

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ ПЕРСОНАЛЬНЫХ ДОКУМЕНТОВ*

С. Л. Каратеев¹, И. В. Бекетова², М. В. Ососков³, В. А. Князь⁴, Ю. В. Визильтер⁵,
А. В. Бондаренко⁶, С. Ю. Желтов⁷

Аннотация: Приведено описание программно-аппаратного комплекса для автоматизации процесса получения и контроля цифровых фотографий для биометрических документов: общая структура комплекса, функции, аппаратное и алгоритмическое обеспечение. Алгоритмическое обеспечение комплекса включает: детектор лица, модуль оценки яркостных и цветовых характеристик; детектор открытых/закрытых глаз; детектор очков; детектор бликов и теней; детектор основных элементов лица (рот, нос, брови), детектор поворотов и наклонов головы. Проведено исследование точности используемых алгоритмов косвенной оценки углов поворота лица по монокулярному цифровому изображению. Для этого разработана специальная методика, основанная на использовании синтезированных ракурсных изображений реальных лиц, реконструированных по результатам трехмерного сканирования.

Ключевые слова: биометрия; персональные документы; обнаружение лиц; бустинг; трехмерное сканирование; трехмерное моделирование

1 Введение

Введение стандарта на цифровые фотографии лица определяет необходимость автоматизации операций контроля качества изображений лиц как непосредственно в процессе получения этих изображений, так и на любом этапе подготовки паспортных, визовых и иных персональных документов.

Для обеспечения согласованности национальных стандартов цифровых фотографий международной организацией по стандартизации были разработаны рекомендации ISO/IEC FCD 19794-5. В России стандартом, определяющим требования к изображениям лиц для биометрических документов, является ГОСТ ИСО/МЭК 19794-5-2006.

Для автоматизации процесса получения цифровых фотографий, удовлетворяющих основным требованиям и рекомендациям ГОСТ ИСО/МЭК 19794-5-2006, в ГосНИИАС был разработан описанный в данной статье программно-аппаратный комплекс. Комплекс обеспечивает получение цифровых фотографий лица, а также оценку в реальном времени основных характеристик изображения и параметров лица, что позволяет оператору с минимальными усилиями, не превышающими усилия,

необходимые для получения обычной качественной фотографии лица, получать цифровые фотографии лиц, гарантированно удовлетворяющие требованиям данного ГОСТа. Кроме того, мобильный комплекс может быть использован для контроля параметров фотографий лиц, полученных от других источников изображений, — как в цифровом, так и в бумажном виде, предоставляя возможность оценки пригодности фотографий для последующей биометрической обработки.

В данной статье также описаны результаты исследования возможной точности алгоритмов косвенной оценки углов поворота лица по монокулярному цифровому изображению. Поскольку в соответствии с требованиями ГОСТ ИСО/МЭК 19794-5-2006 на цифровой фотографии лица в биометрических документах допустимый угол поворота изображения лица (головы) вокруг любой из осей координатной системы не должен превышать 5° , задача оценки возможной точности измерения пространственной ориентации головы на цифровом изображении представляет существенный интерес, равно как и задача выбора наиболее надежно работающих косвенных методов оценки углов поворота.

* Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект 09-07-13551-офф.

¹ ФГУП «Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем», goga@gosniias.ru

² ФГУП «Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем», itus@gosniias.ru

³ ФГУП «Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем», mvo@gosniias.ru

⁴ ФГУП «Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем», knyaz@gosniias.ru

⁵ ФГУП «Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем», viz@gosniias.ru

⁶ ФГУП «Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем», bond@fgosniias.ru

⁷ ФГУП «Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем», zhl@gosniias.ru

2 Требования к цифровым фотографиям для биометрических документов

ГОСТ ИСО/МЭК 19794-5-2006 определяет основные требования и дополняющие их рекомендации к цифровым изображениям лица и форматам сохранения данных. Общий вид и основные геометрические характеристики фотографии лица приведены на рис. 1.

