

Новый способ выбора наилучшего эталона радужки из последовательности*

И. А. Матвеев^{1,2}, В. П. Новик²

matveev@ccas.ru

¹Вычислительный центр им. А. А. Дородницына Российской академии наук, Москва 119333, ул. Вавилова, д. 40; ²ПАО «ИриТехКо., ЛТД», Москва 115184, ул. Б. Татарская, д. 21

В задаче идентификации по радужке предложен новый способ выбора наилучшего биометрического эталона из группы, построенной по последовательности регистрируемых изображений. Метод основан на анализе матрицы расстояний группы эталонов. Осуществлено сравнение со стандартным подходом, использующим признаки качества исходного изображения. Указано, что признаки качества изображения разрабатываются для задачи отбраковки плохих изображений и мало подходят для задачи выбора наилучшего изображения. Вычислительные эксперименты проведены на нескольких базах данных, находящихся в открытом доступе, общим объемом более 70 000 изображений. Тесты показывают, что предложенный метод дает несколько лучшее качество выбранных эталонов. При этом, он не требует разработки дополнительных мер качества, а использует имеющееся вычисление расстояния.

Ключевые слова: идентификация по радужке; качество изображения; биометрический эталон

New method of selecting best iris template from sequence*

I. A. Matveev^{1,2}, V. P. Novik²

¹Dorodnicyn Computing Centre of RAS, 40 Vavilov Str., Moscow 119333; ²Iritech Co., Ltd., 21 B. Tatarskaya Str., Moscow 115184

A new way of selecting best template from a group of templates generated from image sequence is presented for the problem of iris identification. The method is based on analysis of distance matrix of the template group. Comparison is performed with the standard approach, which uses quality features of the source images. It is pointed that usually, the image quality methods are developed for the task of poor image rejection and thus are not well suited for the task of best image selection. Numerical tests are carried out with several public domain databases with total number of iris images over 70 000. The tests show that the proposed method has slightly better quality of selected templates. At that, it does not require development of additional quality measure but uses existing intertemplate distance calculation.

Keywords: iris identification; image quality; biometric template

Введение

Распознавание по изображениям радужной оболочки глаза в настоящее время является ведущей модальностью в автоматических биометрических системах [1, 2]. Системы идентификации по радужке имеют высокие показатели, применяются в проектах национального масштаба, апробируются на мобильных устройствах широкого класса, и в ближайшее

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 14-01-00348.

время ожидается быстрый рост приложений [1]. Это делает актуальным дальнейшую разработку и исследование методов и алгоритмов, в том числе таких, которые используют не только известные общие подходы, изученные в системах распознавания лица, голоса и прочих модальностей, но и особенности работы систем регистрации изображений радужки.

Одной из таких особенностей является то, что при вводе изображения радужки на самом деле регистрируется последовательность многих изображений. Вплоть до настоящего времени возможность использования последовательностей (не как набора изображений, но с учетом их взаимосвязей) не привлекала большого внимания. Даже в том случае, когда явным образом обрабатывается последовательность и строятся характеристики ее в целом, это чаще всего делается путем анализа составляющих изображений независимо друг от друга [3]. Работы, описывающие использование последовательностей, немногочисленны. Из интересных применений можно назвать [4], где предложена компоновка биометрического эталона из нескольких сегментов радужки, взятых на разных изображениях; работу [5], в которой рассмотрено применение процедур сверхразрешения для получения качественного изображения радужки из серии низкокачественных; использование последовательностей для определения живости глаза (защиты от подделок) [6]. Также предлагались методы формирования биометрических шаблонов с использованием последовательностей изображений. Так, например, в работах [7, 8] предложено улучшать качество изображения радужной оболочки, используемого для формирования шаблона, построением некоторого «среднего» изображения по нескольким изображениям, в [9] предложено улучшать качество шаблона с помощью оптимизации кода, выполняемой по серии изображений. В основном обработка последовательностей производится с целью выбора наилучшего изображения для дальнейшего распознавания. Изображение глаза может быть малоконтрастным, зашумленным, или по иным причинам не содержать достаточно хорошей текстуры радужки, при этом из него может быть формально получен биометрический эталон, который будет порождать большое количество ошибок распознавания. Поэтому требуются процедуры оценки качества используемых изображений, найденных характеристик радужки и полученных биометрических эталонов, с тем чтобы исключать из распознавания некачественные данные. Во всех известных работах, использующих последовательности для выбора наиболее качественного изображения, рассчитываются характеристики качества каждого отдельного изображения, а потом производится выбор наилучшего по тому или иному критерию [10, 11, 12, 13]. По сути такой подход мало отличается от обработки единичного изображения и отбраковки его в случае низкого качества, чему посвящено большое количество работ, в том числе специально организованный тест [14].

