

УДК 004.931

РАСПОЗНАВАНИЕ ЛИЧНОСТИ ПО ТЕРМОГРАФИЧЕСКИМ ИЗОБРАЖЕНИЯМ ЛИЦА: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ, ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

Черемисина Евгения Наумовна¹, Баша Наталия Сергеевна²

¹Академик РАН, д.т.н., проф., директор Института системного анализа и управления, заведующая кафедрой САУ;
ГБОУ ВПО «Международный Университет природы, общества и человека «Дубна»,
Институт системного анализа и управления;
141980, Московская обл., г. Дубна, ул. Университетская, 19;
e-mail: e.cheremisina@geosys.ru.

²Аспирант;
ГБОУ ВПО «Международный Университет природы, общества и человека «Дубна»,
Институт системного анализа и управления;
141980, Московская обл., г. Дубна, ул. Университетская, 19;
e-mail: natalia.basha@niira.ru.

В работе представлено развитие различных подходов к исследованию термографических изображений лица человека для задач аутентификации личности. Проанализировано современное состояние систем распознавания личности по термографическим изображениям.

Ключевые слова: распознавание образов, системный анализ, анализ изображений, компьютерное зрение, термография, аутентификация личности, биометрия.

RECENT ADVANCES IN THERMAL FACE RECOGNITION – A REVIEW

Cheremisina Evgenia¹, Basha Natalya²

¹Academician of RANS, Doctor of Science in Engineering, Professor, Director of the Institute of Systems Analysis and Management, Head of «Systems Analysis and Management» department;
Dubna International University of Nature, Society and Man,
Institute of system analysis and management;
141980, Dubna, Moscow reg., Universitetskaya str., 19;
e-mail: e.cheremisina@geosys.ru.

²PhD student;
Dubna International University of Nature, Society and Man,
Institute of system analysis and management;
141980, Dubna, Moscow reg., Universitetskaya str., 19;
e-mail: natalia.basha@niira.ru.

This paper provides an up-to-date review of the state of the art on Infrared face recognition techniques. Presents different approaches to study thermal images of human faces for individual authentication problem.

Keywords: pattern recognition, system analysis, image analysis, computer vision, thermal images, individual authentication, biometrics.

Введение

Термография – одно из молодых, но перспективно развивающихся направлений аутентификации личности по биометрическим данным. Термографический образ (термограмма) – изображение объекта, полученное камерой, регистрирующей инфракрасное излучение объекта (человека). Для получения термографических изображений используются специальные тепловизионные камеры: тепловизоры и термографы. Различные системы диагностики и контроля на базе тепловизоров и термографов нашли широкое применение в промышленности и технике (неразрушающий контроль, техническая и медицинская диагностика). Достоинствами метода являются высокая информативность, бесконтактность, неинвазивность, простота, наглядность, повторяемость и полная безопасность.

Являясь бесконтактным методом, термографическое наблюдение позволяет:

- получать данные об объекте в условиях изменяющейся освещенности (в том числе в полной темноте);
- получать данные в случае, когда объект находится на удалении;
- пресекать попытки фальсификации личности посредством внешней маскировки объекта или муляжа;
- отличить внешне сложно различимых людей (близнецов, близких родственников).

Эти отличительные черты позволяют применять термографическое наблюдение в тех условиях, когда получение изображения с видеокамеры недостаточно для реализации поставленных целей. Достоинства рассматриваемого метода позволяют использовать термографические изображения в задачах биометрической аутентификации личности.

Работы, связанные с задачами распознавания лиц в отраженном ИК-диапазоне (0,9-2,4 мкм), ведутся последние 10 лет и решаются с помощью высокочувствительных видеокамер, работающих в ИК-диапазоне. Однако возможность применять тепловизионные камеры, регистрирующие инфракрасное излучение человека в среднем (3-5 мкм) и дальнем (8-4 мкм) диапазоне, для данного рода исследований появилась недавно.