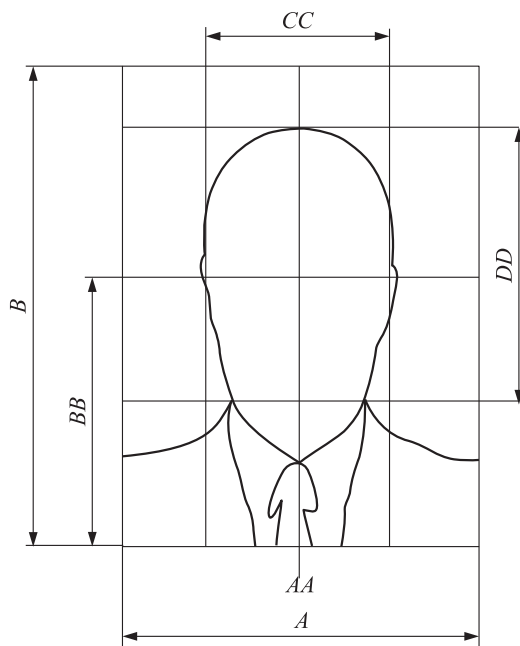


Рис. 1 Основные геометрические характеристики изображения лица

Основные характеристики изображения лица на цифровой фотографии для биометрических документов должны соответствовать следующим требованиям:

- минимальный размер фотографии 525×420 пикселей;
- изображение лица на фотографии должно быть фронтальным и не иметь отклонения относительно основных осей более чем на 5° ;
- соотношение ширины фотографии и ширины головы ($A:CC$) должно быть не менее 7:5 и не более чем 2:1;
- расстояние от нижней границы фотографии до горизонтальной линии, проходящей через центры глаз (BB), должно составлять 50%–70% от высоты полного изображения;
- площадь лица на фотографии должна составлять 70%–80% от площади фотографии;
- цвет и яркость фона должны обеспечивать надежное определение контура головы;
- на изображениях лиц не должно быть световых бликов и сильного затенения;
- на фоне не должно быть теней от головы или каких-либо предметов;
- на изображениях лица не должно быть закрытых глаз, предметов, закрывающих глаза и лицо или искажающих черты лица.

Как видно из вышеприведенных требований, проверка цифровых изображений лица на соответствие требованиям ГОСТа является весьма нетривиальной задачей. Здесь недостаточно визуального анализа фотографии для принятия решения о ее пригодности для использования в документах, удостоверяющих личность. Поэтому при создании мобильного комплекса биометрической регистрации изображений лиц было разработано специализированное программное обеспечение, автоматизирующее процесс создания и контроля фотографий, удовлетворяющих требованиям ГОСТа.

3 Алгоритмическое обеспечение комплекса

На основании измеренных и рассчитанных характеристик изображения лица алгоритмическое обеспечение осуществляет диагностику наличия и причин отклонений от требований ГОСТа и вывод сообщений об этих отклонениях и их возможных причинах.

Для получения оценок основных параметров изображения лица в автоматическом режиме решаются следующие задачи:

- автоматическое обнаружение лица на изображении;
- автоматическое определение контура и оценка параметров лица на изображении;
- автоматическое обнаружение глаз на изображении и оценка координат центров зрачков;
- обнаружение бликов и областей сильной затененности на изображении лица;
- формирование фронтальных и условно-фронтальных цветных и монохромных изображений заданного размера для печати фотографий;
- формирование изображений для систем обмена биометрическими данными.

Алгоритм автоматического обнаружения области лица является вариантом каскадного детектора, обучаемого с помощью метода Adaboost [1, 2]. В алгоритме слабые (weak) классификаторы построены на основе фильтров Хаара, однако отклик формируется с использованием аппроксимации распределения вероятностей амплитуды откликов. Аппроксимация распределения вероятностей откликов представляется в виде гистограммы, которая строится по взвешенным примерам, в результате чего обучение слабых классификаторов проводится на подвыборках одного и того же фиксированного размера, но имеющих различные распределения обучающих изображений. В процессе обучения при формировании каскадного классификатора для каждого последующего классификатора признаковое пространство сокращается за счет устранения признаков, на которых построены предыдущие классификаторы. Поскольку каждый следующий классификатор обучается в другом подпространстве признаков, он обладает уточняющими свойствами и работает по принципу последовательных приближений. Классификатор представляет собой линейную комбинацию слабых классификаторов, число которых варьируется от 5 до 75. Классификаторы объединяются в каскадную структуру, число слоев каскада варьируется от 4 до 8 в зависимости от желаемого уровня соотношения ошибок первого и второго рода. Математическое моделирование показало [3], что при работе по случайно выбранной совокупности тестовых изображений алгоритм автоматического обнаружения изображений лица обеспечивает вероятность правильного обнаружения не менее 0,95 при вероятности ложного обнаружения лица не более 0,01.

