

ИНФОРМАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ АНАЛИЗА МИМИЧЕСКИХ ПРОЯВЛЕНИЙ ЭМОЦИОНАЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ ЧЕЛОВЕКА

Аннотация. Представлена информационная технология, с помощью которой проведен анализ мимических проявлений эмоциональных состояний человека. Выявлены участки лица, мимические изменения которых являются особенностями для моделирования и распознавания визуальных проявлений эмоциональных состояний. Определены 11 мимических проявлений эмоциональных состояний, комбинации которых описывают визуальные проявления эмоций. Сравнительный анализ полученных путем применения предложенной технологии результатов мимических проявлений эмоций с результатами, полученными экспертным путем, показал почти полное совпадение.

Ключевые слова: эмоции, мимика, анализ, маркеры, информационная технология.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы невербальное, мимическое поведение человека стало предметом интенсивных исследований в силу открывающихся новых перспективных применений в областях искусственного интеллекта, построения систем виртуальной реальности [1], жестовой коммуникации [2, 3], криминалистики и т.п. Проведенные исследования позволили предложить своеобразные «формулы» некоторых мимических выражений [4–6]. Тем самым был сделан не только важный шаг на пути строгого экспериментального исследования отображения экспрессии, но и поставлена проблема дифференцированности восприятия мимики лица. Для успешного решения данной задачи важно получить характеристики проявления эмоций на основе их точного обнаружения [7, 8], а не классификации. В настоящей работе формальную модель эмоций, предложенную в [9], расширено для анализа мимических отражений эмоциональных состояний человека.

ОПИСАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ

Для анализа мимических проявлений на лице в процессе воспроизведения эмоциональных состояний человека предложена следующая информационная технология (рис. 1). Входной информацией является видеоизображение актера, на основные участки лица которого нанесены маркеры. Видеопоток содержит процесс воспроизведения им определенных эмоциональных состояний. Над входной информацией проводятся следующие преобразования: 1) нормирование (по расстоянию между центрами глаз) и центрирование (по кончику носа) области лица; 2) анализ кадров видеопотока в целях отслеживания перемещения каждого маркера относительно начального (нейтрального) состояния и получение соответствующих множеств количественных характеристик перемещения для каждого маркера и каждого эмоционального состояния; 3) анализ полученных множеств (количественный и качественный). Выходной информацией является выявление устойчивых мимических проявлений и их комбинаций, характеризующих эмоциональные состояния.

При исследовании воспроизведения мимики обращается внимание на основные мышцы лица [10] в целях разделения его области на определенные участки для дальнейшего расположения на них точек для анализа. Чтобы покрыть все основные мышцы лица, выделено 17 участков (рис. 2), где цифрами обозначено:

1 — середина правой брови; 2 — край правой брови; 3 — верхнее веко правого глаза; 4 — нижнее веко правого глаза; 5 — верх правой щеки; 6 — правое крыло носа; 7 — правый край губ; 8 — верхний край губ; 9 — нижний край губ; 10 — подбородок; 11 — край левой брови; 12 — середина левой брови; 13 — верхнее веко левого глаза; 14 — нижнее веко левого глаза; 15 — верх левой щеки; 16 — левое крыло носа; 17 — левый край губ. Обозначим выделенные участки лица соответствующими маркерами и проведем видеосъемку процесса воспроизведения актером основных (базовых) эмоциональных состояний [4, 9]: гнев, горе, удовлетворение, удивление, пренебрежение, интерес, надежда, радость, страх.

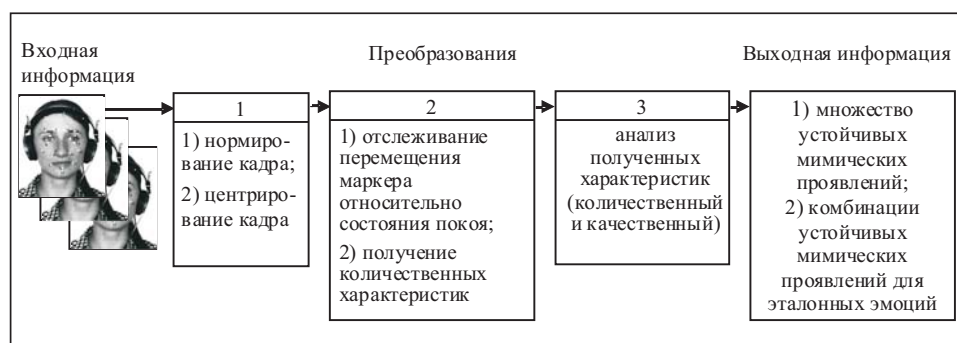


Рис. 1. Схема информационной технологии анализа мимических проявлений на лице человека при воспроизведении различных эмоциональных состояний

