

**Каменская Екатерина Ивановна**

**АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ И ПРЕДСТАВЛЕНИЯ  
ИЗОБРАЖЕНИЙ ЛИЦ В ПРОСТРАНСТВЕ  
КАНОНИЧЕСКИХ ПЕРЕМЕННЫХ**

Специальность 05.13.18: Математическое моделирование,  
численные методы и комплексы программ

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Научный руководитель –  
доктор технических наук, профессор Кухарев Георгий Александрович

Официальные оппоненты:  
доктор технических наук, главный научный сотрудник Дорогов Александр Юрьевич  
кандидат технических наук, доцент Макулов Василий Борисович

Ведущая организация – Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого»

Защита диссертации состоится “ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2010 г. в \_\_\_\_\_ часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д212.238.01 Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» имени В. И. Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, Санкт-Петербург, ул. проф. Попова, 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Автореферат разослан “ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2010 г.

Ученый секретарь совета  
по защите докторских  
и кандидатских диссертаций, к.т.н.

Щеголева Надежда Львовна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** В настоящее время активно развивается область информатики, связанная с биометрическими технологиями распознавания людей. Особенно привлекательны технологии, основанные на геометрии лица, на практике связанные с обработкой изображений лиц. Эти технологии развиваются в трех основных направлениях: аутентификация и идентификация людей; распознавание эмоционального состояния людей; распознавание текущего психофизического состояния людей.

Анализ этих направлений показал, что их развитие тормозит отсутствие методов, алгоритмов и программ, а также необходимых методик выявления и использования связей между характеристиками исходных данных (изображений лиц) и соответствующими характеристикам человека. Указанные связи можно раскрыть в рамках канонического корреляционного анализа (Canonical Correlation Analysis – CCA). В рамках CCA информация переводится из исходного пространства признаков в пространство канонических переменных (ПКП), в котором осуществляются все дальнейшие операции. Признаки в ПКП связываются между собой устойчивой корреляцией, что обеспечивает возможность выявления, изучения и использования связей между ними.

Метод CCA был впервые представлен Хотеллингом в 1930-х годах (журналы *Journal of Educational Psychology* и *Biometry*) и описывал соотношение между двумя наборами векторных данных. В цифровой обработке изображений (ЦОИ) методология применения CCA также основана на векторном представлении исходных изображений. На практике это приводило к необходимости введения операций предобработки изображений - уменьшения их размеров и/или их трансформации в вектор с последующим использованием базовых процедур CCA. Сложность и объем вычислений в CCA привели к тому, что первые публикации по методам двумерного CCA в приложении к ЦОИ появились лишь в конце 2007 года. Описанные в этих публикациях методы также содержат вышеуказанные операции предобработки, что усложняет сам процесс обработки изображений, снижает точность и быстродействие предложенных алгоритмов. При этом в доступных публикациях отсутствует детальное представление реализованных алгоритмов, не рассмотрены методические разработки по структуре и способам функционирования элементов соответствующих систем распознавания, а также не представлено точное описание выполненных экспериментов, что препятствует их повторению и, как следствие, использованию результатов из этих публикаций.

Мощный скачок в развитии компьютерных технологий (увеличение памяти и быстродействия компьютеров, широкое применение пакетов программ по ЦОИ, применение математического моделирования) создали новые возможности для исследования и развития методов CCA, а также предпосылки для их применения в задачах обработки многомерных данных – совокупностей изображений.

В этих условиях разработка новых подходов к реализации CCA, создание

соответствующих алгоритмов, отдельных программ и программных комплексов, а также необходимых моделей и методик, развивающих применение ССА в задачах обработки многомерных данных, являются актуальными задачами.

**Целью данной работы** является исследование и разработка алгоритмов двумерного канонического корреляционного анализа в приложении к обработке изображений лиц и их представлению в ПКП.

Для достижения поставленной цели решались **следующие задачи**:

- разработка и исследование алгоритмов двумерного ССА (2D ССА) применительно к задачам обработки изображений лиц;
- исследование алгоритмов представления и сравнения изображений лиц в ПКП;
- разработка структур систем распознавания в условиях известной и неизвестной принадлежности тестовых изображений к исходным категориям данных;
- разработка компактной формы записи компьютерного эксперимента (модели), отражающей характеристики моделируемых систем распознавания;
- разработка комплекса программ для организации вычислительных экспериментов и исследования задач обработки изображений с использованием алгоритмов 2D ССА;
- проведение экспериментальной апробации разработанных алгоритмов на примерах задач распознавания изображений лиц.

**Объектом исследований** является метод 2D ССА в приложении к обработке цифровых изображений.

**Предметом исследований** являются алгоритмы обработки изображений лиц в пространстве канонических переменных и их программная реализация.

**Методы исследования.** Исследования базируются на методах цифровой обработки изображений и методах распознавания образов, аппарате матричной алгебры и численных методах линейной алгебры.

**Методология исследований** включает:

- аналитический обзор и анализ литературы, посвященной ССА в приложении к задачам распознавания изображений лиц, и ее систематизацию;
- математический аппарат ССА в матричной форме и в приложении к задачам обработки изображений как двумерных объектов;
- формальную запись моделей выполненных компьютерных экспериментов, анализ результатов экспериментов и выводы из них;
- выводы, рекомендации и предложения по применению аппарата ССА к задачам обработки изображений.

**Новые научные результаты**

1. Разработаны параллельный и каскадный алгоритмы 2D ССА, не требующие предварительной процедуры уменьшения размеров исходных изображений, прямо реализуемые по двум направлениям координат (строкам и столбцам) исходных изображений и применимые в условиях «малой выборки». Алгоритмы 2D ССА обеспечивают вычисление матриц проекций для реализации двумерных преобразований и трансформации исходных изображений в ПКП.

2. Определены два типа базовых систем, предназначенных для распознавания тестовых изображений при известной и неизвестной их принадлежности к заданным категориям исходных данных.

3. Разработан способ представления компьютерного эксперимента в виде мнемонической модели, отражающей основные параметры моделируемой системы распознавания: базу изображений, структуру исходных и промежуточных данных, метод экстракции признаков, тип системы, классификатор и ранг оценки результата.

4. Программно реализованы алгоритмы 2D ССА и разработана структура комплекса программ, предназначенного для моделирования и исследования систем распознавания изображений лиц в пространстве канонических переменных.

### **Практическая ценность**

1. Комплекс программ, разработанный на основе алгоритмов 2D ССА и двух типов структур систем распознавания, позволяет проводить вычислительные эксперименты по обработке изображений в различных прикладных задачах. Примеры решения некоторых задач приведены в диссертации и могут служить прототипами для решения других аналогичных задач.