Следует обратить внимание на два момента. Во-первых, в последовательности изображений, регистрируемых устройством ввода, значительное их число (те, что имеют достаточное качество) пригодно для построения эталона. Эталон может быть создан (и в большинстве современных систем создается) по одному изображению, таким образом, из последовательности возможно создать несколько эталонов. Во-вторых, создание показателя качества, такого, чтобы он правильным образом ранжировал изображения, т. е. присваивал большее качество изображению, которое дает эталон, порождающий меньшее количество ошибок распознавания — трудная проблема. Задача выбора лучшего изображения для распознавания на основании качества решена лишь отчасти [14]. В работе рассматриваются два подхода к проблеме выбора: при помощи качества изображений и на основании анализа матрицы расстояний между эталонами, полученными из последовательности.

Процедура получения ошибки распознавания

В целях упрощения дальнейшего изложения определим процедуру получения ошибки распознавания по множеству или *базе изображений*. База $B = \{I_1, \dots, I_M\}$ содержит M изображений, принадлежащих P персонам. Каждой персоне p , $p \in [1; P]$ принадлежит одно или более изображений, составляющих множество: $B_p = \{I_{p,1}, \dots, I_{p,M_p}\}$, так что $\sum M_p = M$. Нумерация изображений может быть как сквозная одномерная по всей базе, так и двумерная (персона, номер изображения персоны). По каждому изображению может быть построен биометрический эталон $T(I)$. Эталоны сравниваются при помощи функции расстояния $d(T_i, T_j)$. В данном подходе без ограничения общности можно говорить и о сравнении изображений: $d(I_i, I_j) = d(T(I_i), T(I_j))$. Сравнение двух изображений $d(I_{p,i}, I_{q,j})$ называется *собственным* при $p = q$, т. е. если изображения принадлежат одной персоне и *чужим* в противном случае. Все изображения базы попарно сравниваются между собой, всего происходит M^2 сравнений. Можно рассчитать общее число собственных сравнений:

$$N_{self} = |\{(I_{p,i}, I_{q,j}) : p = q\}| = \sum_{p=1}^P M_p^2 ,$$

и число чужих сравнений:

$$N_{alien} = |\{(I_{p,i}, I_{q,j}) : p \neq q\}| = M^2 - N_{self} .$$

Без ограничения общности будем считать расстояние d нормированным к отрезку $d \in [0; 1]$. Используя расстояние как классификатор и взяв порог $\Theta \in [0; 1]$, можно определить количество собственных сравнений с расстоянием большим или равным Θ , т. е. число ошибок первого рода (false reject):

$$N_{FR}(\Theta) = |\{(I_{p,i}, I_{q,j}) : p = q, d(I_{p,i}, I_{q,j}) \geq \Theta\}| ,$$

количество чужих сравнений с расстоянием меньшим или равным Θ , т. е. число ошибок второго рода (false accept):

$$N_{FA}(\Theta) = |\{(I_{p,i}, I_{q,j}) : p \neq q, d(I_{p,i}, I_{q,j}) \leq \Theta\}| ,$$

и относительные ошибки первого и второго рода:

$$E_{FR}(\Theta) = \frac{N_{FR}(\Theta)}{N_{self}} ; E_{FA}(\Theta) = \frac{N_{FA}(\Theta)}{N_{alien}} . \quad (1)$$

Назовем *параметрической кривой ошибок* (*Detection Error Tradeoff, DET-curve*) ломаную, проведенную через точки $(E_{FR}(\Theta), E_{FA}(\Theta))$. По построению

$$E_{FR}(0) = 1 ; E_{FR}(1) = 0 ; E_{FA}(0) = 0 ; E_{FA}(1) = 1 .$$

Поэтому существует значение

$$\Theta_{EER} : E_{FR}(\Theta_{EER}) = E_{FA}(\Theta_{EER}) , \quad (2)$$

в котором достигается равная величина относительных ошибок первого и второго рода, *эквивалентная ошибка*. Эту величину примем как характеристику качества функции расстояния d (а также, в некотором смысле, описанном ниже — качества выбора базы).