Областями применения систем распознавания личности по термографическим изображениям лица могут стать:

- Системы контроля доступа. Такие системы могут обеспечить дополнительный контроль доступа как к физическим объектам, так и к различным информационным ресурсам.
- Интеллектуальные системы видеонаблюдения. Применение термографических данных позволит эффективно распознавать людей даже в помещениях без освещения или на открытом воздухе в темное время суток.

Данная работа посвящена описанию перспективных методов автоматической аутентификации личности по термографическим изображениям.

1. Тепловое излучение человека

Человек, как биологическое тело, имеет температуру в интервале от 32 до 42°C и является источником преимущественно инфракрасного излучения. Основная часть собственного излучения кожи человека приходится на диапазон волн с длиной от 4 до 50 мкм, а максимальная спектральная плотность лежит около 10 мкм. В целом, на длину волны до 5 мкм приходится около 1% всего излучения, от 5 до 9 мкм – 20%, от 9 до 16 мкм – 30% и на более длинноволновое излучение – 41% [1]. В длинноволновой инфракрасной области кожа человека излучает, а следовательно и поглощает излучение, как абсолютно черное тело независимо от возраста, степени пигментации и других особенностей.

Тело человека имеет многослойную структуру (кожа, подкожно-жировая клетчатка, мышцы и т.д.), в которой каждый слой имеет свою диэлектрическую проницаемость. В зависимости от области обследования толщина и количество слоев различны, и приборы, работающие в конкретных диапазонах, будут измерять температуру на различной глубине.

Глубина эффективности измерения температуры равна толщине излучающего слоя и определяется как расстояние, на которое распространяется электромагнитная волна от поверхности объекта до того слоя, в котором ее интенсивность уменьшается в 2,73 раза. Поэтому измерение теплового излучения тела человека в инфракрасном диапазоне дает истинную температуру только самого верхнего слоя кожи толщиной в доли миллиметра. О температуре подлежащих тканей и органов можно судить опосредованно и только когда температурные изменения «проецируются» на кожные покровы.

Диагностические возможности медицинского тепловидения основаны на оценке особенностей распределения на поверхности тела зон излучения инфракрасного (3-5 и 8-13 мкм) диапазона.

2. Факторы, влияющие на тепловое излучение человека

Теплоизлучение человеческого тела, согласно закону Стефана-Больцмана, пропорционально четвертой степени температуры его поверхности. Следовательно, теплоизлучение тела, прежде всего связано с температурой его кожи. Значения его могут меняться в широких пределах и зависят от многих факторов.

При нормальных условиях температура кожи ниже температуры внутренних органов и находится в пределах 30,5-35,5°C. Так как кожа является покровом, отделяющим внутренние органы от окружающей среды, ее температура должна зависеть как от состояния внутренних органов, так и от внешней среды. Факторы, от которых зависят колебания кожной температуры, делятся на внешние (температура воздуха, влажность воздуха, скорость обдува, наличие локальных или общих источников тепловой энергии) и внутренние (скорость кровотока, сосудистые реакции, регуляция теплообмена конвекцией, испарением, радиацией, теплопроводность тканей, конвекция системного кровотока, конвекция кожного кровотока, интенсивность обменных процессов в подлежащих тканях).

Из внутренних факторов напрямую определяют формирование температурных полей кожи особенности ее кровоснабжения (скорость кровотока, объем протекающей крови и состояние артерий, артериол и капилляров).

Температура кожи является интегральным показателем, и в ее формировании принимают участие несколько факторов [1]:

Сосудистая сеть. Величина кожного кровотока нестабильна и меняется как при изменении температуры окружающей среды, так и при изменениях внутренней температуры. Регуляция температуры кожи, в основном осуществляется изменением просвета периферических сосудов. Охлаждение кожи вызывает замедление кровотока и сужение поверхностных сосудов. При этом возникает так называемый «поперечный температурный градиент» – разница температуры между поверхностными и глубинными слоями кожи. Такая разница позволяет организму сохранить тепло. В противной ситуации (при нагревании кожных покровов) кровоток перераспределяется в сторону поверхностных сосудов, что облегчает отвод тепла во внешнюю среду.