2. Предложенная в диссертации методология описания компьютерных экспериментов в форме модели позволяет наглядно, компактно и в то же время точно представить поставленный эксперимент. Такую модель рекомендуется применять также для сравнения различных решений моделируемых систем между собой. Все выполненные в рамках диссертации компьютерные эксперименты представлены соответствующими моделями, что дает возможность точно повторить выполненный эксперимент.

### **Научные положения, выносимые на защиту**

1. Параллельный и каскадный алгоритмы 2D ССА, обладающие простотой реализации и применимые в условиях «малой выборки».

2. Два типа структур систем распознавания изображений в ПКП, используемые при известной и неизвестной принадлежности тестовых изображений к категориям исходных данных.

3. Способ описания компьютерных экспериментов в форме мнемонической модели.

4. Комплекс программ для проведения компьютерных экспериментов по обработке изображений в ПКП, основными компонентами которого являются блоки, реализующие алгоритмы 2D ССА.

**Внедрение результатов работы.** Теоретические положения, алгоритмы двумерного канонического корреляционного анализа, исследовательский комплекс программ использованы в НИР и ОКР, выполняемых открытым акционерным обществом «Научно-инженерный центр Санкт-Петербургского электротехнического университета». Результаты диссертационной работы использованы в учебных дисциплинах «Компьютерные методы идентификации личности» и «Цифровая обработка сигналов» кафедры математического обеспечения ЭВМ Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета.

**Апробация работы.** Результаты диссертации обсуждались на XIII - XV международных конференциях «Современное образование - содержание, технологии, качество» (г. Санкт-Петербург, 2007 - 2009 гг.), XIII Всероссийской конференции «Новые информационные технологии в научных исследованиях и образовании» (г. Рязань, 2008 г.) и на семинарах факультета информатики в Западно-Приморском технологическом университете (г. Щецин, Польша, 2007 и 2009 гг.).

**Публикации.** По теме диссертации опубликованы 14 научных работ, из них – 10 статей (4 статьи опубликованы в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, одобренных ВАК), 4 работы – в трудах конференций.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав с выводами, заключения, списка литературы, включающего 98 наименований, и приложения. Основная часть работы изложена на 161 страницах машинописного текста и включает 102 рисунка и 7 таблиц.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации.

**В первой главе** диссертации выполнен анализ предметной области, связанной с биометрическими технологиями распознавания людей.

Анализ показал, что метод ССА позволяет выявлять и использовать скрытые связи между разными формами представления информации о людях. Носителями такой информации являются совокупности изображений, представляющие различные биометрические характеристики человека: походку, черты и выражения лица, движения рук, психофизическое состояние и т.д. Выявляя связи между этими характеристиками, можно достичь высокой результативности распознавания людей в реальных условиях, а также расширить сферы применения биометрических систем.

Метод ССА, представленный Хотеллингом (H.Hotelling) в 1936 году, изначально был ориентирован на обработку наборов векторных данных и не мог быть прямо применен для обработки изображений и наборов изображений.

Первые публикации по методам ССА в приложении к изображениям как двумерным данным (2D ССА) появились в 2007 году (Sun Ho Li, Seungjin Choi, Ning Sun, Zhen-hai Ji, Cai-rong Zou, Li Zhao и др.). В представленных подходах применение метода ССА требовало введения операций предобработки изображений - выравнивания исходных изображений лиц по центрам глаз, значительного уменьшения их размера и трансформации их в вектор, что усложняет процесс обработки, снижает точность и быстродействие предложенных алгоритмов. Здесь также не показана возможность применения ССА для данных, отвечающих биометрическому стандарту на размеры изображений (минимальные размеры которых составляют 320×240 пикселей), при малом их количестве, что свойственно типовым задачам биометрии.

При этом в представленных публикациях:

- отсутствует точное описание реализованных методов и алгоритмов, что не позволяет выделить их характеристики;

- не раскрыты детали представления и интерпретации изображений лиц в ПКП и способы оперирования ими;
- не представлены точные модели выполненных экспериментов, что не позволяет ни повторить эти эксперименты, ни использовать их результаты в рамках метаанализа;
- отсутствуют методические разработки по структуре и способам функционирования элементов систем распознавания, что затрудняет их практическую реализацию;
- отсутствует (или недоступна) информация о законченном программном продукте, что препятствует широкому применению методов ССА в обработке изображений и не позволяет приступить к соответствующим исследованиям в области биометрии.

Очевидно, что необходима разработка новых (простых в реализации) алгоритмов 2D ССА в приложении к изображениям лиц без их предобработки. Необходимо также детально исследовать и описать структуру систем распознавания и соответствующих комплексов программ, основанных на этих алгоритмах. Наличие таких средств позволит решать разнообразные задачи в приложении к современным проблемам биометрии.

**Вторая глава** посвящена разработке алгоритмов 2D ССА. Основой этих алгоритмов является прямая реализация ССА по двум направлениям координат исходных изображений (строкам и столбцам) – без их предварительного уменьшения и конкатенации в вектор.

Структура вычислений в методе 2D ССА может быть представлена следующим образом. Пусть нам заданы два набора, состоящие из  $K$  изображений размером  $M \times N$  пикселей:

$$X = [X^{(1)} X^{(2)} \dots X^{(K)}] \text{ и } Y = [Y^{(1)} Y^{(2)} \dots Y^{(K)}], \quad (1)$$

где  $X^{(k)}$ ,  $Y^{(k)}$ ,  $\forall k \in K$  - пары «центрированных» и нормированных к «1» изображений, при этом  $MN \gg K$ .

