

Модуль обнаружения витальности лица по спектральным характеристикам отражения кожи человека

© Н.М. Костылев, А.В. Горевой

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Разработан аппаратно-программный модуль обнаружения витальности лица, встраиваемый в систему распознавания человека по его изображению. Представлены взаимосвязи модуля обнаружения витальности и системы распознавания, сформулированы требования как к аппаратной, так и к программной частям модуля. Разработан алгоритм определения признаков витальности по спектральным характеристикам отражения кожи лица человека, обеспечивающий защиту от большинства известных фальсификаций. Создан макетный образец системы, проведены экспериментальные исследования, по результатам которых дана оценка надежности обнаружения витальности.

Ключевые слова: биометрические системы, изображения, цифровая обработка изображений, распознавание лица, обнаружение витальности, атака спуфинга.

В настоящее время системы распознавания человека как живого объекта применяются в различных системах обеспечения безопасности, в том числе в системах видеонаблюдения, контроля доступа, электронной коммерции, при раскрытии и предотвращении преступлений, в судебной экспертизе, пограничном контроле, медицине и других областях. Такими системами оборудованы современные телефоны, фотоаппараты, ноутбуки, телевизоры и многие другие приборы.

Распознавание человека как живого объекта может быть основано на трех важных принципах [1]:

- по собственности — пропуск, пластиковая карта, ключ или общегражданские документы;
- по знаниям — пароли, коды или другая информация;
- по биометрическим характеристикам. Этот подход наиболее интересен и подробно рассмотрен в представленной работе.

К биометрическим характеристикам относятся [2–4]: походка; узор отпечатка пальца; черты лица; рисунок радужной оболочки глаза и кровеносных сосудов на сетчатке глаза; форма кисти руки и распределение кровеносных сосудов в ней; тембр голоса; характеристики рукописного текста (почерка).

Независимо от применяемых в системе распознавания биометрических характеристик существует вероятность того, что злоумыш-

ленник предпримет попытку обмануть систему распознавания (атака на систему распознавания). Возможны атаки на различные компоненты системы обработки информации: на уровне сенсора, где принимается изображение или сигнал от индивидуума, а также на линии коммуникаций, на базу данных, где хранятся биометрические шаблоны и на модули сравнения и принятия решений [5]. Уровень защиты информации в компьютерных сетях и линиях передачи сегодня достаточно высокий. Противодействие атакам на уровне сенсора более затруднено, так как злоумышленник непосредственно имеет контакт с биометрическим сенсором и невозможно использовать криптографические и другие методы защиты. Следовательно, такие атаки представляют основную угрозу для систем распознавания.

Задачей злоумышленника, проводящего атаку на уровне сенсора, является сокрытие истинных биометрических характеристик или замена своих характеристик на характеристики другого человека. Попытка подмены биометрических характеристик называется атакой спуфинга (англ. *spoofing*). Спуфинг — это обман биометрических систем путем предоставления биометрическому сенсору поддельных искусственно сформированных объектов, обладающих необходимыми биометрическими характеристиками [6]. Такими объектами могут быть копии, муляжи, слепки с отпечатками пальцев, фотографии, видеозаписи, линзы с нанесенным изображением радужной оболочки глаза, манекены, маски лица, макияж, заранее записанные звуки и др.

Публикации об успешных спуфинг-атаках на биометрические устройства появились в научных и популярных изданиях в конце 1990-х годов [5]. В 1998 г. в журнале *Network Computing* появилась статья, где сообщалось о принятии фальшивых отпечатков за настоящие устройствами распознавания отпечатков пальцев [7]. Из шести протестированных устройств четыре оказались уязвимыми к атакам спуфинга. В ноябре 2002 г. в немецком журнале «*C't*» были опубликованы результаты тестирования различных биометрических устройств от ведущих производителей [8]. Тесты охватывали устройства распознавания отпечатков пальцев, лица и радужной оболочки глаз. Ни одна система не оказалась устойчивой к атакам спуфинга.

