alpha_1^t + k_1^i \cdot \Delta\alpha_1, \alpha_2^t + k_2^i \cdot \Delta\alpha_2, \alpha_3^t + k_3^i \cdot \Delta\alpha_3, \alpha_4^t + k_4^i \cdot \Delta\alpha_4) \quad (14)$$

$$k_j^i = \begin{cases} 1, & \text{если } i = j; \\ -1, & \text{если } i \neq j. \end{cases} \quad (15)$$

Параметры метода: коэффициент отражения  $\alpha = 1$ , коэффициент сжатия  $\beta = 0.5$  и коэффициент растяжения  $\gamma = 2$ .

В четвёртой главе описывается экспериментальная установка и комплекс программ, реализующий предложенный подход к распознаванию личности по форме ладони и демонстрирующий применимость предложенного подхода сравнения формы ладоней и адекватность получаемых результатов. Приводятся результаты проведённых экспериментов на реальных данных по разметке ладони, верификации и идентификации личности.

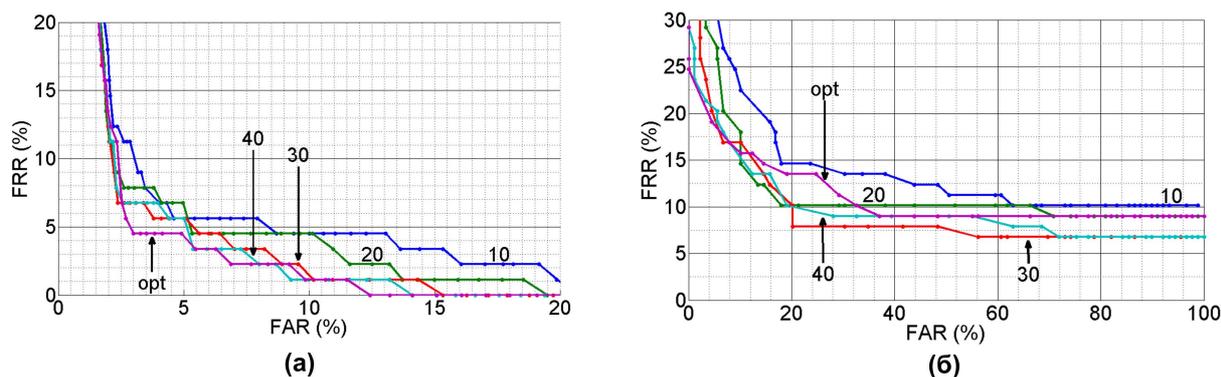


Рис. 5. Сравнение результатов (а) верификации и (б) идентификации при экспертном назначении точек поворотов пальцев и в оптимизационном подходе. Четыре кривые — назначение точек с параметром  $k$  равным соответственно 10, 20, 30 и 40; пятая кривая (с меткой "opt") — оптимизационный подход при полном переборе значений  $\vec{l}$  по дискретной сетке.

На рисунке 5 представлено качество распознавания при различных способах разметки модели ладони. В случае верификации определение точек поворотов пальцев по серии снимков ладони в разных положениях показывает явное преимущество по сравнению с экспертным методом. Полученное значение  $ERR$  составляет для него 4.5%. Однако в случае идентификации, когда тестовая ладонь сравнивается с ладонями всех пользователей, а не одного человека, как при верификации, рассматриваемые подходы ведут себя примерно одинаково.  $ERR$  составляет примерно 15% для оптимизационного подхода и 13% в случае  $k = 30$ .

На рисунке 6 представлены полученные результаты по верификации и идентификации личности в случае изображений ладоней при наличии окклюзий и без них. Как видно из графика по верификации личности, ладони с частично соприкасающимися пальцами распознаются практически также, как и ладони с хорошо разделёнными пальцами:  $ERR$  составляет примерно 3.5%. В случае идентификации полученное значение  $ERR$  для ладоней с хорошо разделёнными пальцами составляет 11% против 14.5% для ладоней с частично соприкасающимися пальцами.