Целью 2D ССА является нахождение четырех матриц проекции, трансформирующих исходные данные в пространство канонических переменных  $X^{(k)} \rightarrow U^{(k)}$  и  $Y^{(k)} \rightarrow V^{(k)}$  так, чтобы выполнялось условие:

$$\|U - V\| \rightarrow \min. \quad (2)$$

Канонические переменные  $U$  и  $V$  связываются между собой устойчивой корреляцией, максимум которой достигается при решении следующих четырех задач на собственные значения:

$$\begin{cases} ([C_{xx}^{(r)}]^{-1} C_{xy}^{(r)} [C_{yy}^{(r)}]^{-1} C_{yx}^{(r)}) W_{x1} = W_{x1} \Lambda_x^{(r)} \\ ([C_{yy}^{(r)}]^{-1} C_{yx}^{(r)} [C_{xx}^{(r)}]^{-1} C_{xy}^{(r)}) W_{y1} = W_{y1} \Lambda_y^{(r)} \end{cases}; \quad (3)$$

$$\begin{cases} ([C_{xx}^{(c)}]^{-1} C_{xy}^{(c)} [C_{yy}^{(c)}]^{-1} C_{yx}^{(c)}) W_{x2} = W_{x2} \Lambda_x^{(c)} \\ ([C_{yy}^{(c)}]^{-1} C_{yx}^{(c)} [C_{xx}^{(c)}]^{-1} C_{xy}^{(c)}) W_{y2} = W_{y2} \Lambda_y^{(c)} \end{cases};$$

где:  $C_{xx}^{(r)} = XX^T$ ;  $C_{yy}^{(r)} = YY^T$ ;  $C_{xy}^{(r)} = XY^T$ ;  $C_{yx}^{(r)} = (C_{xy}^{(r)})^T$  и  $C_{xx}^{(c)} = X^T X$ ;  $C_{yy}^{(c)} = Y^T Y$ ;  $C_{xy}^{(c)} = X^T Y$ ;  $C_{yx}^{(c)} = (C_{xy}^{(c)})^T$  - матрицы ковариации; знаки «*r*» и «*c*» подчеркивают факт их вычисления относительно строк (*row*) и столбцов (*column*) исходных изображений из (1);  $W_{x_1}$ ,  $W_{y_1}$  и  $W_{x_2}$ ,  $W_{y_2}$  - матрицы собственных векторов порядков  $M$  и  $N$  соответственно;  $\Lambda_x$  и  $\Lambda_y$  - диагональные матрицы собственных значений (порядок матриц  $M$  и  $N$ ).

Трансформация исходных данных (1) в ПКП реализуется как двумерное преобразование Карунена-Лоэва (Karhunen-Loeve Transform - KLT) в форме:

$$U^{(k)} = W_{x_1}^T X^{(k)} W_{x_2} \text{ и } V^{(k)} = W_{y_1}^T Y^{(k)} W_{y_2}, \forall k \in K, \quad (4)$$

где  $U^{(k)}, V^{(k)}$  – матрицы, представляющие исходные изображения в ПКП.

Для редукции размерности в ПКП модифицируем (4) так, чтобы в проекции участвовали только те собственные векторы, которые соответствуют «*d*» главным компонентам. Для этого, из матриц  $W_{x_1}^T$  и  $W_{y_1}^T$  выберем «*d*» строк, соответствующих «*d*» наибольшим собственным значениям, и на их основе сформируем матрицы редукции  $F_{x_1}$  и  $F_{y_1}$ . Из матриц  $W_{x_2}$  и  $W_{y_2}$  выберем «*d*» столбцов, соответствующих «*d*» наибольшим собственным значениям, и на их основе сформируем матрицы  $F_{x_2}$  и  $F_{y_2}$ .

Тогда «усеченное» 2D KLT представим в следующей форме:

$$\hat{U}^{(k)} = F_{x_1} X^{(k)} F_{x_2} \text{ и } \hat{V}^{(k)} = F_{y_1} Y^{(k)} F_{y_2}, \forall k \in K. \quad (5)$$

В (5) матрицы  $F$  имеют размеры  $d \times M$  и  $N \times d$  соответственно (или  $d_1 \times M$  и  $N \times d_2$  в общем случае); знак « $\hat{\phantom{x}}$ » - определяет отличие результата от (4). При этом  $d < \min\{M, N\}$  или  $d_1 < M$ ;  $d_2 < N$ , если  $d_1 \neq d_2$ . Нижняя граница параметра «*d*» выбирается экспериментально с учетом критерия (2). Результирующие матрицы в (5) имеют в общем случае размеры  $d_1 \times d_2$  и представляют исходные изображения в пространстве канонических переменных.

В главе 2 разработаны два алгоритма 2D ССА: параллельный, основанный на независимом анализе информации по строкам и столбцам изображений, и каскадный, основанный на взаимосвязанном анализе информации по строкам и столбцам изображений. Алгоритмы 2D ССА представлены в векторно-матричной форме, позволяющей перейти к их прямой реализации в языках высокого уровня.

Модель вычислений параллельного алгоритма 2D ССА представлена в следующем виде:

$$\begin{aligned} & 1. \{X, Y\} \xrightarrow{R} \{\tilde{X}, \tilde{Y}\} \\ & 2. \{X, Y\} \xrightarrow{CCAr} \{W_{x_1}, W_{y_1}\}; \\ & 3. \{\tilde{X}, \tilde{Y}\} \xrightarrow{CCAr} \{W_{x_2}, W_{y_2}\}; \\ & 4. \left\{ \begin{aligned} U^{(k)} &= W_{x_1}^T X^{(k)} W_{x_2} \\ V^{(k)} &= W_{y_1}^T Y^{(k)} W_{y_2} \end{aligned} \right\}, \forall k \in K. \quad (6) \end{aligned}$$

Здесь, на этапе 1 выполняется реорганизация (R) структуры исходных данных, которая основана на «повороте» изображений  $X^{(k)}, Y^{(k)}$ ,  $\forall k$  влево на  $90^\circ$ .



Это реализуется как транспонирование всех матриц размером  $M \times N$  в наборах  $X$  и  $Y$  и составление новых наборов данных -  $\tilde{X}$  и  $\tilde{Y}$ . На этапе 2 выполняется базовая процедура ССА относительно строк (ССAr) исходных данных. На этапе 3 выполняется базовая процедура ССА относительно строк реорганизованных данных  $\tilde{X}$  и  $\tilde{Y}$ , что фактически приводит к реализации ССА относительно столбцов исходных данных (1). Этап 4 – трансформация всех исходных изображений в ПКП, что было определено в (4). Этапы 2 и 3 в (6) могут быть выполнены параллельно. Схема параллельного алгоритма 2D ССА приведена на рис. 1 слева. Здесь блоки “ССА” реализуют базовую процедуру ССА по строкам (ССAr). Блоки, обозначенные как “ $\otimes$ ”, реализуют процедуру проекции исходных данных в ПКП.