В связи с уязвимостью систем распознавания высока актуальность задачи по противодействию злоумышленникам. Одним из способов решения этой задачи является дополнительный анализ признаков витальности обнаруживаемых объектов. Витальность — жизненная сила, в приложении к биометрическим системам означает принадлежность к жизненным явлениям. Анализ витальности позволяет преодолеть часть атак спуфинга на биометрические системы распознавания, в которых предъявляемые поддельные образцы не обладают свойствами, характерными для живых объектов.

Целью данной работы является разработка принципов создания модуля обнаружения витальности лица для систем распознавания человека по изображению его лица. Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- определение взаимодействия системы распознавания и модулей обнаружения витальности;
- разработка алгоритма определения признаков витальности;
- разработка методики оценки эффективности модуля витальности;
- проведение экспериментальных исследований.

Задача обнаружения витальности рассматривалась как приложение к задаче распознавания. При таком подходе в первую очередь необходимо определить место модуля анализа витальности в структуре системы распознавания.

В алгоритмическую часть любой системы распознавания входят три модуля [2]: вычисления, анализа информативных признаков и принятия решений о результатах распознавания. Для защиты от атак спуфинга, кроме алгоритмических модулей в систему распознавания могут входить и другие модули, например алгоритм обнаружения атак на биометрическую систему (в частности, алгоритм анализа признаков витальности).

В аппаратную часть системы распознавания, как правило, входят следующие функциональные блоки: биометрический сканер, базы данных (БД) и ЭВМ.

Рассмотрим основные этапы работы алгоритма обнаружения витальности. На первом этапе происходит обработка данных, полученных с биометрического сканера. Априорное понятие живого объекта включает множество различных характеристик, отличающих его от искусственно сформированного. Поэтому в процессе обработки данных вычисляется несколько независимых количественных оценок признаков витальности.

На втором этапе выполняется сравнение рассчитанных значений с эталонными значениями соответствующих признаков живого и искусственного объектов. База таких эталонных значений векторов признаков является аналогом БД системы распознавания. В результате формируется вектор, каждый элемент которого характеризует вероятность того, что наблюдаемый объект является настоящим биологическим объектом с точки зрения той или иной характеристики.

С точки зрения встраивания алгоритма обнаружения витальности в алгоритмическую часть системы распознавания важным является вопрос о взаимосвязи информативных признаков распознавания и признаков витальности. Для типичной системы распознавания многие биометрические особенности человека являются помехой, мешающей корректному распознаванию. К таким особенностям можно

отнести зависимость параметров отраженного сигнала от спектра падающего излучения, влияние ракурса регистрации на результат распознавания в связи с наличием трехмерного рельефа, непостоянство этого рельефа, обусловленное мимикой, речью, морганием, эмоциями и др.

Для решения задачи обнаружения витальности эти факторы являются не помехами, а признаками, позволяющими отличить настоящие биометрические объекты от подделки. Кроме перечисленных выше особенностей человека, признаками витальности могут быть специфические свойства кожи или тканей глаза, наличие пульсаций в сосудах и капиллярах, самопроизвольное движение глаза, аккомодация, наличие естественной реакции на определенное воздействие. Таким образом, набор признаков витальности принципиально отличается от словаря признаков распознавания. В целом алгоритм обнаружения витальности не зависит от базы данных розыска, от выбранных структуры биометрического шаблона и методов сравнения полученных образов с образами из БД. Поэтому можно ставить задачу разработки таких алгоритмов как независимых модулей, которые могут функционировать совместно с любой системой распознавания.

Существуют ограничения на применение различных алгоритмов обнаружения витальности в системах распознавания. Одним из таких ограничений является принадлежность признаков распознавания и признаков витальности одному биометрическому объекту. Например, в системе распознавания человека по радужной оболочке глаза целесообразно использовать признаки витальности в области глаза, а в системе распознавания по отпечаткам пальцев — признаки витальности пальцев человека. Поэтому наиболее экономичным вариантом является использование в системе обнаружения витальности биометрического сканера системы распознавания. В этом случае дополнительные средства регистрации не требуются. С точки зрения экономичности для расчетов целесообразно использовать и вычислительные средства системы распознавания. Данное требование накладывает определенные ограничения на вычислительную сложность алгоритма обнаружения витальности.