Первый шаг информационной технологии состоит в приведении полученного видеоизображения основных эмоциональных проявлений к одной метрике. На первом кадре (выбранном в качестве начального) определяется расстояние между центрами глаз, которое принимается за единицу. При обработке следующих кадров также вычисляется расстояние между центрами глаз и проводится масштабирование изображения. На каждом кадре определяется нулевой маркер (кончик носа) и проводится центрирование кадра. При условии, что во время съемки актер старается держать голову в одной плоскости, допускается, что сделанных преобразований достаточно для последующего определения перемещений маркеров в этой плоскости.



Рис. 2. Расположение точек на участках лица актера с целью дальнейшего анализа

На втором шаге необходимо покадрово отслеживать перемещение маркеров (относительно состояния покоя) для получения количественных характеристик этих перемещений. Для автоматизации процесса используется технология оптических потоков (Optical Flow) как движение отдельных точек видеоряда [11]. Алгоритм поиска потока базируется на идее Лукаса–Канаде [12] и состоит из двух шагов [13]: выбор точек-особенностей и отслеживание этих точек. Общая

цель алгоритма — для точки $u = (u_x, u_y)$ поиск вектора $d = (d_x, d_y)$, минимизирующего сумму

$$\sum_{x=u_x-w_x}^{u_x+w_x} \sum_{y=u_y-w_y}^{u_y+w_y} (I(x, y) - J(x+d_x, y+d_y))^2, \quad (1)$$

где $I(x, y)$, $J(x, y)$ — яркость первого и второго изображения в точке (x, y) ; w_x, w_y — целые числа, задающие окно размером $(2w_x+1) \times (2w_y+1)$ с центром в точке (x, y) .

Существует два основных варианта алгоритма Лукаса–Канаде: классический и пирамидальный. В классическом методе процесс вычисления происходит итеративно с использованием метода Ньютона:

— вычисление матрицы пространственного градиента G :

$$\iint_{W(x_0, y_0)} \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 I(x, y)}{\partial x^2} & \frac{\partial^2 I(x, y)}{\partial x \partial y} \\ \frac{\partial^2 I(x, y)}{\partial x \partial y} & \frac{\partial^2 I(x, y)}{\partial y^2} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где $W(x_0, y_0)$ — прямоугольная окрестность точки, в которой ищется поток;

- вычисление вектора ошибки e ;
- вычисление вектора уточнения d из уравнения $G * d = e$;
- прибавление текущего вектора потока к уточнению;

В качестве начального приближения берется нулевой вектор.

В пирамидальном (иерархическом) алгоритме используется пирамида изображений (последовательность изображений). Каждое последующее изображение получается из предыдущего путем уменьшения его размера вдвое. Каждое изображение последовательности, за исключением первого, строится как свертка предыдущего изображения с фильтром: $[1/4 \ 1/2 \ 1/4] * [1/4 \ 1/2 \ 1/4]^T$, т.е.

$$\begin{aligned} I^L(x, y) = & 1/4 * (I^{L-1}(2x, 2y) + 1/8 * (I^{L-1}(2x-1, 2y) + \\ & I^{L-1}(2x, 2y-1) + I^{L-1}(2x+1, 2y) + I^{L-1}(2x, 2y+1) + \\ & + 1/16 * (I^{L-1}(2x-1, 2y-1) + I^{L-1}(2x+1, 2y-1) + I^{L-1}(2x+1, 2y+1))). \end{aligned} \quad (3)$$

Поиск потока в точке (x_0, y_0) происходит по следующим шагам:

- по каждому из двух изображений строится пирамида изображений;
- для i -го изображения пирамиды по первому и второму изображениям применяется классический метод с вектором начального приближения $2d_{i+1}$, где d_{i+1} — вектор потока, полученный на предыдущем уровне пирамиды; для первого уровня этот вектор принимается равным $(0, 0)$.