Уровень обменных процессов. Кожа как орган имеет свои собственные физиологические системы, работа которых приводит к изменению ее температурных параметров. Интенсивность этих процессов (а, следовательно, и количество вырабатываемого в них тепла), невелика и достаточно постоянна. В связи с этим собственная теплопродукция кожи вносит относительно постоянный и незначительный вклад в кожную температуру.

Теплопроводность. Теплопроводность кожи зависит, в основном, от величины подкожно-жировой клетчатки, и чем она более развита, тем ниже теплопроводность. Жировая ткань, обладающая высокими изолирующими свойствами, – основной фактор, блокирующий передачу тепла на поверхность.

Теплопередача. Изменение температуры кожи вследствие теплопередачи наблюдается в местах расположения крупных внутренних органов и сосудов. Например, в области печени, сердца.

Температурные реакции в живых тканях формируются и в результате метаболического фактора, т.к. он сопровождает любую совершающуюся в клетках того или иного органа работу. Уровень обменно-метаболических процессов в коже и, особенно в подлежащих тканях – также важный фактор, определяющий термотопографию тела человека.

Таким образом, тепловая картина любой области – это результат двух основных составляющих: сосудистого фактора и метаболизма. При анализе термограмм должны учитываться все эти факторы, однако главным из них является сосудистый, который преимущественно и определяет формирование картины конкретных тепловизионных симптомов.

3. Предпосылки появления и развития методов распознавания личности по термографическим изображениям

Первые работы, связанные с распознаванием лиц по термографическим изображениям проводились в MIKOS [2] в 1992 году. В них было продемонстрировано, что термограммы лиц уникальны для каждого индивида. Первые методы распознавания основывались на анализе контуров на термограммах (Prokoski [3], Wilder [4]).

Cutler [5] был первым, кто применил метод *eigenfaces* для термографических изображений. И сравнил полученные результаты с распознаванием лиц в видимом диапазоне.

Появлению первых методов аутентификации человека по термографическим изображениям предшествовал ряд научных исследований:

- Sokolinsky [6,7] установили устойчивость термографических изображений к изменениям освещенности в сравнении с видимыми изображениями. Эти исследования были продолжены и было установлено, что термографические изображения, снятые в лабораторных условиях и на открытом воздухе с естественной освещенностью, распознаются одинаково [8]. Для изображений видимого диапазона, распознавание на улице при естественном освещении происходит значительно хуже.
- Chen исследовал влияние фактора «старения» на термографические изображения, в сравнении с изображениями видимого диапазона [9, 10, 11]. Для этого исследования фотографии и термограммы для базы данных и для сравнения с базой собирались в разное время (от нескольких часов до недели). Автор показал, что результат распознавания для видимых изображений ухудшается быстрее чем для термограмм. Из этого был сделан вывод, что термограммы более устойчивы к фактору старения.
- Другое важное свойство термографических портретов было получено Friedrich [12]. Он установил, что инфракрасные изображения меньше подвержены изменениям при небольших наклонах и поворотах головы и различных выражениях лица, в отличии от изображений видимого диапазона.

4. Современное состояние методов распознавания личности по термографическим изображениям

Можно выделить два основных направления исследований по распознаванию личности по термографическим изображениям:

1. Адаптация и модификация методов распознавания видимых изображений для термографических изображений.
2. Методы, основанные на уникальных данных, получаемых в тепловом диапазоне.

Первое направление

Два самых популярных метода распознавания лиц – метод главных компонент (РСА) и метод «собственных лиц» («*eigenfaces*») [13], нашли широкое применение в распознавании термограмм. Mian [14] показал, что термографические портреты более устойчивы для распознавания, по сравнению с видимыми изображениями. Это является следствием того, что термографические портреты одного человека более схожи между собой, чем изображения, зарегистрированные в видимом диапазоне.