Алгоритм автоматического определения контура лица на изображении построен на использовании информации об оттенках кожи человека. Областью интереса алгоритма является фрагмент изображения, классифицированный как лицо каскадным классификатором Adaboost. Каждому пикселю цветного RGB-фрагмента изображения ставится в соответствие вектор параметров цвета (H, S, V) в цветовом пространстве HSV (*Hue*, *Saturation*, *Value* — цветовой тон, насыщенность, яркость) [4]. Распределение оттенков кожи представлено бинарной картой, хранящейся в структуре данных типа «просмотровой таблицы» (Look-Up-Table, LUT). Сегментация фрагмента изображения выполняется путем проверки принадлежности параметров цвета пикселей к кластеру модели оттенков кожи с помощью операции поиска по таблице. Область изображения кожи формируется из пикселей, векторы параметров которых вошли в один из кластеров. Для формирования одной однородной области

пикселей, по цвету соответствующих оттенкам кожи, и удаления мелких областей, линий и отдельных пикселей к изображению применяются такие операции математической морфологии, как дилатация и эрозия. Линии контура лица формируются с помощью алгоритма сплайн-интерполяции к координатам граничных пикселей области кожи лица. Размеры прямоугольника, в который вписаны линии контура лица, являются линейными размерами изображения лица. На рис. 2 приведены результаты работы алгоритма цветовой сегментации изображения лица. Белым цветом отображены пиксели, классифицированные как кожа.

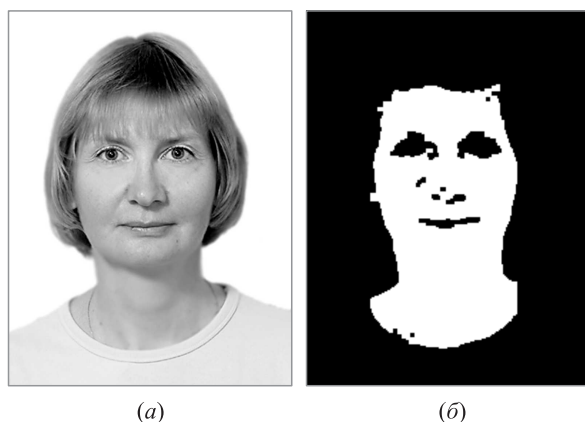


Рис. 2 Пример работы алгоритма цветовой пиксельной сегментации кожи лица: (а) исходное изображение; (б) результат выделения кожи на изображении

Задача обнаружения изображений глаз решается как задача поиска и распознавания на цифровом изображении лица локальных областей, обладающих специфическими характерными для изображений глаз параметрами. Областью интереса алгоритма является часть изображения лица, представляющая собой область ожидаемого расположения глаз. На основе статистической модели проводится предварительная оценка ожидаемого положения и размеров глаз, благодаря чему существенно возрастает вычислительная эффективность алгоритма. Алгоритм автоматического обнаружения области глаз с помощью каскадного классификатора Adaboost определяет координаты глаз в пределах радужной оболочки. Для точной локализации изображений глаз производится поиск координат центров зрачков с использованием операций морфологической фильтрации. Морфологический фильтр выделяет изображение зрачка и радужной оболочки глаза, устраняя при этом шумовые помехи и артефакты изображения, например блики. Координаты центров зрачков определяются путем

свертки изображения с круговым фильтром, подчеркивающим форму зрачка. Проведенное математическое моделирование показало, что при работе по случайно выбранной совокупности тестовых изображений разработанный алгоритм автоматического обнаружения и локализации изображений глаз обеспечивает вероятность правильного обнаружения и локализации не менее 0,95 при вероятности ложного обнаружения глаз не более 0,01. Пример работы алгоритмов обнаружения изображения лица, выделения контура лица и обнаружения глаз представлен на рис. 3.

Определение бликов и областей затенения осуществляется путем анализа пространственных распределений яркостей на последовательности изображений лица, сглаженных окнами различных размеров. При этом бликом считается появление связанной области площадью более 1% от площади лица, в которой все компоненты RGB равны и превышают по амплитуде 250, а признаком затенения является наличие на изображении лица области размером более 10% от площади лица, яркость которой отличается более чем на 10% от яркости симметричной ей области изображения. В связи с тем, что яркостные отличия могут быть вызваны причинами, не связанными с наличием тени, например дефектами лица или небритостью, признак затенения носит рекомендательный характер и не влияет на вывод о соответствии изображения лица требованиям ГОСТа.