Случай, когда для некоторого порога Θ все собственные сравнения дают меньшее расстояние, а все чужие — большее, называется *полной разделимостью* и принимается $E_{\text{EER}} = E_{\text{FR}}(\Theta) = E_{\text{FA}}(\Theta) \equiv 0$. Итак, по базе изображений B генерируются эталоны, функцией d производится их попарное сравнение, строятся зависимости (1) и вычисляется ошибка (2), что составляет процедуру *получения ошибки распознавания* (ПОР), которую можно записать как $E_{\text{EER}}(B, d)$.

Выбор по качеству

В основных работах, посвященных качеству радужки, равно как в тесте [14], решается задача *отбраковки изображений*, формулируемая следующим образом: требуется исключить (отбраковать) изображения, по которым строятся эталоны, дающие большое количество ошибок распознавания. Важным условием такой отбраковки является то, что должно быть исключено как можно меньшее количество изображений. Такая постановка отличается от задачи выбора одного наилучшего изображения из последовательности. Поэтому, методы оценки качества, оптимизированные для задачи отбраковки, могут не давать хорошего решения задачи выбора. Однако, имеющиеся в настоящее время исследования никак не акцентируют внимание на этой проблеме, а просто используют критерии качества, полученные для задачи отбраковки, в задаче выбора.

Для оценки метода отбраковки применяется следующая процедура. Пусть необходимо определить результативность использования отбраковки по численному показателю качества $Q(I)$. Моделируется работа системы, использующей показатель качества $Q(I)$ с порогом Θ_Q , т. е. из базы удаляются все изображения I , для которых $Q(I) < \Theta_Q$:

$$B'(T_Q) = B \setminus \{I_m : Q(I_m) < \Theta_Q\} .$$

Для полученного подмножества B' проводится процедура ПОР, и вычисляется $E_{\text{EER}}(B'(\Theta_Q))$, зависящее от порога. Также от порога зависит доля удаленных из базы данных изображений

$$S(\Theta_Q) = \frac{|B| - |B'(\Theta_Q)|}{|B|} .$$

Варьируя значение Θ_Q , можно построить параметрическую кривую зависимости ошибки классификации от доли отброшенных изображений

$$E(S) = \{(S(\Theta_Q), E(\Theta_Q))\} . \quad (3)$$

Рассмотрим пару эталонов одной персоны: $T_{p,i}$ и $T_{p,j}$, дающих собственное сравнение с расстоянием $d(T_{p,i}, T_{p,j})$. Для этой пары можно определить количество чужих сравнений с меньшим или равным расстоянием, т. е. ошибок второго рода:

$$a(p, i, j) = |\{q, r, k, l\} : d(T_{p,i}, T_{p,j}) \geq d(T_{q,k}, T_{r,l}), q \neq r| , \quad (4)$$

$$k \in [1; M_q] , l \in [1; M_r] .$$

Для i -го изображения персоны p можно определить общее количество чужих сравнений с меньшим расстоянием для всех пар с его участием:

$$A(p, i) = \sum_j a(p, i, j) , \quad (5)$$

а также количество чужих сравнений с расстояниями, меньшими или равным некоторому порогу Θ :

$$A_{\Theta}(p, i) = \sum_j a(p, i, j, \Theta) , \quad (6)$$

$$a(p, i, j, \Theta) = |\{q, r, k, l\} : d(T_{p,i}, T_{p,j}) \geq d(T_{q,k}, T_{r,l}) , \Theta \geq d(T_{q,k}, T_{r,l})| .$$