В зависимости от способа взаимодействия с регистрируемым человеком системы распознавания подразделяют на [9]:

- кооперативные — человек, желающий пройти процедуру распознавания, предпринимает для этого специальные действия, например обращает лицо к камере, приближается глазом к окуляру или проводит пальцем по сканеру;
- некооперативные — распознавание происходит без специального участия человека.

В модуле анализа витальности целесообразно применить соответствующий способ взаимодействия с регистрируемым человеком. При наиболее экономичном исполнении система обнаружения витальности включает в себя только программные модули. Однако для обеспечения достаточно высокой надежности обнаружения подделки возможностей обычного биометрического сканера может быть недостаточно. При разработке биометрического сканера с функцией обнаружения витальности необходимо найти компромисс между надежностью и экономичностью.

Общий алгоритм работы системы распознавания с функцией обнаружения витальности можно представить определенной последовательностью процедур.

1. Получение информации, регистрируемой биометрическим сканером.
2. Выделение из полученной информации признаков распознавания и признаков витальности.
3. Сравнение полученных признаков витальности с эталонными.
4. Принятие решения о принадлежности биометрических характеристик искусственному объекту или живому человеку.
5. Сравнение полученных информативных признаков объекта с признаками, содержащимися в БД системы распознавания.
6. Принятие решения о том, относится ли распознаваемый объект к одному из классов БД.

В настоящее время в биометрии преобладают три технологии идентификации личности: распознавание по изображению лица, по отпечаткам пальцев и по радужной оболочке глаз. Удельный вес трех указанных технологий составляет по разным подсчетам от 85 до 95 %. Особый интерес представляют биометрические системы, основанные на распознавании лица, так как в отличие от остальных они могут работать в некооперативном режиме. С одной стороны, это является достоинством таких систем, поскольку значительно увеличивает пропускную способность постов контроля, но, с другой стороны, достаточно легко организовать атаку спуфинга на систему.

В данной работе рассматривается задача обнаружения витальности в системе распознавания лица человека, в которой для регистрации применяется одна цветная телевизионная камера. В соответствии с требованиями, изложенными выше, в модуле анализа витальности также должны использоваться биометрические характеристики в области лица, а регистрации должна осуществляться некооперативным способом.

Проведенный анализ методов обнаружения витальности лица показал, что одним из подходов, обеспечивающих устойчивость системы распознавания к атакам спуфинга с использованием большинства

существующих подделок, является анализ спектральных характеристик отражения кожи человека [10]. Данный подход был взят за основу при реализации алгоритма обнаружения витальности.

Известно [11], что зависимость спектрального коэффициента отражения кожи человека от длины волны падающего излучения имеет достаточно сложный вид. Графики спектральных коэффициентов отражения кожи людей различных этнических групп приведены на рис. 1. Присутствующие локальные минимумы и максимумы обусловлены наличием гемоглобина во внутреннем слое кожи. Спектральные характеристики отражения большинства искусственных материалов, используемых для изготовления подделок, не имеют локальных минимумов или максимумов [10]. Для изготовления муляжей пальцев или масок лица обычно применяется силикон. Также для маскировки лица может использоваться грим.

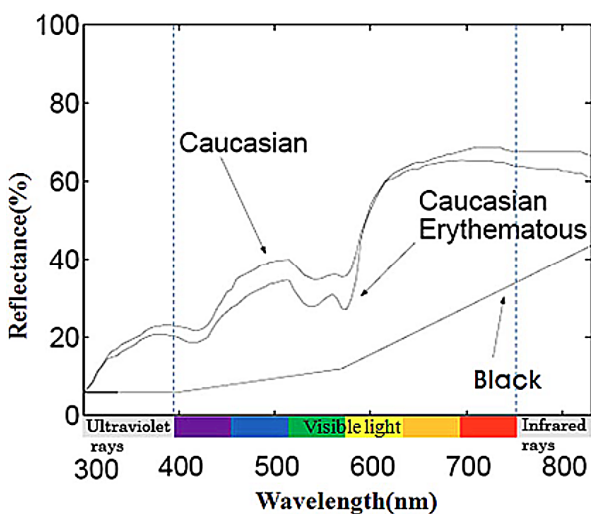


Рис. 1. Графики спектральных коэффициентов отражения кожи людей различных этнических групп [10]