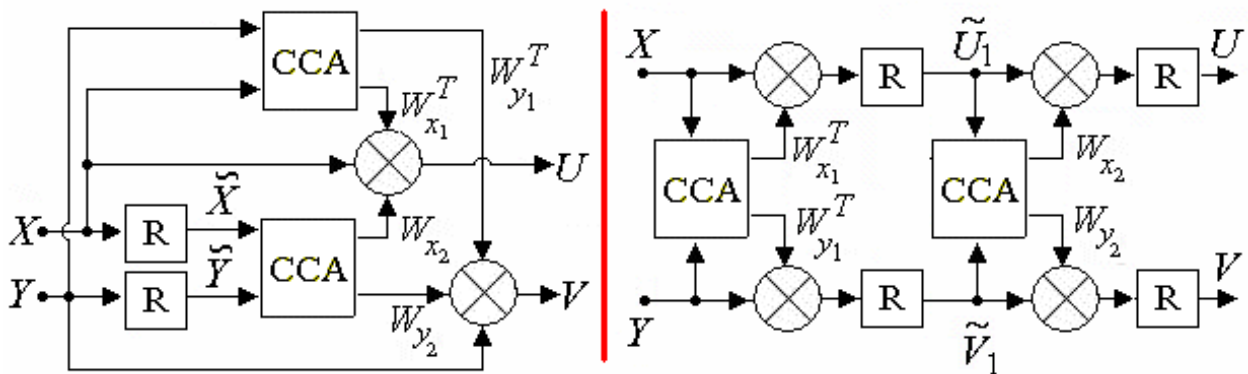


Рис. 1. Схемы реализации 2D ССА

Модель вычислений *каскадного алгоритма* 2D ССА имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} 1. \{X, Y\} &\xrightarrow{\text{ССAr}} \{U_1, V_1\} \xrightarrow{R} \{\tilde{U}_1, \tilde{V}_1\} \\ 2. \{\tilde{U}_1, \tilde{V}_1\} &\xrightarrow{\text{ССAr}} \{\tilde{U}, \tilde{V}\} \xrightarrow{R} \{U, V\} \end{aligned} \quad (7)$$

На первом этапе базовая процедура ССА выполняется относительно строк исходных данных, входящих в наборы  $X$  и  $Y$ . После вычисления матриц проекции  $W_{x1}$  и  $W_{y1}$  выполняется проекция исходных данных в ПКП и формируется набор переменных  $U_1$  и  $V_1$ . При этом в наборах  $U_1$  и  $V_1$  каждый блок переменных размером  $M \times N$  представляет собой результат проекции каждого отдельного изображения из исходного набора данных. Этап заканчивается реорганизацией переменных  $U_1$  и  $V_1$  в новые наборы данных  $\tilde{U}_1$  и  $\tilde{V}_1$ . На втором этапе базовая процедура ССА выполняется также относительно строк  $\tilde{U}_1$  и  $\tilde{V}_1$ . При этом вычисляются новые матрицы проекций  $W_{x2}$  и  $W_{y2}$ . Результат проекции снова подвергается реорганизации. Схема каскадного алгоритма 2D ССА приведена на рис. 1 справа.

Для параллельного и каскадного алгоритмов процедуру 2D ССА/2D КЛТ можно представить в следующей компактной форме:

$$\{X, Y\} \rightarrow \frac{2\text{DCCA}}{\{W_{x_1}, W_{x_2}, W_{y_1}, W_{y_2}\}} \rightarrow 2\text{DKLT} \rightarrow \{U, V\}, \quad (8)$$

что можно интерпретировать как преобразование двух наборов исходных изображений  $X$  и  $Y$  в пространство канонических переменных  $U$  и  $V$ . При этом

выполняется этап 2D ССА (с вычислением 4-х матриц проекции) и отдельный этап 2D KLT.

В главе приведены **характеристики разработанных алгоритмов 2D ССА:**

1. На реализацию 2D KLT (4) требуется  $(NM^2+MN^2)$  операций. На реализацию «усеченного» преобразования (5) требуется  $(Md^2+MNd)$  операций. Сокращение вычислений на этапе редукции размерности пространства признаков (РПП) можно приблизительно оценить как величину  $(M+N)/d$ , что определяет ускорение вычислений для каждого обрабатываемого изображения. С учетом параметра «K» - числа изображений в каждом из двух наборов, ускорение вычислений составляет величину, равную примерно  $2K(M+N)/d$  на все исходные данные.

2. Степень редукции размерности пространства признаков определяется соотношением  $MN/d^2$  или  $MN/(d_1d_2)$ , где  $MN$  - число пикселей в исходном изображении, а  $d$  (или  $d_1$  и  $d_2$ ) - размеры этого изображения в ПКП.

3. Наибольший порядок матриц ковариации в 2D ССА составляет величину  $DIM=max\{M,N\}$ . Это предопределяет практическую возможность решения задачи на собственные значения и стабильность этого решения даже для изображений очень больших размеров, используемых, например, в биометрии.

4. Проблема SSS, когда  $DIM>K$ , успешно решена, так как вместо изображений размером  $M\times N$ , в методе 2D ССА фактически используются  $N$  изображений размером  $M\times 1$  и  $M$  изображений размером  $N\times 1$ . При таком представлении исходных данных всегда выполняется условие:  $DIM=max\{M,N\}<(M+N)$ .

В главе также рассмотрены практические рекомендации по верификации выполнения канонического анализа. Использовались методы верификации, основанные на проверке свойств ортогональности матриц проекций; проверке структуры, характера изменений и значений элементов матрицы собственных значений; проверке качества взаимного соответствия переменных в ПКП.

Специфика изображений с лицами - большие размеры изображений, малое их количество и принадлежность к одному глобальному классу, повторение строк и столбцов в исходных изображениях – определяет «плохую статистику» исходных данных. Исходя из этого, матрицы автоковариации в (3) могут быть плохо обусловленными, что приводит к сложности или невозможности их обращения. Кроме того, решение задач на собственные значения в (3) усложняется тем, что полученные в результате перемножения четырех матриц ковариации общие матрицы рассеяния в (3) не являются симметрическими. Для решения этих проблем выбран наиболее простой способ регуляризации этих матриц - увеличение всех их диагональных элементов на некоторое малое значение. В ходе решения вариационной задачи были выбраны два значения параметра регуляризации, обеспечивающие наилучшее решение задач (3). Для матриц автоковариации это 0.0001, а для общей матрицы рассеяния это значение равно 0.0005. В главе показано влияние регуляризации на результат решения задачи (3). Кроме того, показано, что выбранные значения параметров регуляризации не нужно изменять при смене тестовых баз

изображений лиц и параметров  $M$ ,  $N$  и  $K$  в (1).

Далее в главе 2 рассмотрены модели изображений лиц, основанные на прямом (в форме (4) и (5)) и обратном преобразовании в собственном базисе. Обратное 2D KLT для значений  $d_1=M$  и  $d_2=N$  приводит к полной реконструкции исходных изображений из ПКП. Для значений  $d_1<M$  и  $d_2<N$  обратное 2D KLT приводит к аппроксимации исходных изображений. Качество реконструкции/ аппроксимации зависит от параметров  $d_1$  и  $d_2$ .