С помощью приведенного выше метода можно отслеживать перемещения маркеров от одного кадра к другому и вычислять евклидово расстояние между ними. Применение собственно евклидова расстояния обусловлено наложенными начальными ограничениями (актер старается держать голову в одной плоскости).

В результате преобразований второго шага информационной технологии получаем множества перемещений маркеров от кадра к кадру для каждой эмоции.

В ходе третьего шага информационной технологии проводится анализ полученных на предыдущем шаге множеств. Отбрасываются маркеры, перемещение которых для всех эмоций незначительное или одинаковое. Определяются интервалы изменений для конкретных маркеров для всех эмоций. Проводится шкалирование полученных результатов в целях перехода от количественных показателей пере-

мещения к качественным или, другими словами, к степеням проявления мимик — приподняты, значительно подняты и т.п. Определяется множество мимических проявлений эмоций, необходимых для их устойчивой идентификации.

В результате использования информационной технологии имеем перечень участков лица и их вклад в формирование мимической составляющей эмоций. Проводится сравнение с экспертными оценками мимических проявлений.

РЕАЛИЗАЦИЯ ПРЕДЛОЖЕННОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Для сохранения и управления множествами перемещений маркеров создана база данных (БД), инфологическая модель которой представлена на рис. 3.

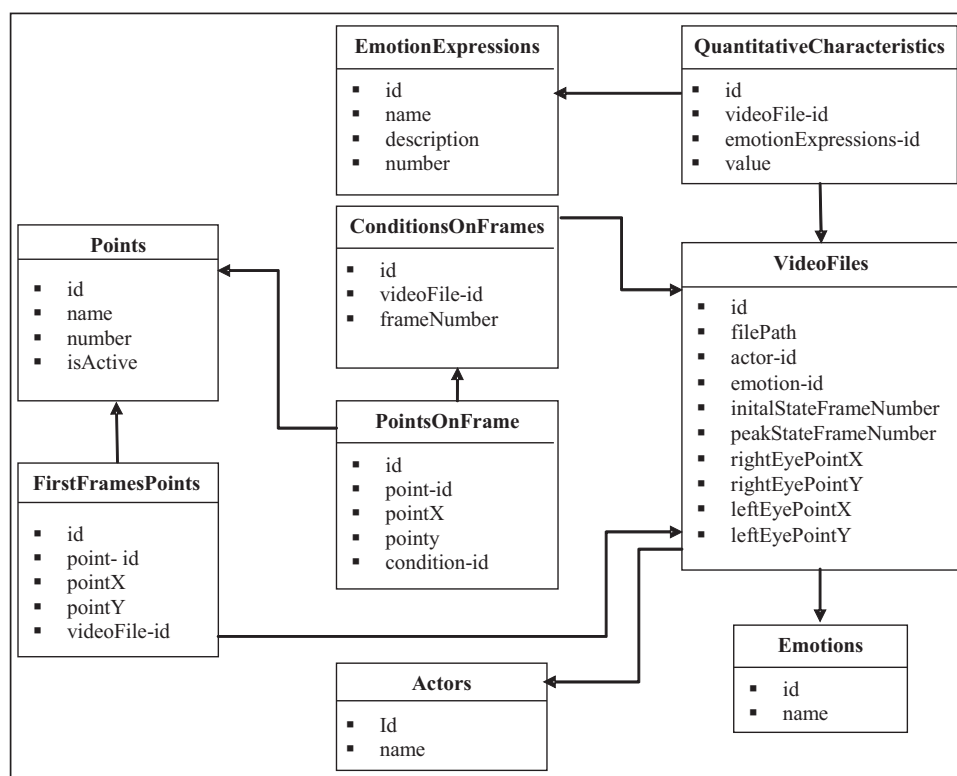


Рис. 3. Инфологическая модель базы данных

Данные о файлах с видеоизображениями хранятся в таблице **VideoFiles**, перечень эмоций — **Emotions**, актеры — **Actors**, мимические проявления — **EmotionExpressions**, маркеры — **Points**. Координаты маркеров на отдельных кадрах видеофайлов (ViFi) заносятся в таблицы **ConditionsOnFrames** и **PointsOnFrame**. Для нормирования и центрирования исходных данных используется таблица **FirstFramesPoints**, а фиксации количественных характеристик мимических проявлений — **QuantitativeCharacteristics**.