В алгоритме определения признаков витальности, приведенном в работе [10], измерение коэффициента отражения кожи осуществлялось только в двух точках. Таким образом, при изготовлении подделки может быть подобрана такая краска, график спектрального коэффициента отражения которой является монотонным и проходит через две указанные точки. Для обмана такой системы обнаружения витальности достаточно при изготовлении маски выдержать определенное соотношение красной и зеленой составляющих краски.

Предлагается для обнаружения характерных локальных минимумов проводить измерения коэффициента отражения не менее чем на трех длинах волн. В соответствии с экстремумами спектрального ко-

эфициента отражения кожи человека рекомендуется использовать следующие длины волн: 500, 549 и 633 нм. При этом цветные телевизионные камеры в системах распознавания также имеют три спектральных канала, однако ширина полосы пропускания каждого канала слишком велика для проведения точной спектральной селекции. Следовательно, необходимо дополнительное оборудование, позволяющее более точно измерять коэффициенты отражения на приведенных длинах волн.

Для проведения экспериментальных исследований разработан макетный образец экспериментальной установки, в состав которой входят система регистрации, система освещения и вычислительная техника для обработки зарегистрированных изображений. Система освещения содержит специально подобранные компактные люминесцентные лампы, полосы излучения которых совпадают с окнами пропускания фильтров. В состав системы регистрации (рис. 2) помимо основной цветной камеры системы распознавания входят три дополнительные камеры, оснащенные интерференционными фильтрами с максимальным пропусканием на указанных длинах волн (500, 549 и 633 нм). Ширина полосы пропускания каждого фильтра 15 нм.



Рис. 2. Система регистрации

Для анализа признаков витальности по четырем зарегистрированным изображениям разработан следующий алгоритм. На цветном изображении алгоритмом детекции, который построен на базе мето-

да, описанного в работе [12], селектируется область лица — так называемая область интереса. На остальных трех изображениях область интереса определяется с использованием известного преобразования между камерами: считается, что все изображения получены практически одновременно. Применение такого преобразования рассмотрено в работе [13], параметры преобразования определяются в результате геометрической калибровки системы регистрации с использованием алгоритма, предложенного в работах [14, 15]. Результат выполнения процедуры выделения области интереса представлен на рис. 3.



Рис. 3. Выделение области интереса на изображениях, полученных в разных каналах

На следующем шаге в пределах области интереса выполняется процедура селекции пикселей, представляющих основной цвет лица. Целью данной процедуры является выделение областей, представляющих открытые участки человеческой кожи, пригодные для измерения спектральных характеристик отражения. Такая селекция проводится с использованием цветного изображения; маска переносится на изображения, полученные в других спектральных каналах,

аналогично изложенному выше. Основой алгоритма селекции подходящих участков является анализ цветовых характеристик изображения в пространстве HSV с использованием критериев, сходных с описанными в работе [16], а также анализ градиента изображения с целью выбора наиболее равномерных участков. Определение характеристик отражения кожи по таким участкам, а также усреднение по площади делают определение характеристик отражения кожи устойчивым к погрешностям совмещения изображений в отдельных каналах.

На рис. 4 приведен результат селекции. Для компактности представления изображения в оттенках серого цвета для трех спектральных каналов наложены друг на друга (а) аналогично тому, как это сделано для изображения, полученного с цветной камеры (б).