На рис. 2 показаны исходные изображения и результаты их реконструкции из ПКП при  $d<max\{M,N\}$ . Как видно, реконструированные изображения достаточно хорошо сохраняют индивидуальные характеристики лиц: формы области глаз, носа, границы волос на лбу и формы области рта, усов и очков.

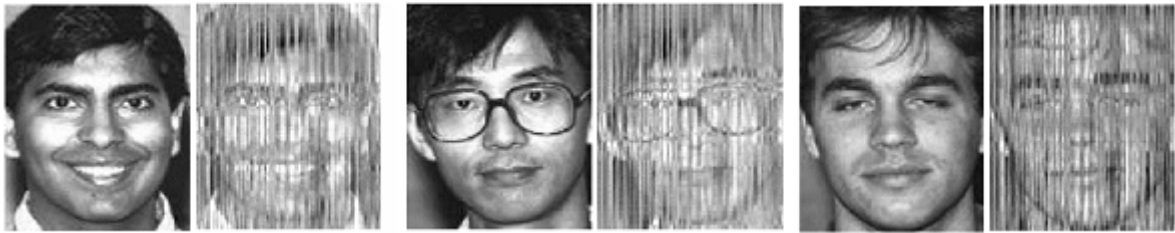


Рис. 2. Исходные изображения и их реконструкция из ПКП

В главе 2 представлены два типа (S1 и S2) разработанных структур систем распознавания. Процесс распознавания образов известной категории ( $X$  или  $Y$ ) и полная структура соответствующей системы распознавания первого типа отображены на рис. 3 слева. Здесь выделены: блок канонического корреляционного анализа исходных данных;  $\otimes$  - блоки трансформации в ПКП; блоки классификации/распознавания; знак QF (Query Face) обозначает изображения-запросы. На рис. 3 справа отображена структура системы распознавания второго типа, применение которой обосновано, когда неизвестно, к какой категории образов ( $X$  или  $Y$ ) принадлежит тестовый образ.

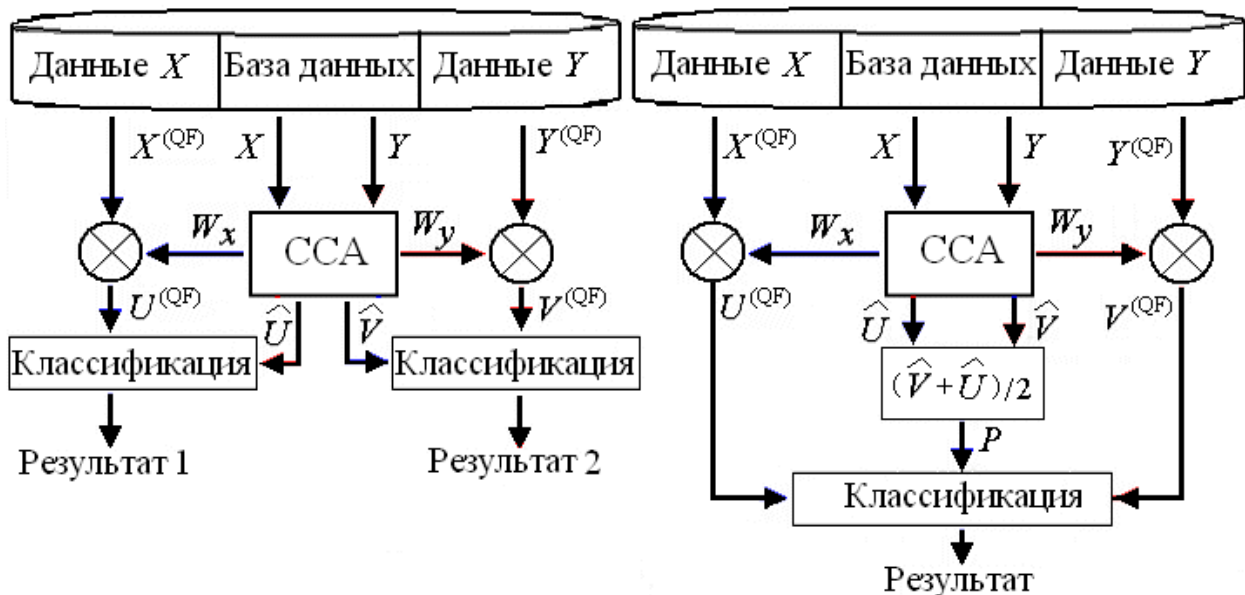


Рис. 3. Типы структур «S1» и «S2» систем распознавания

В рамках диссертации также определена новая структура баз данных, соответствующая классу решаемых задач в рамках ССА, т.е. оперированием двумя наборами исходных данных со структурой (1) и двумя наборами тестовых данных.

**Третья глава** посвящена экспериментальному исследованию характеристик разработанных алгоритмов 2D ССА и их применению в задачах биометрии.

Открывает главу методология организации, выполнения и описания компьютерных экспериментов. Общая схема организации и выполнения экспериментов представлена на рис. 4.