Для уменьшения влияния индивидуальных изменений на качество распознавания, Akhloufi и Bendada в [15] предложили использовать Байесовский подход. Основой метода является анализ глав-

ных компонент (РСА). В данном подходе решение о принадлежности к классу пользователя принимается после вычисления вероятностной меры сходства, основанной на Байесовом анализе максимального правдоподобия для разницы двух изображений.

Исследователи делают ставку на эти методы в случаях, когда невозможно получить видимое изображение. Поэтому широкое распространение получили методы, комбинирующие аутентификацию по видимым и термографическим изображениям.

Перспективным направлением является распознавание в видимом и сразу в нескольких тепловых диапазонах длин волн [16].

Второе направление

Второе направление представлено более разнообразно.

Исследователи из Университета Лавала (Laval University), Канада, Moulay A. Akhloufi и Abdelhakim Bendada предложили метод выделения области лица (рис. 1,а) с помощью краевой детекции Собеля (Sobel edge detection), используя эллиптическую маску [17].



Рис. 1. а) выделение области лица с помощью краевой детекции Собеля; б), в) пример изотерм двух верхних слоев одного лица

Распознавание лиц основано на физиологических особенностях человека. На лице существуют разные области с одинаковой температурой (эквитермальные регионы), связанные с подкожным кровеносным рисунком лица. В [19] показано, что данный рисунок уникален для каждого человека.

По выделенной области лица строится 8 эквитермальных регионов (7 для температур лица и одна для фона), называемые изотермами (рис. 1, б, в). Полученные изображения обрабатываются, используя морфологические операции: заполняются маленькие разрывы между выделенными участками, устраняются шумы и на результирующем изображении выделяется скелет. Эти скелеты, соответствующие разным температурным диапазонам и являются векторами признаков для различных термографических изображений. В режиме распознавания сравниваются соответствующие изотермы двух термограмм и вычисляется Евклидово расстояние.

Снимки, используемые в статье, получены в средневолновом ИК спектре (3-5мкм) с использованием FLIR Phoenix camera.

Заявленное в статье качество идентификации составляет 100%, но не приведены размеры и состав тестируемой базы.

Предложенный подход заинтересовал наглядностью и легкостью воспроизведения. Мы повторили описанный в статье алгоритм на термограммах, снятых термографом IRTIS 2000ME. Построили изотермы для термограмм, снятых в различных условиях (рис. 2). Рисунок демонстрирует, что при разных условиях внешней среды, в заданный температурный диапазон попали различные области.



Рис. 2. Изотермы, полученные с термограмм, снятых термографом IRTIS 2000ME в разных условиях окружающей среды: а) при температуре -5°C ; б) при температуре 22°C

Рассмотренный метод может быть удачно применен в случае, когда термографические изображения для Базы Данных и контрольные термограммы получены в одинаковых условиях.

В статьях [18, 19] предложен алгоритм выделения системы признаков, описывающей венозный рисунок лица человека.

Предобработка изображения заключается в выделении области интереса (лица): для этого вручную отмечают набор областей, соответствующих фону и вычисляют Байесовое распределение температур; пороговой фильтрацией удаляют фон (рис. 3, б); восстанавливают «дыры» и убирают шумы (рис. 3, в).