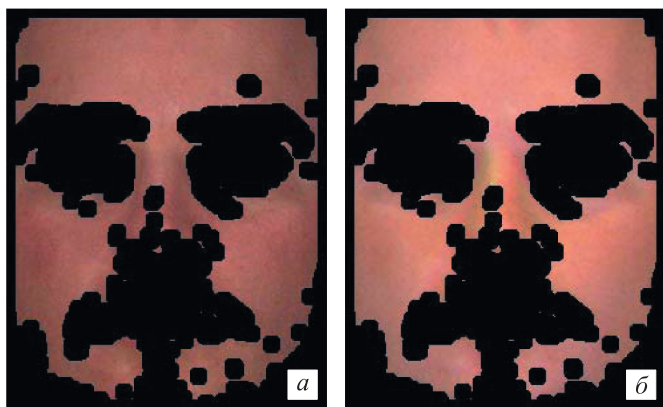


Рис. 4. Результат селекции областей, используемых для анализа спектральных характеристик кожи лица

После окончательного выделения анализируемых участков каждый пиксел представляется вектором $\mathbf{v} = (r, g, b, x, y, z)^T$, координатами которого являются значения данного пиксела на цветном изображении (r, g, b) и его значения, полученные с каждого из трех спектральных каналов (x, y, z) . Для того чтобы результат анализа зависел только от цветовых характеристик и не зависел от общей освещенности, используются нормированные координаты:

$$\begin{aligned} r_n &= \frac{r}{r+g+b}; & g_n &= \frac{g}{r+g+b}; & b_n &= \frac{b}{r+g+b}; \\ x_n &= \frac{x}{x+y+z}; & y_n &= \frac{y}{x+y+z}; & z_n &= \frac{z}{x+y+z}. \end{aligned} \quad (1)$$

Для анализа спектральных характеристик отражения отбираются по две любые цветовые координаты из каждой тройки, а полученный

вектор признаков $\mathbf{v}_n = (r_n, g_n, x_n, y_n)^T$ усредняется по выделенной области анализа. Вследствие линейчатого спектра источника излучения, используемого для подсветки, элементы такого вектора сильно коррелированы, поэтому для выделения независимых признаков используется метод главных компонент [17]. По результатам исследований обучающей выборки (рис. 5), в которой представлены изображения восьми человек, двух масок (mask1, mask2) и одной распечатанной на цветном принтере фотографии (photo), было обнаружено, что для надежного выделения настоящих лиц достаточно использовать две главные компоненты пространства векторов \mathbf{v}_n .

На рис. 5, а приведено распределение значений вектора признаков $\mathbf{v}_c = (c_1, c_2)^T$ для объектов обучающей выборки в пространстве двух выделенных главных компонент для разных объектов (лиц, масок и фотографии), крестиками отмечены результаты отдельных измерений, кружками — средний результат для каждого объекта по серии изображений, полученных под разными ракурсами. В качестве критерия близости объекта по спектральным характеристикам можно использовать апостериорное распределение вероятности соответствия объекта живому человеку, рассчитанное по тестовой выборке

$$P(\mathbf{v}_c | \mathbf{v}_c^0, \Sigma_c) = \frac{1}{2\pi\sqrt{|\Sigma_c|}} \exp\left(-\frac{1}{2}(\mathbf{v}_c - \mathbf{v}_c^0)^T \Sigma_c^{-1} (\mathbf{v}_c - \mathbf{v}_c^0)\right), \quad (2)$$

где \mathbf{v}_c^0 — среднее значение вектора признаков для группы людей; Σ_c — матрица ковариации.

Значению выражения (2), умноженному на некоторую константу, соответствуют линии равного уровня на рис. 5, а. Из анализа данных следует, что кожа людей образует достаточно компактный кластер, маски (крайний справа и крайний слева объекты) и фотографию (крайний сверху объект) удастся надежно выделить при помощи предлагаемого двумерного критерия. Использование аналогичного одномерного критерия — с анализом только одной главной компоненты (результат работы такого критерия на той же самой тестовой выборке приведен на рис. 5, б) или только трех спектральных каналов без учета изображения, полученного с цветной камеры (результат работы двумерного критерия без учета цветного изображения приведен на рис. 5, в), позволяет практически с той же надежностью выделять маски, но не фотографии.