Рис. 3 Пример работы алгоритмов обнаружения лица и обнаружения глаз

После проведения основных операций над изображением лица выполняется анализ полученных данных на соответствие ГОСТу. Для этого производится расчет оценок характеристик изображения, производных от геометрических параметров лица, и проверка наличия артефактов на самом изображении. Выполняются следующие операции:

- определение оси симметрии лица;
- определение центровки изображения лица;
- определение угла поворота лица;
- определение угла наклона лица;
- обнаружение очков.

На заключительном этапе интерпретации результатов проводится проверка оцененных параметров изображения на соответствие требованиям стандарта. В случае несоответствия вычисленных параметров изображения требованиям стандарта выдаются рекомендации по изменению условий съемки. В случае формирования условно-фронтальных изображений система выполняет необходимые повороты и перемасштабирование изображения.

4 Конструктивные особенности программно-аппаратного комплекса

Одним из основных приоритетов при выборе конструкции комплекса было требование создания наиболее простой, мобильной и сравнительно дешевой конструкции, состоящей из широкодоступных готовых компонентов.

Программно-аппаратный комплекс включает:

- персональный компьютер;
- цифровой фотоаппарат;
- источник освещения;
- специальный штатив для крепления фотоаппарата и источника освещения;
- планшетный сканер;
- специализированное программное обеспечение.

Комплекс обеспечивает выполнение следующих основных функций:

- захват (оцифровка) и отображение на мониторе последовательности изображений лица, получаемых от цифрового фотоаппарата в реальном времени;

- сохранение изображений на жестком диске компьютера;
- загрузка и отображение изображений с жесткого диска компьютера;
- обнаружение изображений лиц, близких к фронтальному положению;
- обнаружение глаз, определение контура лица, вычисление осей симметрии;
- определение центровки изображения лица;
- определение размеров изображения головы;
- определение углов наклона и поворота головы;
- обнаружение очков на изображении;
- оценка качества изображения — наличие теней, бликов, оценка цвета, яркости и текстуры фона;
- сравнение измеренных и вычисленных параметров изображения лица с требованиями стандартов;
- индикация результатов сравнения в виде пиктограмм и текстовых сообщений;
- выбор изображения, удовлетворяющего требованиям стандартов (автоматически или вручную);
- вывод изображения на печать в заданном формате.

При установке системы предлагается выбор используемого устройства видеоввода. В качестве такого устройства может использоваться цифровой фотоаппарат, имеющий программный интерфейс с компьютером, или сканер. Кроме этого, в качестве источника данных может использоваться любой внешний носитель информации, содержащий массивы цифровых фотографий в форматах BMP или JPEG. На рис. 4 представлен общий вид комплекса.

Программное обеспечение работает под управлением ОС Windows 2000/XP. Интерфейс программы представляет собой диалоговое окно, в котором помимо изображения текущей фотографии также отображаются результаты проверки требований к изображению лица в виде пиктограмм и текстовой информации. Если полученное изображение имеет отклонения от норм ГОСТа, оператор получает визуальное и звуковое оповещение. При этом изображения на пиктограммах и соответствующие текстовые сообщения подсказывают ему причину ошибки. Каждая из пиктограмм, имеющихся в окне программы, соответствует одному из приведенных выше требований ГОСТа по характеристикам изображения лица и фотографии. Результаты проверки отображаются в виде текстовых сообщений



Рис. 4 Программно-аппаратный комплекс в сборе

в специальном окне. Кроме этого, для каждой обработанной фотографии программа сохраняет результаты всех проверок, выполненных в процессе обработки.

5 Примеры работы комплекса

На рис. 5 показаны примеры нескольких типовых ошибок, возникающих при получении цифровых фотографий для биометрических документов, и результаты обработки этих изображений программным обеспечением комплекса.