Аналогичным образом можно определить количества ошибок первого рода. Не все изображения вносят одинаковый вклад в создание ошибок, как правило, существуют те, для которых $A(p, i) = 0$. Таким образом, имеется подмножество изображений, для которых полная разделимость достигается, а значит исключением эталонов (исходных изображений) из сравнения можно снижать число ошибок классификации, вплоть до полной разделимости. Однако может оказаться, что полная разделимость достигается лишь при исключении неприемлемо большого числа эталонов. Поэтому возникает задача исключить некоторое число эталонов при этом максимально снизив ошибку. Очевидно, что быстрее всего ошибка уменьшается при исключении эталонов с высокими значениями $A(p, i)$. Используя таблицу попарных сравнений, можно вычислить все $A(p, i)$ и далее последовательно исключать эталоны с высокими значениями этого показателя, до достижения необходимой точности или доли исключенных эталонов. Таким образом, можно построить кривую зависимости ошибки распознавания от доли отброшенных изображений $E^*(S)$. Использование таблицы попарных сравнений и выбор эталонов (а значит, изображений) с максимальными $A(p, i)$ является идеальным «предсказателем», позволяющим уменьшать ошибку работы классификатора (на обучающей выборке) при отбрасывании изображения максимально быстро. Таким образом, сравнивая кривую (3), полученную при использовании показателя качества $Q(I)$, с идеальной для данной выборки кривой $E^*(S)$, можно оценить этот показатель.

Показатель качества, оптимизированный с использованием данной процедуры оценки, может применяться для выбора наилучшего эталона, выбирается эталон с максимальным значением показателя.

Выбор по матрице расстояний множества эталонов

Идея выбора изображений из множества на основании расстояний между ними состоит в том, что последовательность как правило включает в себя изображения с различным качеством. При этом при сравнении двух высококачественных изображений одного глаза получается малое расстояние, а если хотя бы одно из изображений имеет низкое качество, расстояние становится большим. Таким образом, изображения с высоким качеством формируют подмножество-кластер в метрическом пространстве, индуцируемом расстоянием d . Логично предположить, что наилучшее изображение имеет наименьшее среднее расстояние до элементов кластера (хотя расстояния до элементов, не входящих в кластер, могут быть велики).

Обозначим последовательность изображений (одного глаза) $I_n, n \in [1, N]$. По каждому такому изображению может быть сгенерирован эталон $T_n = T(I_n)$. Функция сравнения эталонов вычисляет расстояние между ними $d(T_n, T_m)$. Матрица расстояний $D = (d_{nm}), n, m \in [1, N]$ имеет размер $N \times N$. Обозначим k -ю строку матрицы сравнений без k -го элемента (сравнения эталона самого с собой):

$$s_k = (d_{k,1}, \dots, d_{k,k-1}, d_{k,k+1}, \dots, d_{k,N}) . \quad (7)$$

Отсортированная по возрастанию элементов строка (7) записывается как:

$$\tilde{s}_k = (\tilde{d}_{k,1}, \dots, \tilde{d}_{k,N-1}) . \quad (8)$$

Первые несколько элементов строки (8) — расстояния внутри гипотетического кластера эталонов, наиболее схожих с T_k . Обозначим размер такого кластера $h(N)$. Среднее расстояние от эталона k до элементов кластера вычисляется как:

$$S_k = \frac{1}{h(N)} \sum_{i=1}^{h(N)} \tilde{d}_{k,i} . \quad (9)$$

Выбираем эталон с минимальной суммой (9):

$$K = \arg \min_k S_k . \quad (10)$$

Размер кластера определяется как $h(N) = \sqrt{N}$. Такой выбор приводит к наилучшим результатам при численных экспериментах с разными размерами последовательностей.

Численные эксперименты

Для проведения численных тестов использовались несколько баз данных, находящихся в открытом доступе и содержащих последовательности изображений:

- BATH [15], база состоит из 31988 изображений 800 персон;
- CASIA-3-Lamp [16], 16212 изображений, 411 персон;
- CASIA-4-Thousand [16], 20000 изображений, 1000 персон;
- ICE [17], 2954 изображений, 132 персон;

Приводимые далее экспериментальные результаты получены для последовательностей размером $N = 5$. Таким образом, множество изображений каждого глаза разбивалось на группы из $N = 5$ элементов, из каждой такой группы выбиралось одно изображение одним из пяти способов:

- случайный, т. е. моделируется ситуация отсутствия выбора (Random);
- максимальное качество $K = \arg \max_n Q(I_n)$, где $Q(I_n)$ — качество n -го изображения последовательности (Maximum quality);
- аналогичное минимальное качество $K = \arg \min_n Q(I_n)$ (Minimum quality);
- минимальное расстояние (10) (Minimum distance);
- аналогичное максимальное расстояние $K = \arg \max_k S_k$ (Maximum distance).