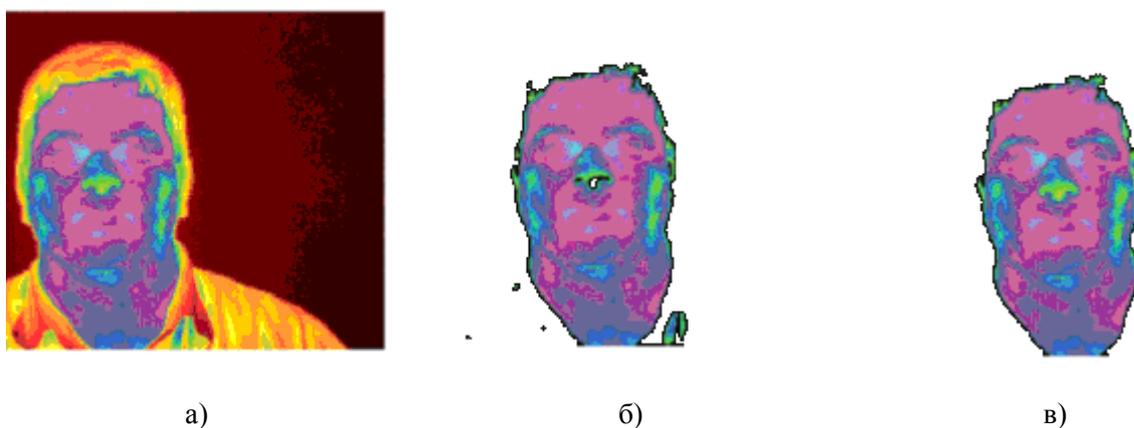


Рис. 3. Детекция лица: а) исходная термограмма; б) результат применения байесовой сегментации, где фон окрашен белым; в) результат постобработки

Для усиления подкожного венозного рисунка, к выделенной области (рис. 4, а) применяется метод анизотропной диффузии (рис. 4, б). После этого производится выделение кровеносного рисунка (рис. 4, в).

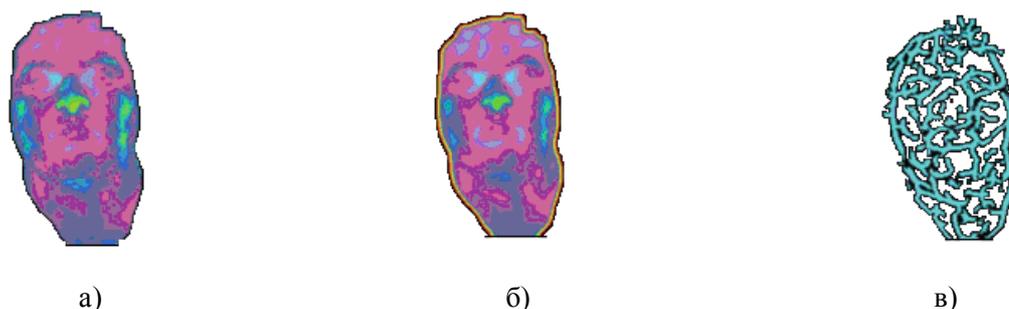


Рис. 4. Выделение венозного рисунка лица: а) исходное сегментированное лицо; б) результат применения анизотропной диффузии; в) выделенные кровеносные сосуды

Дальнейшая обработка полученного изображения состоит из этапов:

- выделение скелета;
- восстановление небольших разрывов в скелете;
- детекция конечных точек и точек бифуркации;
- удаление конечных точек по периметру;
- сохранение координат и углов направлений всех «характерных» точек в структуру, характеризующую конкретную термограмму.

В режиме распознавания идет сравнение двух структур соответствующих термограмм; в зависимости от количества совпавших пар, принимается решение об идентичности термограмм.

Для проверки разработанного алгоритма использовалась база Лаборатории Компьютерного зрения Университета Нотр Дама (University of Notre Dame, Computer Vision Lab), содержащая 2294 изображения 63 человек, полученных в течении 9 сессий под определенным освещением и в определенном температурном режиме. Заявленная в статье вероятность правильной идентификации составляет 82,65%, при условии, что при идентификации по аналогичным фотографиям, вероятность равна 78,74%.