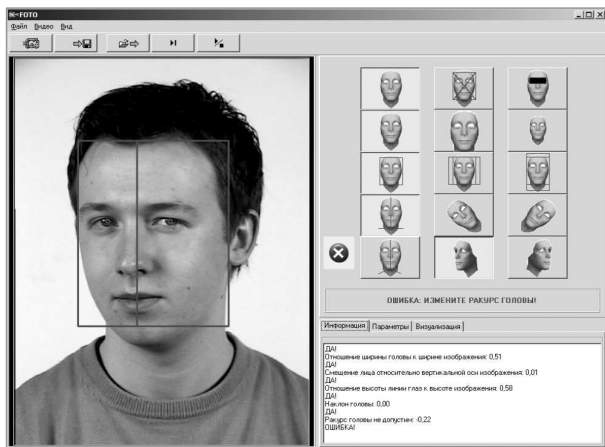
На приведенных рисунках хорошо видны особенности графического интерфейса. При обнаружении отклонений от требований ГОСТа возле ряда пиктограмм, содержащего пиктограмму, соответствующую данному отклонению от требований, появляется информирующий тревожный сигнал красного цвета, сопровождаемый звуковым сигналом. При этом подсвечивается соответствующая пиктограмма и появляется текстовая надпись в информационном окне с указанием ошибки и ее фактического значения (если это возможно). В случае выявления артефактов, неоднозначно трактуемых или нежелательных, но не запрещенных ГОСТом, выводится предупредительная визуальная сигнализация на изображении лица и делается соответствующая запись в информационном окне.

6 Методика оценки точности определения пространственной ориентации головы

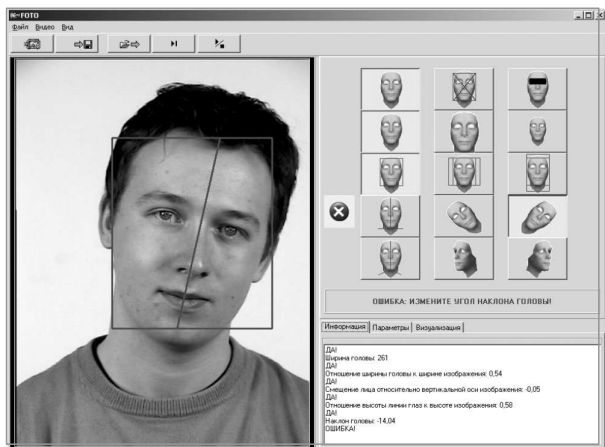
Вообще говоря, построение связанной трехмерной системы координат на основании двухмерного



(а)



(б)



(в)

Рис. 5 Несоответствие требованиям: закрытые глаза (а); поворот головы (б); наклон головы (в)

изображения лица является некорректной обратной задачей. Поэтому в системах подготовки и контроля цифровых фотографий для биометрических документов для определения углов поворота относительно пространственных осей используются косвенные методы оценки углов поворота головы по изменению пропорций лица, как показано на рис. 5, б и в. Вследствие этого важной проблемой является анализ точности определения углов поворота лица, основанного на косвенных методах измерений, и выбор наиболее надежно работающих косвенных методов оценки углов поворота.

Координатная система, рекомендованная в стандарте, представлена на рис. 6. Здесь XYZ — правая система координат с центром в точке, соответствующей кончику носа на изображении лица. Углы поворотов определяются относительно неподвижной системы координат XYZ , соответствующей полнофронтальному изображению лица с углами поворота $(0, 0, 0)$. При этом точного определения фронтального лица в ГОСТе не приводится. Для определения истинных углов поворота изображения необходимо ввести две системы координат: связанную с головой и опорную. Связанная с головой система координат $X_s Y_s Z_s$ определяется двумя ортогональными плоскостями: франкфуртской (или глазнично-ушной) горизонталью — плоскостью $X_s Z_s$, проходящей через верхние края отверстий наружного слухового прохода и нижнюю точку нижнего края левой орбиты, и плоскостью $Y_s Z_s$, перпендикулярной плоскости $X_s Z_s$ и проходящей через ось симметрии лица (центр переносицы, центр губ). Ось Z_s совпадает с линией пересечения плоскостей и направлена от поверхности лица. Опорная система координат XYZ

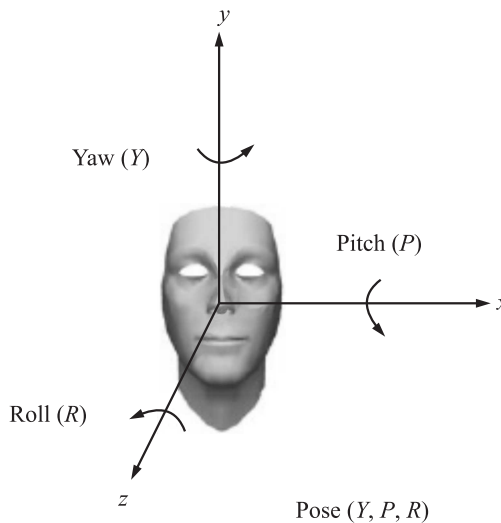


Рис. 6 Система координат для определения углов поворота лица

определяет виртуальную камеру, формирующую двумерное изображение, и представляется следующим образом: ось Y параллельна вертикальной оси плоскости изображения, ось X параллельна горизонтальной оси плоскости изображения, ось Z дополняет до правой системы координат и направлена от модели лица, центр расположен в середине двумерного изображения. Изображение считается фронтальным, когда оси опорной и связанной систем координат коллинеарны.