Экспериментальное программное обеспечение предложенной информационной технологии состоит из ряда модулей. Для реализации интерфейса пользователя создан модуль графической формы. На форме отображается входной видеопоток, содержатся элементы управления для задания источника видеопотока, управления видеопотоком, введением ключевых точек на начальных кадрах и т.д. Модуль взаимодействует с другими модулями для получения и вывода преобразованных данных. Следующий модуль реализует основные методы для обработки полученных координат точек ViFi, а именно: «отбрасывание» переме-

щений лица в вертикальной и горизонтальной плоскости, расчет перемещений точек ViFi, алгоритмы определения средних количественных и качественных характеристик мимических проявлений и т.д. Разработан отдельный модуль, в котором реализованы методы расчета средних, максимальных и минимальных количественных и качественных характеристик мимических проявлений с ViFi. Создан модуль, в котором реализованы методы для работы и взаимодействия с БД. Для упрощения расчета количественных характеристик (признаков) мимических проявлений реализован класс, в котором описаны шаблоны для их вычисления. Также разработан модуль для отображения данных исследований с соответствующей функциональностью (рис. 4).

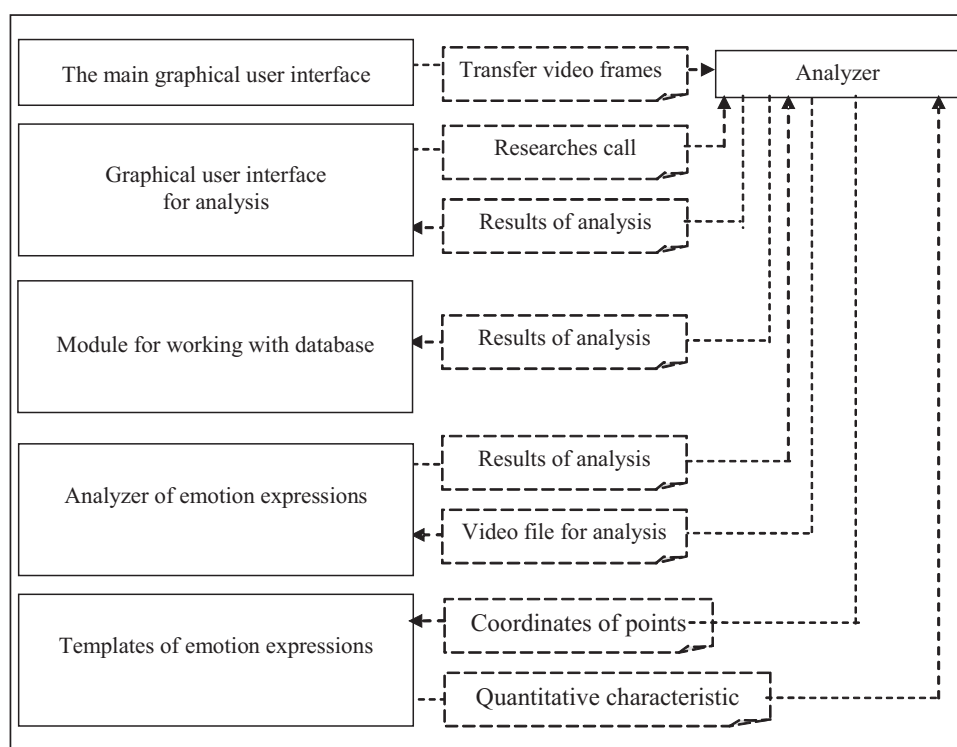


Рис. 4. Схема взаимодействия модулей экспериментального приложения

Для реализации информационной технологии предложен объектно-ориентированный подход. Разработан класс **DataBaseClass** для взаимодействия приложения с БД. Для доступа к БД использована технология LINQ to SQL [14], предназначенная для решения проблемы объектно-реляционного отображения. В классе реализованы методы для доступа ко всем таблицам БД, а также методы для добавления в БД кадровых состояний точек ViFi, добавления количественных характеристик мимических проявлений и т.д. **UserInterfaceClass** — класс, в котором реализованы методы для отображения данных исследований на графических формах. В классе **AnalyzerClass** реализованы основные методы обработки полученных координат точек ViFi, а именно: «отбрасывание» перемещений лица в вертикальной и горизонтальной плоскости, алгоритмы определения средних количественных и качественных характеристик эмоциональных проявлений в зависимости от расстояния между глазами и т.д. **PointMovingAnalyzer** — класс для расчета активности точек ViFi и определения их качественных и количественных характеристик. **EmotionExpressionAnalyzer** — класс, содержащий методы для расчета средних количественных и качественных характеристик мими-