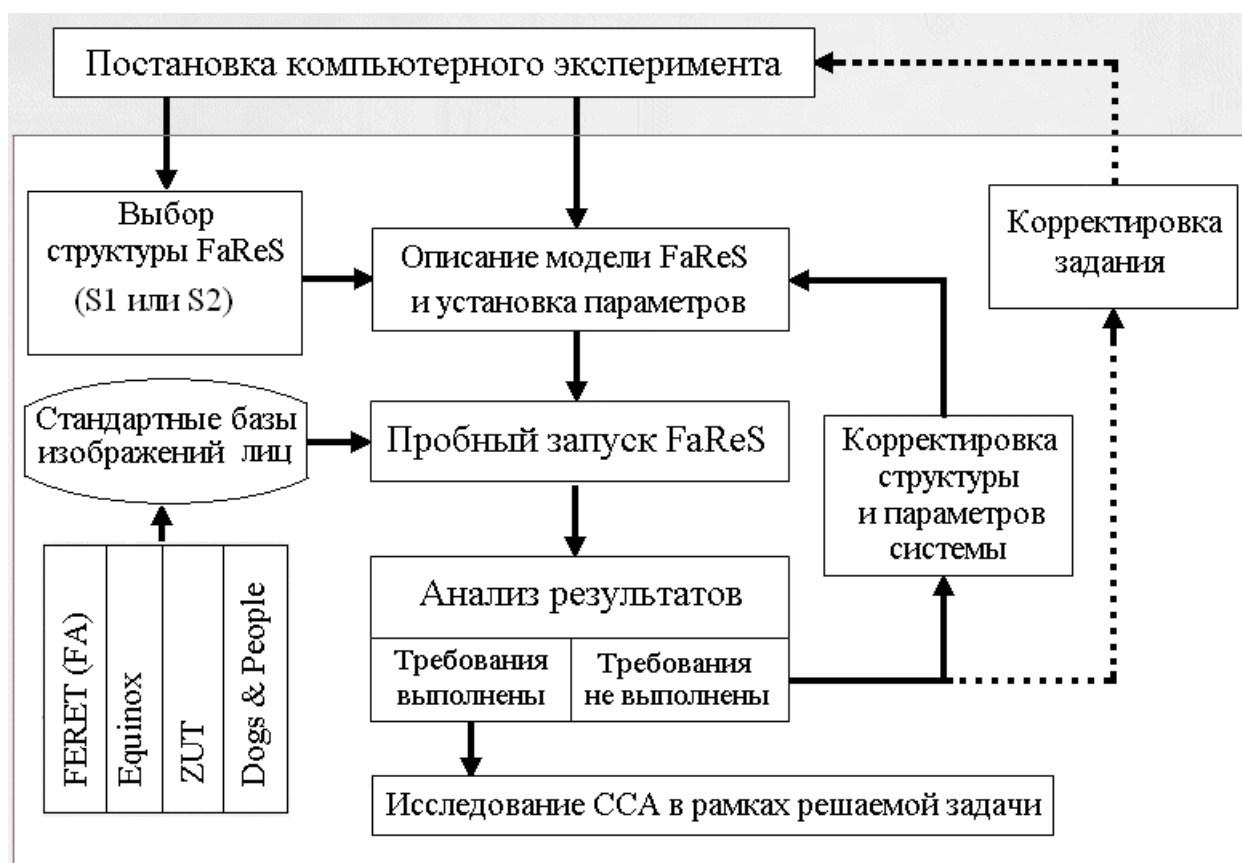


Рис. 4. Схема организации и выполнения компьютерных экспериментов

Методология включает: вербальное описание эксперимента; использованную базу данных и ее параметры; полученные результаты и их интерпретацию; способ записи компьютерных экспериментов в форме компактной модели, точно отражающей эксперимент и параметры моделируемой системы распознавания.

В предлагаемой модели три функциональных блока системы распознавания (база данных; экстрактор признаков/редуктор РПП, тип структуры системы и выбранный классификатор) семантически разделены между собой, а их характеристики и структура обрабатываемых данных представлены в рамках своих блоков. Показано, что предложенная модель позволяет “наглядно”, компактно и в то же время точно представить выполненный эксперимент и повторить его при необходимости. Такая модель

может быть также использована для сравнения различных решений моделируемых систем между собой, что позволит использовать показанные результаты в рамках метаанализа. Перечисленные характеристики отличают эту модель от известных моделей, представленных в публикациях по биометрии, а также модели, представленной автором диссертации в более ранней публикации [7].

Важным элементом систем распознавания являются экспериментальные базы изображений лиц. Широкое применение баз «FERET» и «Equinox» при тестировании систем распознавания изображений лиц и, в частности, при исследовании методов ССА стало аргументом в пользу использования их в качестве исходных данных в экспериментах. Кроме того, в экспериментах использовались базы «ZUT» и «People and Dogs», обоснование выбора которых также приведено в главе. Перечисленные базы изображений были приведены к новой структуре, отвечающей требованиям ССА и представленной в главе 2.

Огромное значение при решении поставленных задач имеют методы и инструменты сравнения изображений между собой как в исходном пространстве признаков, так и в ПКП. В качестве такого метода были использованы амплитудная и фазовая корреляция. В работе показано, что фазовая корреляция наиболее точно отображает меру подобия между изображениями. Исходя из того, что максимум корреляции соответствует минимуму расстояния, для практического использования рекомендовано применять в качестве инструмента подобия классификацию по критерию минимума расстояний, что обосновано простотой реализации и быстродействием такого классификатора в приложении к обработке изображений.

В рамках каждого эксперимента проводился контроль правильности выполнения 2D ССА. Элементами контроля являются: вид кривой уменьшения коэффициентов канонической корреляции; анализ области представления канонических переменных и результат оценки ее параметров; матрицы собственных значений; расстояние между образами. Например, компактная область представления канонических переменных, ориентированная по диагонали прямоугольника, описывающего эту область, свидетельствует о тесной связи между соответствующими каноническими переменными и их линейной зависимости.

На рис. 5 слева показан пример зависимости  $u_m = f(v_m)$ , а справа показано наложение переменных  $u_m$  и  $v_m$  друг на друга (здесь  $m=1$  и представляет номер строки канонических переменных  $U$  и  $V$ ).

Особое место в главе 3 занимает эксперимент для случая, когда исходные изображения не относятся к одному глобальному классу. В качестве примера таких исходных данных использована база изображений «People and Dogs», где представлены пары изображений собак и их хозяев. В ходе эксперимента был подтвержден факт наличия корреляции между этими изображениями в ПКП, в то время как они не коррелировали между собой в исходном пространстве признаков.

Полученные результаты подтвердили, что метод ССА может быть эффективно использован в задачах взаимного распознавания (классификации) и индексирования образов, принадлежащих разным глобальным классам.

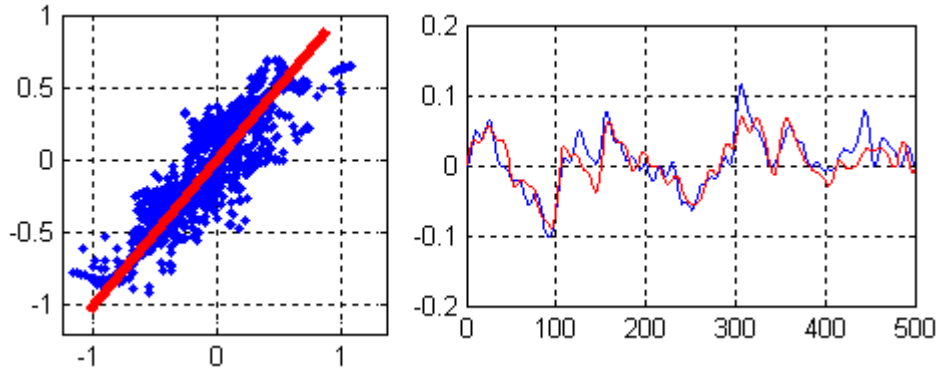


Рис. 5. Варианты представления канонических переменных  $U$  и  $V$

Ряд экспериментов, представленных в главе, выполнен с целью распознавания изображений лиц с использованием алгоритмов 2D ССА.