Следует отметить, что выделяемый вектор признаков зависит не только от коэффициента отражения объекта, но также от числа, расположения и спектральных характеристик источников излучения, характеристик чувствительности и параметров настройки используемых

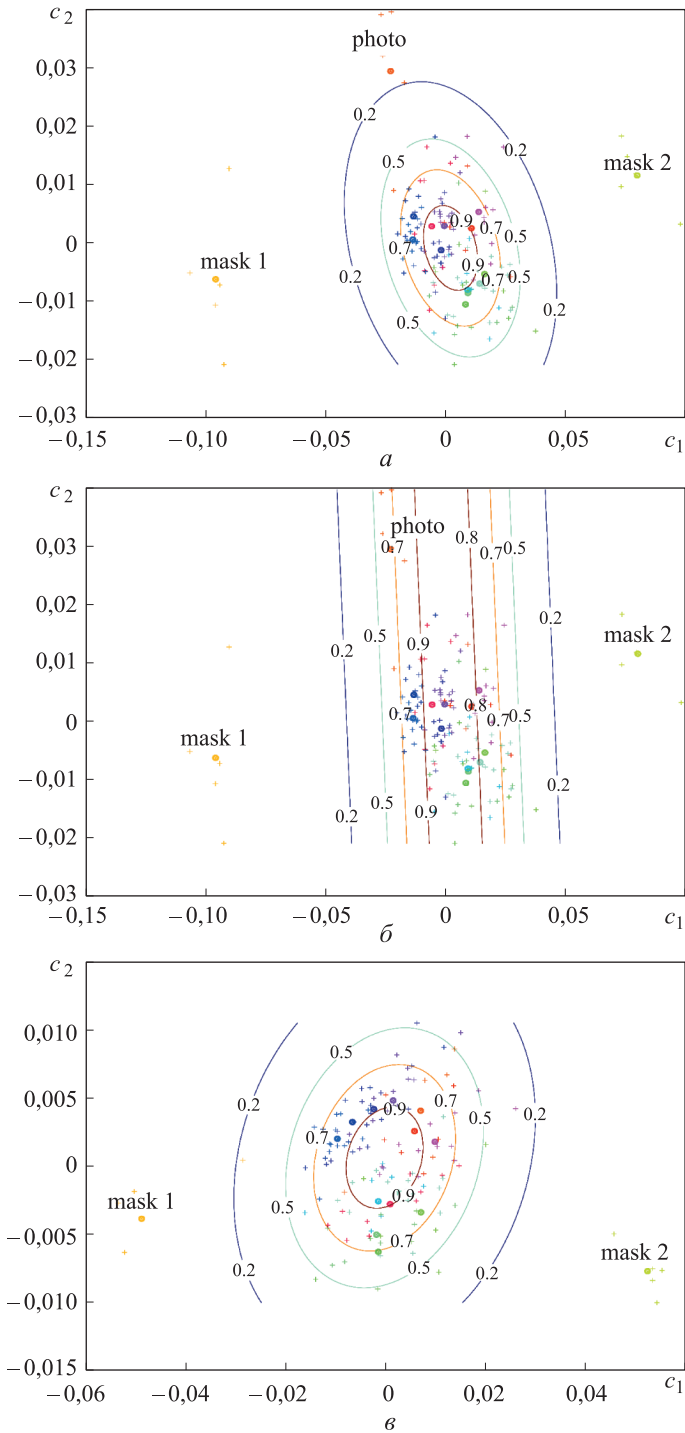


Рис. 5. Распределение значений тестовой выборки в двумерном пространстве признаков:
a — линии уровня показаны для двумерного распределения вероятности; *b* — для одномерного распределения вероятности; *c* — с использованием данных только трех спектральных каналов

камер и других факторов. Для обеспечения устойчивости выделяемых признаков к изменениям внешней обстановки и параметров регистрирующих устройств необходимо проводить калибровку системы по объекту с известной спектральной характеристикой коэффициента отражения. В качестве такого объекта выбран белый лист бумаги, который предъявляется системе перед началом работы. Поскольку коэффициенты отражения калибровочного объекта на разных длинах волн известны, можно определить нормировочные коэффициенты для каждого из каналов и использовать их при обработке изображений на стадии вычисления v_n .