ческих проявлений с ViFi. **CharacteristicsTemplatesClass** — класс, в котором реализованы шаблоны для вычисления количественных характеристик мимических проявлений. В классе **GeneralForm** реализован основной интерфейс пользователя. На графической форме отображается входной видеопоток, реализована возможность изменения ViFi, остановки и запуска видеопотока, изменения частоты кадров, «прокрутки», задания точек, вида эмоционального состояния и состояния проявления эмоции, перезапуска видеопотока. Из главного меню можно получить доступ к формам редактирования данных об актерах, ViFi, эмоциях, ключевых точках, а также к формам для анализа данных. Для удобства обработки и представления данных исследований созданы отдельные классы для характеристик мимических проявлений и точек. На рис. 5 приведены классы для обработки характеристик мимических проявлений. Класс **Characteristics** является базовым для классов **ExpressionsCharacteristics** и **QualitativeCharacteristics**. Класс **ExpressionsCharacteristics** используется для представления количественных, а класс **QualitativeCharacteristics** — качественных характеристик мимических проявлений.

На рис. 6 приведены классы для анализа маркеров. Класс **EyePoints** наследует класс **BasicPoints** и предназначен для представления маркеров на главной форме программы. Класс **PointFPoints** наследует класс **ExtendedPoints** и предназначен для более удобного отображения маркеров в программе. Класс **PointMoving** наследует класс **ExtendedPoints** и предназначен для представления количественных характеристик перемещений ключевых точек маркеров от состояния покоя к эмоциональному состоянию актера, класс **PointMovingDegree** также наследует класс **ExtendedPoints** и предназначен для представления качественных характеристик перемещений ключевых точек маркеров.

При запуске экспериментального приложения загружается главная форма **GeneralForm**. При ее загрузке происходит организация оптического потока с последнего исследуемого ViFi, если такой был. Если контрольные точки маркеров для этого ViFi уже заданы, они загружаются на форму, чтобы пользователю не тратить время на повторное введение.

Для организации оптического потока создан метод **Optical_Flow_Worker**, использующий метод Лукаса–Канаде (пирамидальная версия, реализация OpenCV [12]) для отслеживания перемещений точек от кадра к кадру. При воспроизведении ViFi для каждого кадра записываются координаты точек маркеров. Для воспроизведения видео с необходимым количеством кадров в секунду рассчитывается задержка.