Модель первого эксперимента имеет вид:

**FERET(100/1<sub>x</sub> + 1<sub>y</sub>/1<sub>x</sub> + 1<sub>y</sub>) {224×184 → 2D ССА:  $d \times d/S2/KMP/L_1/rank = 1$ }.**

Здесь база исходных данных (портреты мужчин и женщин из базы FERET) содержит 2 набора по 100 пар изображений. Эталоны являются 100 пар портретов мужчин и женщин (100/1<sub>x</sub> + 1<sub>y</sub>). В качестве тестовых использованы другие 100 пар образов «X» и «Y». Каждое изображение имеет размер 224×184 пикселей, а размер переменных в ПКП составляет  $d \times d$ . Выбран тип структуры системы распознавания S2 с классификатором по критерию минимума расстояния на основе метрики  $L_1$  (KMP/ $L_1$ ). Результат считается правильным, если на первом месте ( $rank=1$ ) в группе результатов находится образ из того же класса, что и тестовый образ. Результаты поиска образа «X» по образу «Y» (и наоборот) для обоих алгоритмов 2D ССА и значений  $d = 5, 6, \dots, 16$  показаны в таблице 1.

Таблица 1

2D ССА	База FERET(100/(1+1)/1)													Средн.
	$d$	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
Параллел.	Тест «X→Y»	87	89	90	91	91	91	91	91	90	90	89	88	89.8
	Тест «Y→X»	85	87	87	88	89	91	91	90	90	88	87	86	88.2
Каскадн.	Тест «X→Y»	89	90	91	92	93	93	93	93	92	92	92	92	91.8
	Тест «Y→X»	88	88	90	92	93	93	92	92	92	92	92	92	91.3

Наилучший результат распознавания обеспечивается при  $d=10$ . Степень редукции РПП составила при этом более 400 раз ( $224 \times 184 / 100$ ). Каскадный алгоритм обеспечивает улучшение распознавания на 2-3% по сравнению с параллельным, что существенно при решении задачи распознавания, в которой изображения мужского и женского лица «объединены» в один общий класс.

Для сравнения результативности 2D ССА с другими методами выполнен эксперимент по распознаванию тех же изображений лиц с использованием двумерного дискретного преобразования Фурье (2D DFT). Выбор этого метода обоснован тем, что в 2D DFT трансформация исходных изображений в новое пространство признаков (спектральное) также выполняется на основе строчно-столбцового преобразования по процедурам, аналогичным (4). С целью улучшения репрезентативности результатов эксперименты выполнены для



Во втором эксперименте результат классификации изображений “VIS” по изображениям “IR” (в инфракрасном свете) с применением каскадного алгоритма 2D ССА составил 100%. Модель эксперимента имеет следующий вид:

**ZUT (10(1<sub>x</sub> + 1<sub>y</sub>/9<sub>y</sub>)) {2D ССА:200×150→(10×10)/S1/КМР/L<sub>1</sub>/rank=1}.**

Согласно результатам экспериментальных исследований, представленное описание алгоритмов 2D ССА является точным, поскольку реализованные по нему программы оказались результативными при решении задач представления и обработки изображений лиц в ПКП, в том числе при решении задач распознавания изображений. Программы были реализованы в среде пакета MATLAB с использованием матричных операторов пакета при реализации (3) ÷(7).

**В четвертой главе** представлен исследовательский комплекс программ, ориентированный на обработку изображений на основе алгоритмов 2D ССА.

Комплекс программ представлен на рис. 7 и позволяет подключать любые базы изображений лиц, управлять параметрами базы (включая число базовых и тестовых изображений, их размеры), выбирать требуемый алгоритм 2D ССА, параметры редукции и тип структуры системы распознавания, а также наблюдать процесс анализа и обработки изображений посредством вывода на экран исходных данных, промежуточных и окончательных результатов.

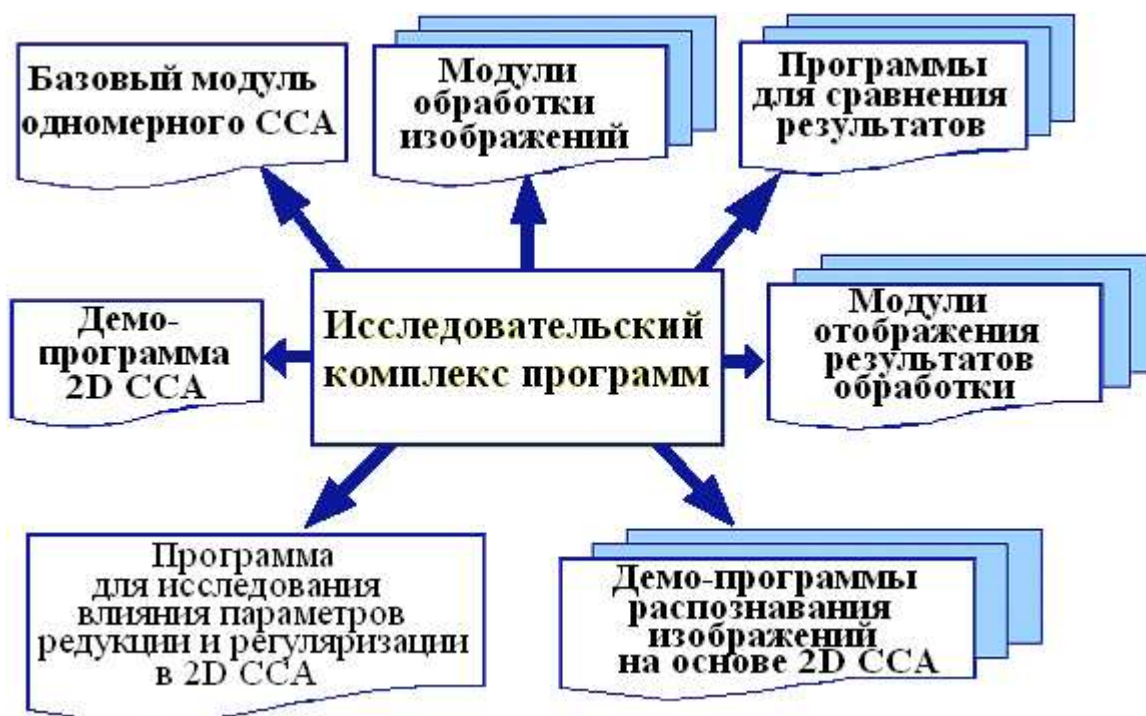


Рис. 7. Основные компоненты исследовательского комплекса программ

Комплекс программ реализован в среде пакета MATLAB, и алгоритмы 2D ССА реализованы с использованием матричных операторов. Комплекс содержит 7 компонентов и не менее 14 модулей. В диссертации представлены назначение, структура и состав каждого компонента и входящих в него модулей, листинги программ и примеры их работы.