Показатель качества рассчитывается согласно рекомендациям [14]. Для построения эталонов и сравнения использована библиотека Iritech (<http://www.iritech.com>). После чего над выбранными изображениями производилась процедура ПОР и строились параметрические кривые ошибок. Минимально качество и максимальное расстояние введены как контраст, выбор худшего, *анти-выбор*. Кривые для баз CASIA показаны на рис. 1 и 2. На этих графиках по осям абсцисс и ординат отложены величины относительной ошибки первого и второго рода (1) соответственно.

Величины эквивалентных ошибок приведены в таблице. Анализируя графики и таблицу, можно отметить следующее:

1. Во всех случаях выбор случайного (моделирование отсутствия выбора из последовательности) оказался хуже выбора по качеству и по расстоянию и лучше анти-выбора.
2. Выбор по расстоянию лучше выбора по качеству для всех баз кроме CASIA-4. В целом оба эти выбора дают близкие результаты.
3. Антивыбор по качеству дает стабильно самые худшие результаты. То есть процедура оценки качества действительно хорошо отбраковывает плохие изображения.

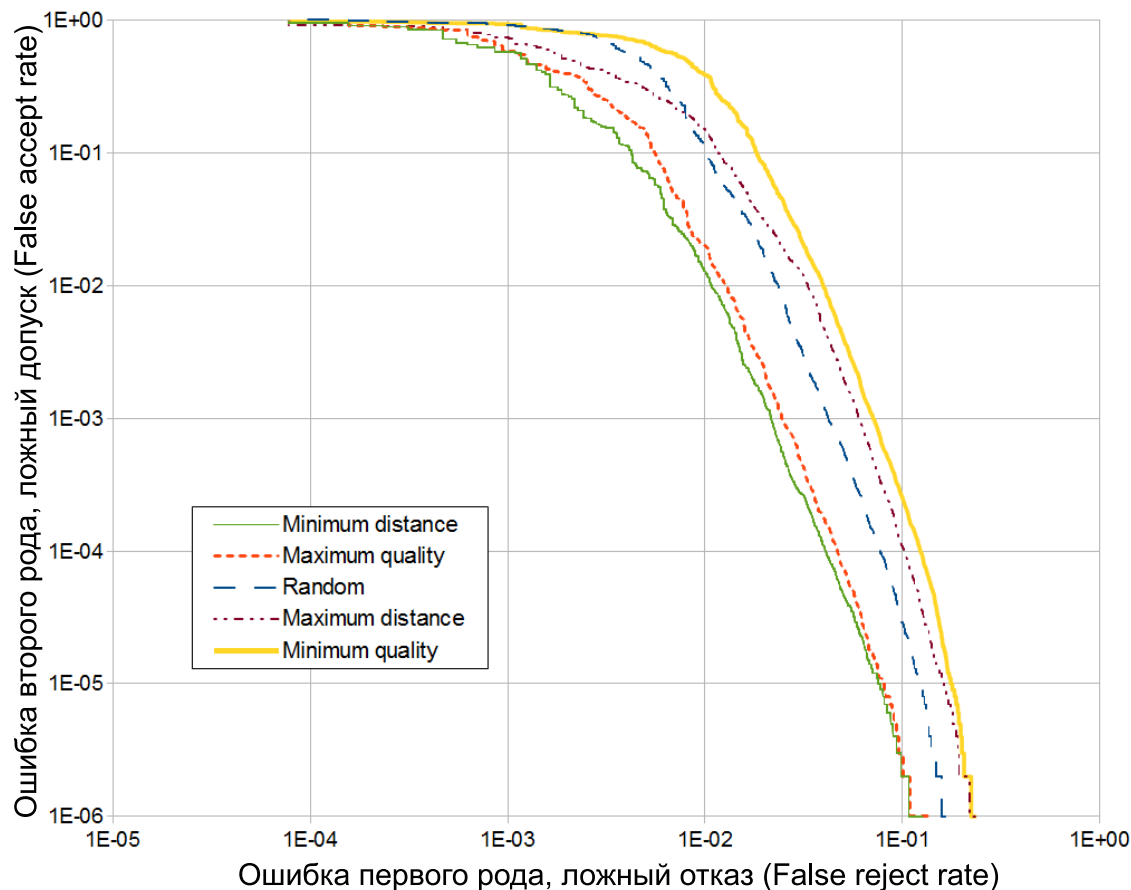


Рис. 1. Параметрические кривые ошибок для CASIA-3-Lamp

Таблица 1. Эквивалентная ошибка при выборе различными методами

Метод	База			
	BATH	CASIA3	CASIA4	ICE
Random	0.1095%	1.9294%	0.9750%	0.3350%
Maximum quality	0.0960%	1.1717%	0.6125%	0.2237%
Minimum quality	0.1408%	2.8355%	2.6375%	1.6219%
Minimum distance	0.0782%	1.0623%	0.8400%	0.1119%
Maximum distance	0.1114%	2.3484%	1.4859%	0.8949%