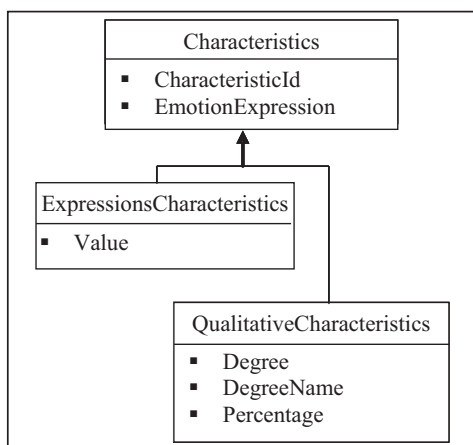


Рис. 5. Диаграмма классов для анализа характеристик мимических проявлений

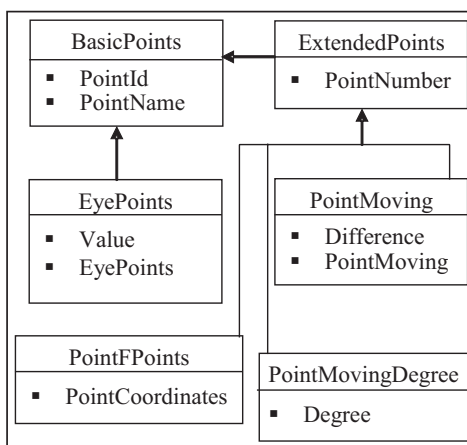


Рис. 6. Диаграмма классов для анализа маркеров

После проведенного исследования ViFi на перемещение маркеров запускается алгоритм «отбрасывания» перемещений головы актера в вертикальной и горизонтальной плоскости. Алгоритм заключается в вычитании покадровых перемещений неподвижной точки по горизонтальной и вертикальной оси от перемещений других точек. Затем рассчитываются и добавляются в БД количественные характеристики мимических проявлений. Для расчета оценок количественных характеристик мимических проявлений реализованы соответствующие методы, которые вычисляют их в зависимости от расстояния между глазами актера. Результат — процентное отношение к этому расстоянию.

Далее исходя из выбранного исследования используются соответствующие методы для его проведения и демонстрации результатов. При исследовании мимических проявлений относительно качественных характеристик применяется метод **GetQualitativeCharacteristics** класса **EmotionExpressionAnalyzer**, который возвращает результаты исследований предварительно созданного типа **QualitativeCharacteristics**. Затем они передаются методу **ShowQualitativeCharacteristics** класса **UserInterfaceClass** для отображения их на графической форме.

При выборе итоговых исследований на главной форме загружается подформа, в которой выбираются соответствующее исследование и актер. В зависимости от выбранного исследования выполняется вызов соответствующих методов. Особенность итоговых исследований состоит в том, что проводится расчет по всем эмоциям. Вначале определяется список эмоций. Затем для каждой эмоции указываются файлы для исследований. Списки файлов передаются на вход соответствующего метода для исследования. Результаты отражаются на графической форме.

Для определения качественных характеристик мимических проявлений выполняется соответствующее шкалирование. Для того чтобы учесть фактор различия экспрессий в мимических проявлениях у разных людей, каждое мимическое проявление определяется как его процент от максимального значения для конкретного человека. Далее анализируется график этого проявления для рассматриваемых эмоциональных состояний. Определяются корректные для последующей идентификации диапазоны (например, для точек 2 и 11 существенны два диапазона — поднятие и опускание бровей), и им присваиваются соответствующие названия, используемые далее для вербального описания мимических проявлений.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

С помощью созданной информационной технологии проведено исследование особенностей лица при воспроизведении мимического проявления девяти различных эмоций для одного актера (17 участков лица).

Всего в работе проанализировано 12 ViFi с различными эмоциями. Оказалось, что такие участки лица (рис. 2), как левое крыло носа (16) и правое крыло носа (6), наименее активны, а верх правой щеки (5), верх левой щеки (15) и подбородок (10) не информативны. Поэтому эти точки были исключены из дальнейшего рассмотрения и для исследования эмоций взяты следующие 12 участков лица (рис. 2): середина правой брови (1); край правой брови (2); верхнее веко правого глаза (3); нижнее веко правого глаза (4); правый край губ (7); верхний край губ (8); нижний край губ (9); край левой брови (11); середина левой брови (12); верхнее веко левого глаза (13); нижнее веко левого глаза (14); левый край губ (17).

Следующим этапом был анализ ViFi относительно качественных характеристик мимических проявлений эмоций. Полученные результаты приведены в табл. 1, где использованы следующие обозначения: В — сильное влияние, С — среднее влияние, Н — незначительное влияние.