**В заключении** сформулированы основные научные и практические результаты, полученные автором.



### Основные результаты работы

1. Разработаны параллельный и каскадный алгоритмы двумерного канонического корреляционного анализа (2D CCA), не требующие предварительной процедуры уменьшения размеров исходных изображений, прямо реализуемые по двум направлениям координат (строкам и столбцам) исходных изображений и обеспечивающие двумерное преобразование исходных изображений в ПКП. Разработанные алгоритмы 2D CCA характеризуются меньшей сложностью вычислений и применимы в условиях «малой выборки».

2. Определены два типа базовых систем, предназначенных для распознавания тестовых изображений при известной и неизвестной их принадлежности к заданным категориям исходных данных. Эти типы систем могут служить основой для любых других практических решений для систем распознавания изображений методами CCA.

3. Разработан способ представления компьютерного эксперимента в виде мнемонической модели, отражающей основные параметры моделируемой системы распознавания: базу изображений, структуру исходных и промежуточных данных, метод экстракции признаков, тип системы, классификатор и ранг оценки результата. Такие модели целесообразно применять для сравнения различных решений моделируемых систем между собой или для точного и полного повторения выполненного эксперимента.

4. Программно реализованы алгоритмы 2D CCA, разработана структура комплекса программ, предназначенного для моделирования и исследования систем распознавания изображений лиц в пространстве канонических переменных. Примеры решения некоторых задач приведены в диссертации и могут служить прототипами для решения других аналогичных задач. Комплекс программ предлагается использовать в практике выполнения исследовательских работ, связанных с задачами обработки и распознавания изображений методами двумерного корреляционного анализа.

### Публикации по теме диссертации

#### Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК России:

1. Kamenskaya, E. Visible and Infrared Recognition using Canonical Variables [Текст] (Распознавание изображений в видимом и инфракрасном диапазонах с использованием канонических переменных) / E. Kamenskaya, M. Borawski, M. Szaber // Polish Journal of Environmental Studies. – 2009. - Vol. 18, № 3B. - P. 39-43.

2. Каменская, Е.И. Обзор алгоритмов канонического корреляционного анализа в области обработки изображений лиц [Текст] / Е.И. Каменская // Известия Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ». Сер. «Информатика, управление и компьютерные технологии». – 2010. - № 3. - С. 16-22.

3. Kukharev, G. Application of two-dimensional canonical correlation analysis for face image processing and recognition [Текст] (Применение двумерного канонического корреляционного анализа в обработке и распознавании изображений лиц) / G. Kukharev, E. Kamenskaya // Pattern Recognition and Image Analysis. – 2010. - Vol. 20, № 2. - P. 210-219.

4. Кухарев, Г.А. Новый метод двумерного канонического корреляционного анализа для задач распознавания изображений лиц [Текст] / Г.А. Кухарев, Е.И. Каменская // Известия Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ». Сер. «Информатика, управление и компьютерные технологии». – 2010. - № 5. - С. 56-61.

Публикации в других изданиях:

5. Kamenskaya, E. Recognition of Psychological Characteristics from Face [Текст] (Распознавание психологических характеристик человека по изображению лица) / E. Kamenskaya, G. Kukharev // *Metody Informatyki Stosowanej*. – 2008. - Vol. 15, № 1. - P. 59-72.
6. Kamenskaya, E. Some aspects of automated recognition of person's psychological characteristics from the facial image [Текст] (Некоторые аспекты автоматизированного распознавания психологических характеристик человека по изображению лица) / E. Kamenskaya, G. Kukharev // *Metody Informatyki Stosowanej*. – 2008. - Vol. 15, № 2. - P. 29-37.
7. Szaber, M. Systemy rozpoznawania twarzy dla obrazów widzialnych i podczerwieni z wykorzystaniem ССА [Текст] (Системы распознавания лиц на изображениях в видимом и инфракрасном свете с использованием ССА) / M. Szaber, E. Kamenskaya // *Metody Informatyki Stosowanej*. – 2008. - Vol. 16, № 3. - P. 223-236.
8. Кухарев, Г.А. Метод определения линии симметрии лица в приложении к задачам биометрии [Текст] / Г.А. Кухарев, Е.И. Каменская, Зуи Линь Ву // *Известия Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ»*. Сер. «Информатика, управление и компьютерные технологии». - 2009. - № 7. - С. 39-44.
9. Kukharev, G. Two-dimensional canonical correlation analysis for face image processing and recognition [Текст] (Двумерный канонический корреляционный анализ в обработке и распознавании изображений лиц) / G. Kukharev, E. Kamenskaya // *Metody Informatyki Stosowanej*. – 2009. - Vol. 20, № 3. - P. 103-112.
10. Кухарев, Г.А. Двумерный канонический корреляционный анализ в приложении к обработке изображений лиц [Текст] / Г.А. Кухарев, Е.И. Каменская // *Известия Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ»*. Сер. «Информатика, управление и компьютерные технологии». – 2010. - № 1. - С. 23-28.
11. Каменская, Е.И. Применение Fares Mod в обучении студентов дисциплинам по распознаванию образов [Текст] / Е.И. Каменская // *Материалы XIII Международной конференции "Современное образование: содержание, технологии, качество"*. - Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», СПб. - Том 1. - 19 апреля 2007. - С. 206-207.
12. Каменская, Е.И. Распознавание психологических характеристик человека по изображению лица в приложении к задачам профориентации и дистанционного обучения [Текст] / Е.И. Каменская // *Материалы XIV Международной конференции "Современное образование: содержание, технологии, качество"*, Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», СПб. - Том 1. - 23 апреля 2008. - С. 233-234.
13. Каменская, Е.И. Распознавание психологических характеристик человека по изображению лица в системах дистанционного обучения [Текст] / Е.И. Каменская // *Материалы XIII Всероссийской научно-технической конференции "Новые информационные технологии в научных исследованиях и образовании"*. - Рязанский Государственный радиотехнический университет, Рязань. - Часть 2. - 14 мая 2008. - С. 85-86.
14. Каменская, Е.И. Метод анализа канонической корреляции в приложении к распознаванию изображений лиц [Текст] / Е.И. Каменская // *Материалы XV Международной конференции "Современное образование: содержание, технологии, качество"*. - Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», СПб. - Том 1. - 22 апреля 2009. - С. 305-306.