Научная группа Национального университета Ченг Кунга (National Cheng Kung University, Тайвань) предложила свой алгоритм распознавания лиц по термографическим изображениям, основанный на статистических и метрических характеристиках [20]. Лицо детектируется пороговой фильтрацией. Значение температуры кожи подобрано для лабораторных условий. В отфильтрованной области автоматически выделяется вписанный прямоугольник наибольшей площади. В качестве вектора признаков выделяются особые характеристики выделенного лица:

- периметр;
- длина/ширина выделенного прямоугольника;
- статистика распределения температур: температурный диапазон от 30,5 до 33,5°C разбивается на 8 секций с шагом 0,375°C и подсчитывается количество точек выделенного лица, попавших в каждый диапазон. Точки, температура которых выше верхней границы, подсчитываются в отдельной ячейке;
- длины сторон треугольника, составленного из самых холодных участков лица (2 щеки и подбородок).

Задача распознавания решается с помощью трехслойной нейронной сети. Входной вектор состоит из 11 значений: 9 значений распределения температуры, периметра и соотношения длинны к ширине. Скрытый слой состоит из 20 нейронов и выходной – из 26 нейронов.

Экспериментальные исследования проводились на базе, состоящей из 296 снимков 20 человек (15 мужчин, 5 женщин, 16 из которых носили очки), из этих снимков 100 были выделены для обучения сети и 196 использовались для идентификации. Вероятность правильной идентификации для изображений без очков составляет 99%, а с очками – 93.75%.

При всей простоте, предложенный метод обладает рядом недостатков: автоматическое выделение лица основано на пороговой фильтрации, поэтому повторяемость результатов возможна только в лабораторных условиях и если в кадре отсутствуют другие нагретые объекты. Так же следует отметить, что применение нейронных сетей делает систему сложной для настройки.

Выводы

В результате анализа современных научных статей по термографии, были сопоставлены различные методы аутентификации личности. Так как данная область только развивается, хочется отметить, что эти методы не очень сложны, но заявленная в работах вероятность правильной аутентификации, позволяет рассчитывать на их эффективность. Вместе с этим были отмечены некоторые общие недостатки алгоритмов, препятствующие их прямому применению для создания системы аутентификации личности по термографическому изображению, а именно:

- Во всех работах авторы уходят от сущности термограмм (матрицы температур) и анализируют их как изображения (ставя в соответствие шкале температур интенсивность в диапазоне от 0 до 255). При таком подходе к анализу термограмм, не учитывается влияние температурных особенностей лица человека, а рассматриваются только разностные характеристики температур в областях интереса.
- Отсутствует механизм автоматического выделения области интереса (лица), хотя без этого этапа предобработки невозможно построения автоматической системы аутентификации.
- Рассмотренные алгоритмы чувствительны к изменениям температуры окружающей среды.

Среди рассмотренных методов наиболее перспективным выглядит алгоритм выделения системы признаков, описывающей венозный рисунок лица человека, но входными данными такого алгоритма могут быть только термограммы высокого качества, что проблематично для систем аутентификации в режиме реального времени.

На основании результатов проведенного анализа литературы, был составлен список некоторых рекомендаций по разработке алгоритма для устойчивой аутентификации личности по термографическим изображениям. Алгоритм должен обладать:

- Инвариантностью к поворотам головы и масштабированию.
- Устойчивостью к различным заболеваниям и воспалительным процессам, проявляющимися зонами гипер- и гипотермии на лице человека. Поэтому при разработке алгоритма необходимо затронуть медицинские исследования, посвященные диагностике различных заболеваний с помощью термографических карт.
- Устойчивостью к различным психо-эмоциональным состояниям человека (в том числе к крайним стадиям).
- Устойчивостью к фактору старения.
- Устойчивостью к изменениям температуры окружающей среды.

Метод аутентификации личности по термографическим изображениям должна включать алгоритм предобработки входящей термограммы, заключающийся в автоматическом выделении лица на термографическом изображении и коррекции поворотов и наклонов головы.

Предложенные рекомендации не противоречат друг другу и должны быть учтены при разработке алгоритмов распознавания личности по термографическим изображениям.