Таблица 1. Качественные характеристики мимических проявлений эмоций (для участков лица)

Эмоция	Результаты мимических проявлений согласно маркерам (рис. 2)											
	1	2	3	4	7	8	9	11	12	13	14	17
Гнев	В	В	С	С	Н	Н	Н	С	С	Н	Н	Н
Горе	Н	В	—	—	—	—	—	В	С	—	—	—
Удовлетворение	—	—	В	—	—	—	—	—	—	В	—	—
Удивление	—	—	—	—	Н	—	В	—	—	—	—	Н
Пренебрежение	Н	В	—	—	—	—	—	В	Н	—	—	—
Интерес	В	В	Н	—	—	—	—	В	В	—	—	—
Надежда	—	—	Н	Н	В	Н	Н	—	—	Н	Н	В
Радость	—	—	—	Н	С	Н	Н	—	—	—	—	В
Страх	—	—	—	—	Н	—	В	—	—	—	—	Н

Таблица 2. Количественные характеристики эмоций (для мимических проявлений)

Эмоция	Результаты предложенных мимических проявлений по областям										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Гнев	SIR	—	SLO	—	—	—	—	SQA	COM	—	—
Горе	SIR	SUP	—	—	ISI	—	—	—	—	—	—
Удовлетворение	—	—	ISO	ISI	—	LOW	—	SQS	—	—	SOF
Удивление	—	SUP	—	ISI	—	—	WOP	—	—	OPE	—
Пренебрежение	—	SUP	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Интерес	—	SUP	—	SUP	ISI	—	WOP	—	—	—	—
Надежда	—	ISI	—	ISI	ISI	—	—	—	—	—	SOF
Радость	—	—	—	—	ISI	—	—	—	—	OPE	—
Страх	ISR	ISI	—	—	ISI	—	WOP	—	—	OPE	STS

Из табл. 1 видно, что эмоцию «удовлетворение» достаточно просто распознать, поскольку для ее проявления использованы только два маркера, которые показывают сильное влияние на эту эмоцию. Эмоцию «гнев» распознать сложно в силу того, что для ее проявления задействованы все маркеры.

В результате анализа выбранных 12 участков лица предложены 11 мимических проявлений (по трем областям: лоб и брови; глаза; рот и подбородок). Для первой области выделено четыре мимических проявления: 1) сведение бровей; 2) поднятие внутренних краев бровей; 3) опускание бровей; 4) поднятие середины бровей; для второй области выделено также четыре мимических проявления: 5) поднятие верхних век; 6) опускание верхних век; 7) широкое раскрытие глаз; 8) прищур; для третьей области выделено три мимических проявления: 9) сжатие губ; 10) раскрытие рта; 11) смещение уголков губ в стороны. Полученные результаты для предложенных мимических проявлений приведены в табл. 2, где использованы следующие обозначения: SIR — значительное сведение, ISR — незначительное сведение, SUP — значительное поднятие, ISI — незначительное поднятие, SLO — значительное опускание, ISO — незначительное опускание, LOW — опускание, WOP — широкое раскрытие, SQA — среднее прищуривание, SQS — значительное прищуривание, COM — сжатие, OPE — раскрытие, SOF — немного смещены, STS — сильно смещены.

В завершение исследований было проведено сравнение результатов мимических проявлений эмоций, полученных с помощью предложенной информационной технологии, с результатами, полученными экспертным путем [9]. Из анализа результатов сравнения следует полное совпадение основных мимических

проявлений. Несовпадение обнаружено в мимических признаках, связанных с морщинами или незначительными мимическими проявлениями, которые не было возможности обнаружить с помощью предложенной информационной технологии (например, губы и веки напряжены либо не напряжены). Также некоторые несовпадения обусловлены особенностями мимических проявлений у разных людей: у некоторых они выражены нечетко, поэтому в предложенной технологии исключены как несущественные, а эксперты включают их в рассмотрение. Из табл. 3 видно, что экспертные и экспериментальные результаты анализа отличаются; полужирным шрифтом обозначены совпавшие признаки, курсивом — не совпавшие.