Для оценки точности определения углов поворота изображения лица была предложена методика, основанная на использовании трехмерных моделей лиц, получаемых путем трехмерного сканирования. Первым шагом в оценке точности является получение трехмерной модели лица человека со строго вертикальным расположением головы. Эта модель считается базовой, и к ней привязывается опорная система координат. На следующих этапах исследования модель поворачивается вокруг осей опорной системы координат на заданные углы и с нее строится проекция на фокальную плоскость. Эта проекция и считается изображением повернутого лица, по которому осуществляются оценки углов поворота изображения. На рис. 7 и 8 показаны трехмерные модели и соответствующие им синтетические изображения фронтального и повернутого лица, созданные по предлагаемой методике.

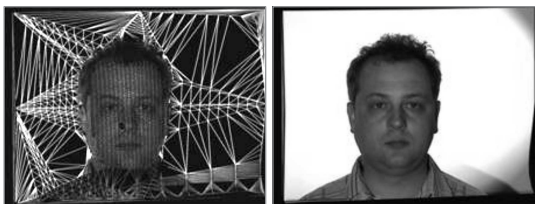


Рис. 7 Трехмерная модель и синтетическое изображение фронтального лица

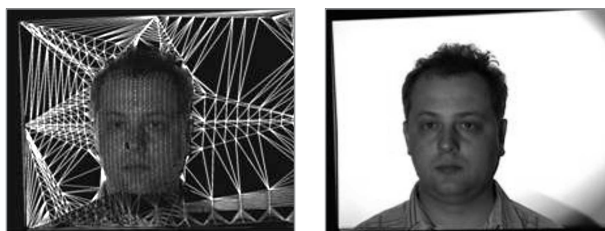


Рис. 8 Трехмерная модель и синтетическое изображение искусственно развернутого лица

Для получения трехмерной модели лица используется специализированный комплекс бесконтактных измерений, построенный на фотограмметрических принципах, позволяющих рассчитать

координаты заданной точки объекта по двум разноракурсным изображениям объекта, наблюдаемого стереосистемой видеокамер.

Для применения в задачах антропометрии система бесконтактных измерений должна удовлетворять ряду специфических требований, таких как безопасность и комфортность для объекта съемки (человека) и высокая скорость съемки, необходимая для устранения ошибок, вызванных невозможностью долгого сохранения неподвижности человеком. Кроме того, система бесконтактных антропометрических измерений должна измерять координаты поверхности с высоким разрешением и представлять их в форме компьютерной трехмерной модели (предпочтительно текстурированной) для последующего анализа. Изображение специализированного комплекса бесконтактных измерений приведено на рис. 9.



Рис. 9 Специализированный комплекс бесконтактных измерений

Система бесконтактных измерений включает:

- две камеры для технического зрения, предназначенные для захвата черно-белых изображений человека в структурированном свете и расчета трехмерных координат поверхности лица;
- цветную фотокамеру высокого разрешения для получения цветного изображения и фотореалистичного текстурирования трехмерной модели;
- портативный DLP-проектор для создания ПК-управляемого подсвета, обеспечивающего автоматизацию решения задачи стереоотожествления;
- персональный компьютер.

Предварительным этапом работы с фотограмметрическим комплексом бесконтактных измерений является калибровка [5, 6], т. е. оценка параметров модели камер, учитывающих нелинейные искажения, возникающие при формировании

изображений камерой. Калибровка системы позволяет обеспечить высокую точность измерений трехмерных координат объекта.

Внешнее ориентирование системы выполняется для оценки положения и ориентации камер в системе координат, задаваемой специальным тестовым объектом. В результате процедуры ориентирования, выполняемой по снимкам тестового сюжета, определяются координаты и углы поворота камер в заданной системе координат. В дальнейшем координаты точек поверхности объекта рассчитываются в системе координат, заданной ориентированием системы.