В качестве двух основных характеристик биометрической системы приняты вероятности ошибок первого и второго рода. В биометрии их называют FAR (False Acceptance Rate) и FRR (False Rejection Rate) [9]. По результатам исследования имеющейся обучающей выборки выбрано значение критерия $FAR = FRR = 0$. Это значение соответствует линии уровня 0,2 на рис. 5, а. В результате испытаний на тестовой выборке, включающей двадцать человек, три маски и три фотографии лица, при выбранном значении критерия получены следующие значения вероятностей: $FAR = 0,05$, $FRR = 0,09$.

Таким образом, полученные результаты подтверждают высокую степень эффективности предложенного в работе модуля анализа витальности для защиты системы распознавания человека по изображению лица от атак спуфинга.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Мальцев А. Основы биометрии. *Habrahabr*, 2011. <http://habrahabr.ru/post/126774/> (дата обращения 21.01.2013).
- [2] Woodward J. Privacy's Foe or Privacy's Friend. *Proc. IEEE*, 1997, no. 9, vol. 85, pp. 1480–1491.
- [3] Кухарев Г.А. *Биометрические системы*. Москва, Политехника, 2001, с. 52–70.
- [4] Алгулиев Р.М., Имамердиев Р.М., Мусаев В.Я. Методы обнаружения живучести в биометрических системах. *Биометрические методы и средства защиты информации*, 2009.
- [5] Ratha N.K., Connell J.H., Bolle R.M. Enhancing Security and Privacy in Biometrics-Based Authentication Systems. *IBM Systems Journal*, 2001, vol. 40, no. 3, pp. 614–634.
- [6] Matsumoto T. Impact of Artificial "Gummy" Fingers on Fingerprint Systems. *Optical Security and Counterfeit*, 2002, no. IV, vol. 4677, pp. 275–289.
- [7] Thalheim L., Krissler J. Body Check: Biometric Access Protection Devices and their Programs Put to the Test. *C't Magazine*, 2002, no. 10.
- [8] Мальцев А. Современные биометрические методы идентификации. *Habrahabr*, 2011, vol. 1. URL: <http://habrahabr.ru/post/126144/> (дата обращения 18.01.2013).
- [9] Костылев Н. М., Трушкин Ф.А., Колочкин В.Я. Обнаружение витальности человека по спектральным характеристикам кожи лица. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, Москва, 2012, спецвыпуск № 9, с. 75–85.

- [10] Kim Y. Masked Fake Face Detection Using Radiance Measurements. *Optical Society of America*, 2009, no. 4, vol. 26.
- [11] Viola P., Jones M. Robust Real-Time Face Detection. *International Journal of Computer Vision*, 2004, vol. 57, pp. 137–154.
- [12] Hartley R.I., Zisserman A. *Multiple View Geometry*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2000, pp. 93–99.
- [13] Zhang Z. Flexible Camera Calibration by Viewing a Plane from Unknown Orientations. *Proc. of International Conference on Computer Vision*, 1999, pp. 666–673.
- [14] Bouquet J.Y. *Camera Calibration Toolbox for Matlab*. URL: http://www.vision.caltech.edu/bouquetj/calib_doc/ [Online; accessed 18.06.2013].
- [15] Vezhnevets V., Sazonov V., Andreeva A. A Survey on Pixel-Based Skin Color Detection Techniques. *Proc. of GRAPHICON-2003*, 2003, pp. 85–92.
- [16] Jolliffe I. T. *Principal Component Analysis*. New York, NY, USA: Springer, 2002, pp. 152–158.

Статья поступила в редакцию 03.07.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Костылев Н.М., Горовой А.В. Модуль обнаружения витальности лица по спектральным характеристикам отражения кожи человека. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 9. URL: <http://engjournal.ru/catalog/pribor/optica/925.html>

Костылев Никита Михайлович родился в 1987 г., окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2010 г. Аспирант кафедры «Лазерные и оптико-электронные системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Специализируется в области проектирования оптико-электронных приборов наблюдения. e-mail: kostylevnm@gmail.com

Горовой Алексей Владимирович родился в 1987 г., окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2010 г. Аспирант кафедры «Лазерные и оптико-электронные системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Специализируется в области цифровой обработки изображений, регистрации трехмерных образов объектов, проектирования оптических систем. e-mail: gorevoy.a@gmail.com