Однако формы ладони недостаточно для проведения надёжной иденти-

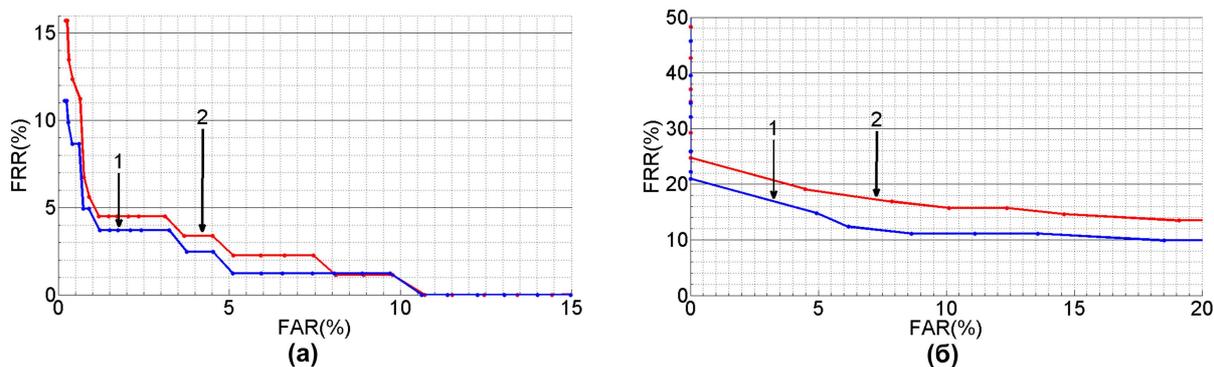


Рис. 6. Результаты (а) верификации и (б) идентификации. Кривая с меткой "1" — результат распознавания ладоней без частично соприкасающихся пальцев, кривая с меткой "2" — с частично соприкасающимися пальцами.

фикации. На практике форма ладони обычно комбинируется с другими биометрическими характеристиками человека в рамках многомодальных систем. В диссертации предлагается двумодальная система идентификации личности по форме ладони и голосовому паролю, где голос является фильтром заведомо непохожих персон. Приводятся результаты вычислительных экспериментов, показывающих явное преимущество использования нескольких биометрических характеристик с точки зрения качества распознавания.

**В заключении** сформулированы основные результаты работы.

## Список публикаций по теме диссертации

- [1] *Бакина И. Г., Местецкий Л. М.* Многомодальная идентификация личности по форме ладони и голосу // *Таврический Вестник Информатики и Математики*. — 2008. — Т. 1. — С. 59–65.
- [2] *Бакина И. Г.* Генерация признаков при наличии артефактов для задачи распознавания личности по форме ладони // Сборник тезисов XVI Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «ЛОМОНОСОВ-2009». — М.: МАКС Пресс, 2009. — С. 14.
- [3] *Бакина И. Г., Местецкий Л. М.* Метод сравнения ладоней при наличии артефактов // Доклады 14-ой Всероссийской конференции «Математические методы распознавания образов» ММРО-14. — М.: МАКС Пресс, 2009. — С. 301–304.
- [4] *Бакина И. Г., Цицкардзе А. К., Местецкий Л. М.* Метод активного скелета в задаче распознавания формы изображений // Доклады 19-ой

Международной конференция по компьютерной графике и зрению «ГрафиКон'2009». — Москва, МГУ: 2009. — С. 279–282.

- [5] *Бакина И. Г.* Идентификация личности по форме ладони и голосу // Доклады 8-ой международной конференции «Интеллектуализация обработки информации» ИОИ-2010. — М.: МАКС Пресс, 2010. — С. 438–441.
- [6] *Bakina I.* Palm shape comparison for person recognition // Proceedings of the International Conference on Computer Vision Theory and Applications, "VISAPP 2011". — Vilamoura, Algarve—Portugal: 2011. — Pp. 5–11.
- [7] *Бакина И. Г.* Определение точек поворотов пальцев при создании шаблона ладони // Тезисы докладов научно-технической конференции «Техническое зрение в системах управления» TVCS'2011. — Москва, ИКИ РАН: 2011. — Pp. 72–74.
- [8] *Mestetskiy L., Bakina I., Kurakin A.* Hand geometry analysis by continuous skeletons // **Lecture Notes in Computer Science: Image Analysis and Recognition, Part II.** — Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011. — Vol. 6754. — Pp. 279–282.
- [9] *Бакина И. Г.* Идентификация модели ладони по серии её снимков в разных положениях // Доклады 15-ой Всероссийской конференции «Математические методы распознавания образов» ММРО-15. — М.: МАКС Пресс, 2011. — С. 424–427.
- [10] *Бакина И. Г.* Генерация признаков для сравнения ладоней при наличии артефактов // *Научно-практический журнал «Прикладная информатика».* — 2009. — № 4(22). — С. 68–75.
- [11] *Бакина И. Г.* Моделирование ладони гибким объектом при биометрической идентификации // **Вестник Тверского государственного университета. Серия: Прикладная математика.** — 2011. — № 21. — С. 75–89.