Следует также отметить, что метод выбора по расстоянию использует лишь функцию сравнения (которая в любом случае должна присутствовать в системе распознавания) и не требует разработки специальной процедуры оценки качества.

Заключение

Рассмотрена проблема выбора лучшего биометрического эталона из их множества, полученного по серии изображений радужки. Предложен новый метод выбора, основанный на исследовании матрицы взаимных расстояний эталонов. Произведено сравнение с известным подходом, использующим показатели качества изображения и выделенной на нем области радужки. Преимуществом предложенного метода является то, что используется лишь функция сравнения (которая в любом случае должна присутствовать в системе рас-

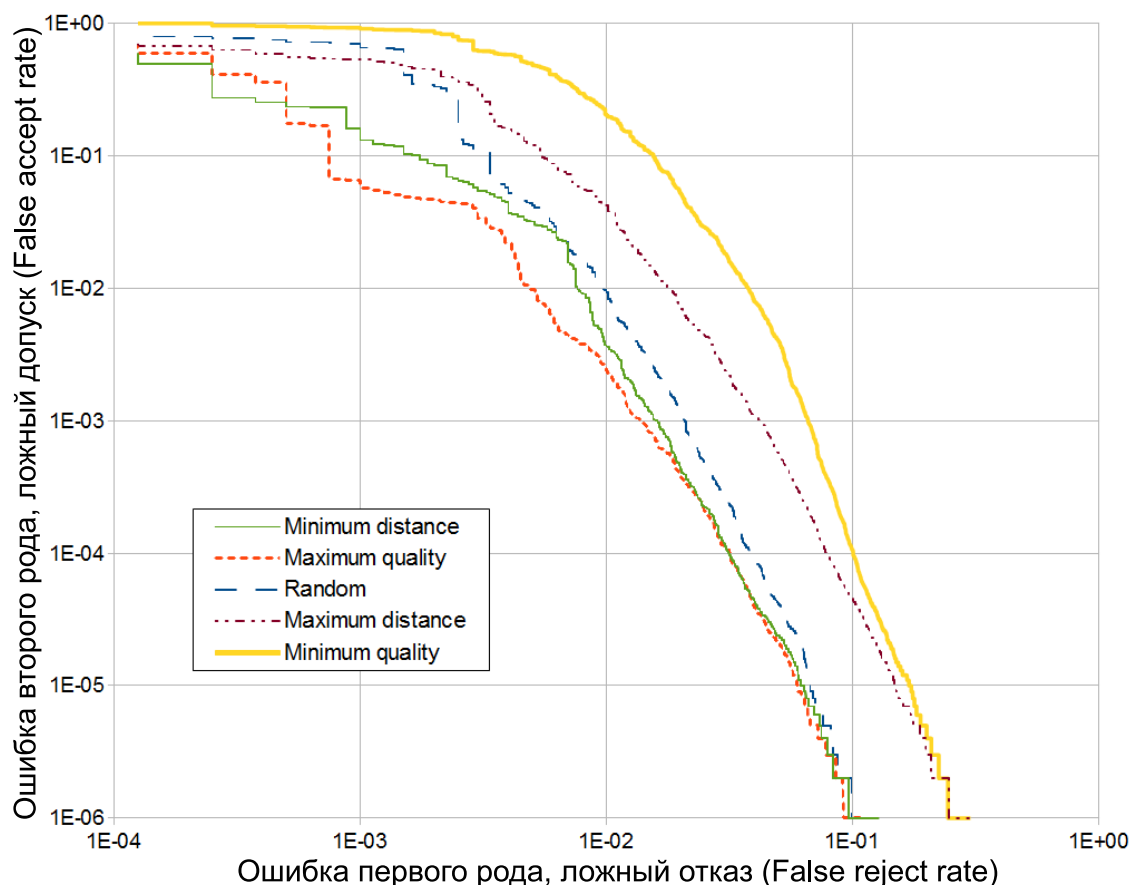


Рис. 2. Параметрические кривые ошибок для CASIA-4-Thousand

познавания) и не требуется разработка специальной процедуры оценки качества эталона или исходного изображения.