Для расчета трехмерных координат поверхности объекта и построения его трехмерной модели необходимо для каждой видимой точки объекта найти ее координаты на левом и правом изображениях (решить задачу стереоотождествления точек левого и правого изображений). Тогда с использованием результатов ориентирования стереосистемы (положения камер) рассчитываются трехмерные координаты точки.

Для автоматизированного решения задачи стереоотождествления соответственных точек изображения с левой и правой камер в системе применяется оригинальный кодированный подсвет объекта, минимизирующий число кадров, использующихся для расчета трехмерных координат поверхности объекта, при сохранении высокой плотности измерений.

Основные технические характеристики системы:

- время сканирования: $\sim 0,5$ с;
- время расчета трехмерной модели: 5 с;
- плотность измерения координат: 10–25 точек на мм^2 ;
- точность измерения пространственных координат: 0,5 мм.

Система выполняет следующие функции:

- сканирование и получение необходимого числа снимков лица для последующего использования при построении трехмерной модели лица;
- построение высокоточной трехмерной модели лица;
- текстурирование полученной трехмерной модели.

Для расчета трехмерных координат поверхности используются последовательности снимков с черно-белых камер, а в качестве текстуры служит цветной снимок высокого разрешения, получаемый с цифрового фотоаппарата. Текстурирование трехмерной модели выполняется автоматически на

основе данных ориентирования цифрового фотоаппарата.

С помощью описанной методики непосредственных трехмерных измерений были получены оценки точности косвенного оценивания параметров трехмерного позиционирования головы человека по монокулярному изображению, осуществляемого в описанной выше системе контроля качества изображений для персональных документов. Полученные оценки точности составляют около 1° для углов поворота относительно осей Z и Y и около 5° для поворотов относительно оси X . Худшая оценка точности при определении угла поворота относительно оси X связана с высокой вариабельностью вертикальных пропорций лица у разных людей.

7 Заключение

В статье представлен программно-аппаратный комплекс, предназначенный для автоматизации процесса получения цифровых фотографий, удовлетворяющих основным требованиям и рекомендациям ГОСТ ИСО/МЭК 19794-5-2006. Комплекс обеспечивает получение как фронтальных, так и условно-фронтальных цифровых фотографий лица, а также оценку в реальном времени основных характеристик изображения и параметров лица, подготовку изображений к печати с заданными размерами и разрешением, формирование изображений в биометрическом формате обмена данными, сохранение изображений в различных графических форматах.

Проведено исследование точности используемых алгоритмов косвенной оценки углов поворота лица относительно пространственных осей по монокулярному цифровому изображению. Для этого разработана специальная методика, основанная на использовании синтезированных ракурсных изображений реальных лиц, реконструированных по результатам трехмерного сканирования. Разработано алгоритмическое и программное обеспечение для моделирования и измерений, собран специализированный комплекс для бесконтактного трехмерного сканирования лиц. С использованием данного комплекса получены трехмерные модели и фотореалистические текстуры тестовых лиц. Полученная в результате оценки точность измерений составляет в среднем около 1° для углов поворота относительно осей Z и Y и около 5° для поворотов относительно оси X . Более низкая оценка точности при определении угла поворота относительно оси X связана с высокой вариабельностью вертикальных пропорций лица у разных людей.

Литература

1. *Freund Y., Schapire R.* A short introduction to boosting // J. of Japanese Society for Artificial Intelligence, 1999. Vol. 14. No. 5. P. 771–780.
2. *Viola P., Jones M.* Robust real time object detection // IEEE ICCV Workshop Statistical and Computational Theories of Vision, July 2001.
3. *Бекетова И. В., Каратеев С. Л., Визильтер Ю. В., Бондаренко А. В., Желтов С. Ю.* Автоматическое обнаружение лиц на цифровых изображениях на основе метода адаптивной классификации AdaBoost // Вестник компьютерных и информационных технологий, 2007. № 8. С. 2–6.
4. *Albiol A., Torres L., Delp E. J.* Optimum color spaces for skin detection // Conference (International) on Image Processing Proceedings, 2001. Vol. 1. P. 122–124.
5. *Schenk T. F.* Digital photogrammetry. — TerraScience, 1999.
6. *Luhmann T., Robson S., Kyle S., Harley I.* Close range photogrammetry, principles, methods and applications. — Whittles, 2006. 510 p.