Список литературы

1. Колесов С.Н., Воловик М.Г., Прилучный М.А. / Медицинское теплорадиовидение: современный методологический подход: Монография. – Нижний Новгород: ФГУ «ННИИТО Росмедтехнологий», 2008. – С. 184.
2. Prokoski F. J., Riedel R. B., Coffin J. S. Identification of individuals by means of facial thermography // Proceedings of The IEEE 1992 International Carnahan Conference on Security Technology: Crime Countermeasures. – Atlanta, GA, USA 14-16 Oct, 1992. – Pp. 120-125.
3. Prokoski F.J. Method for identifying individuals from analysis of elemental shapes derived from biosensor data // US Patent, 1992. – №5,163,094.
4. Wilder J., Phillips P., Jiang C., Wiener S. Comparison of visible and infra-red imagery for face recognition // Proceedings of the IEEE International Conference on Automatic Face and Gesture Recognition (AFGR '96). – Killington, Vermont, 1996. – Pp. 182-187.
5. Cutler R. Face recognition using infrared images and eigenfaces. – 1996. – [Электронный ресурс]. URL: <http://citeseer.ist.psu.edu/cutler96face.html>.
6. Socolinsky D.A., Wolff L.B., Neuheisel J.D., Eveland C.K. Illumination Invariant Face Recognition Using Thermal Infrared Imagery // Proc. IEEE CS Conf. Computer Vision and Pattern Recognition. – 2001. – Vol. 1. – Pp. 527-534.

7. Wolff L. B., Socolinsky D. A., Eveland C. K. Quantitative measurement of illumination invariance for face recognition using thermal infrared imagery // Proc. CVPR Workshop on Computer Vision Beyond the Visible Spectrum. – 2001.
8. Socolinsky D. A., Selinger A. Thermal face recognition in an operational scenario // Proceedings of CVPR 2004. – Washington: D.C., 2004.
9. Chen X., Flynn P., Bowyer K. PCA-based face recognition in infrared imagery: Baseline and comparative studies // IEEE International Workshop on Analysis and Modeling of Faces and Gestures. – France, Nice, 2003.
10. Chen P. J., Flynn and K. W. Bowyer R and visible light face recognition // Computer Vision and Image Understanding. – 2005. – Vol. 99. – Pp. 332-358.
11. Chen X., Flynn P., Bowyer K. Visible-light and infrared face recognition // Workshop on Multimodal User Authentication. – 2003. – Pp. 48-55.
12. Friedrich G., Yeshurun Y. Seeing people in the dark: face recognition in infrared images // Second BMCV. – 2003.
13. Brunelli R., Poggio T. Face recognition: Features versus templates // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 1993. – №15(10).
14. Mian A. Comparison of Visible, Thermal Infra-Red and Range Images for Face Recognition // Lecture Notes In Computer Science. – Archive Proceedings of the 3rd Pacific Rim Symposium on Advances in Image and Video Technology. – Vol. 5414.
15. Moulay A. Akhloufi, Abdelhakim Bendada Probabilistic Bayesian framework for infrared face recognition // World Academy of Science, Engineering and Technology. – 2009.
16. Abdelhakim Bendada, Moulay A. Akhloufi Multispectral Face Recognition in Texture Space // Canadian Conference on Computer and Robot Vision. – 2010. – Pp. 101-106.
17. Akhloufi M.A., Bendada A. Infrared face recognition using Distance transform // World Academy of Science, Engineering and Technology. – 2008. – Vol. 40. – Pp. 160-163.
18. Buddharaju P., Pavlidis I., Manohar C. Face Recognition Beyond the Visible Spectrum // Advances in Biometrics: Sensors, Algorithms and Systems. – 2007. – Pp.158-180.
19. Buddharaju P., Pavlidis I.T., Tsiamyrtzis P. Pose-Invariant Physiological Face Recognition in the Thermal Infrared Spectrum // IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshop. – New York, 2006. – Pp. 53-53.
20. Chen Y.-T., Wang M.-S. Human Face Recognition Using Thermal Image // Journal of Medical and Biological Engineering. – 2002. – Vol 22(2). – Pp. 97-102.