Рассмотрена схема оценки показателя качества, используемая для отбраковки изображений радужки в системах распознавания. Указано, что показатели качества, оптимизированные для отбраковки малого количества худших изображений могут оказаться непригодными для задачи выбора малого количества (или единственного) лучшего изображения.

Направление дальнейших исследований — разработка методов оценки показателей качества, приспособленных для выбора наилучшего (а не наихудшего) изображения последовательности; исследование возможностей сочетания двух методов выбора.

References

- [1] *Bowyer K. W., Hollingsworth K., Flynn P. J.* Handbook of Iris Recognition / Eds. Mark Burge and Kevin W. Bowyer. — Heidelberg: Springer, 2012. 407 p.
- [2] *International Biometric Group Comparative Biometric Testing Round 7 Public Report (2009)* // http://l.b5z.net/i/u/6084428/i/CBT7_IBGReport.pdf.
- [3] *Zhu X.-D., Liu Y.-N., Ming X., Cui Q.-L.* A quality evaluation method of iris images sequence based on wavelet coefficients in «region of interest» *4th Conference (Internatioanl) on Computer and Information Technology Proceedings*, 2004. P. 24–27.
- [4] *Pillai J. K., Patel V. M., Chellappa R., Ratha N. K.* Secure and robust iris recognition using random projections and sparse representations *IEEE PAMI*, 2011. Vol. 3. No. 9. P. 1877–1893.

- [5] Ren H., Yuqing H., Pan J., Li L. Super resolution reconstruction and recognition for iris image sequence biometric recognition *Lecture Notes in Computer Science*, 2012. Vol. 7701. P. 193–201.
- [6] Galbally J., Ortiz-Lopez J., Fierrez J., Ortega-Garcia J. Iris liveness detection based on quality related features *5th IAPR Conference (International) "Biometrics" Proceedings*, 2012. P. 271.
- [7] Bandi A. L., Thotakura V. P., Ravi S. Identity recognizing using iris scan with multiple frames of video *Int. J. Computer Sci. Eng.*, 2012. Vol. 4. No. 3. P. 388–391.
- [8] Hollingsworth K. P., Bowyer K. W., Flynn P. J. Image averaging for improved iris recognition *3rd Conference (International) "Biometrics" Proceedings*. — Alghero, Italy, 2009. P. 1112–1121.
- [9] Mahadeo N. K., Paplinski A. P., Ray S. Optimization of iris codes for improved recognition *IEEE Conference "Computer Vision and Pattern Recognition" Proceedings*, 2014. P. 48–55.
- [10] Feddaoui N., Mahersia H., Hamrouni K. Improving iris recognition performance using quality measures // *Advanced Biometric Technologies: Ch. 12* / Eds. Girija Chetty and Jucheng Yang. — 2011. 382 p.
- [11] Kalka N. D., Dorairaj V., Shah Y. N., Schmid N. A. Cukic B. Image quality assessment for iris biometric *24th Annual Meeting of the Gesellschaft für Klassifikation Proceedings*, 2002. P. 445–452.
- [12] Vatsa M., Singh R., Noore A. Improving iris recognition performance using segmentation, quality enhancement, match score fusion, and indexing *IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics. Part B: Cybernetics*, 2008. Vol. 38. No. 4. P. 1021–1035.
- [13] Zuo J., Schmid N. A. An automatic algorithm for evaluating the precision of iris segmentation *2nd IEEE Conference (International) Biometrics: Theory, Applications and Systems*. Arlington, VA, USA, 2008.
- [14] *National Institute of Standards and Technology*. Iris quality calibration and evaluation. <http://www.nist.gov/itl/iad/ig/irexii.cfm>.
- [15] *University of Bath*. Iris Image Database, (2005) <http://www.bath.ac.uk/elect-eng/research/sipg/irisweb/>.
- [16] *Chinese Academy of Sciences Institute of Automation*. Iris Image Database, version 3, 2005 <http://www.cbsr.ia.ac.cn/IrisDatabase.htm>.
- [17] *National Institute of Standards and Technology*. Iris Challenge Evaluation. <http://iris.nist.gov/ice/>.