Таблица 3. Сравнительный анализ экспертных и экспериментальных оценок мимических проявлений эмоций

Оценка эксперта	Результат анализа
Радость	
Брови и лоб спокойные	Брови и лоб без мимических проявлений
<i>Верхние веки спокойные</i>	<i>Верхние веки приподняты</i>
Под нижними веками морщины	
У наружного края уголков глаз морщины	
<i>Рот закрыт</i>	<i>Рот открыт</i>
Уголки губ оттянуты в стороны и приподняты	Уголки губ сильно смещены в стороны
От носа к внешнему краю губ прослеживаются морщины	
Интерес	
Брови приподняты, на лбу морщина	Внутренние края и середины бровей значительно подняты
Веки немного расширены	Глаза широко раскрыты, верхние веки приподняты

Тестирование технологии для группы актеров с разными типами овалов лица и различными темпераментами в дальнейшем позволит уточнить предложенные оценки и вывести общие.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе приведена информационная технология для анализа особенностей лица человека при воспроизведении эмоциональной мимики. В процессе исследования получены следующие основные результаты:

- изучены участки лица, мимические изменения в которых являются особенностями для описания визуальных проявлений эмоциональных состояний; выявлено 12 таких участков: середина правой брови; край правой брови; верхнее веко правого глаза; нижнее веко правого глаза; правый край губ; верхний край губ; нижний край губ; край левой брови; середина левой брови; верхнее веко левого глаза; нижнее веко левого глаза; левый край губ;
- в результате анализа 12 участков лица определены 11 мимических проявлений эмоциональных состояний, комбинации которых описывают визуальное проявление эмоции;
- проведен сравнительный анализ полученных с помощью информационной технологии результатов мимических проявлений эмоций с результатами, полученными экспертным путем, который показал почти полное совпадение.

Дальнейшие исследования будут направлены на совершенствование предложенной информационной технологии в следующих направлениях:

— расширение списка актеров с различными степенями мимических проявлений и обобщающий анализ;

— разработка подходов для анализа морщин и несущественных мимических проявлений, выявление которых (по мнению экспертов) важно при анализе эмоциональной мимики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крак Ю.В., Бармак А.В., Барабан Е.М. Использование NURBS-аппроксимации для построения пространственной модели лица человека // Проблемы управления и информатики. — 2011. — № 1. — С. 147–156.
2. Кривонос Ю.Г., Крак Ю.В. Моделирование движений рук, мимики и артикуляции лица человека для синтеза и визуализации жестовой информации // Кибернетика и системный анализ. — 2011. — № 4. — С. 3–8.
3. Кривонос Ю.Г., Крак Ю.В., Бармак А.В., Шкильнюк Д.В. Конструирование и идентификация элементов жестовой коммуникации // Кибернетика и системный анализ. — 2013. — № 2. — С. 3–8.
4. Изард К. Психология эмоций: Пер. с англ. — СПб.: Питер, 2000. — 464 с.
5. Ильин Е.П. Эмоции и чувства. — СПб.: Питер, 2001. — 752 с.
6. Леонтьев В.О. Классификация эмоций. — Одесса: Инновационно-ипотечный центр, 2002. — 84 с.
7. Brunelli R., Poggio T. Face recognition: features versus templates // IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intellig. — 1993. — **15**, N 10. — P. 1042–1052.
8. Martinez A., Du S. A model of perception of facial expressions of emotion by human: research overview and perspectives // J. Machine Learning Res. — 2012. — **13**. — P. 1589–1608.
9. Моделирование и анализ мимических проявлений эмоций / Ю.Г. Кривонос, Ю.В. Крак, О.В. Бармак и др. // Докл. НАН Украины. — 2008. — № 12. — С. 51–55.
10. Fehrenbach M. J., Herring S. W. Illustrated anatomy of the head and neck. — 4th ed. — Amsterdam; London; New York: Elsevier inc., 2012. — 336 p.
11. Форсайт Д., Понс Ж. Компьютерное зрение. Современный подход. — М.: Изд. дом «Вильямс», 2004. — 928 с.
12. Коношин А. Слежение за точечными особенностями сцены (Point feature tracking) // Компьютерная графика и мультимедиа. — 2003. — Вып. № 1(5). — <http://cgm.computergraphics.ru/content/view/54>.
13. Pyramidal implementation of the Lucas-Kanade feature tracker description of the algorithm. — http://robots.stanford.edu/cs223b04/ algo_tracking.pdf.
14. LINQ to SQL. — [http://msdn.microsoft.com/ru-ru/library/bb386976\(v=vs.110\).aspx](http://msdn.microsoft.com/ru-ru/library/bb386976(v=vs.110).aspx).
15. OpenCV (Open Source Computer Vision). — <http://opencv.org/>.

Поступила 12.09.2014