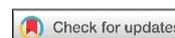


# ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ, ИЗОБРАЖЕНИЙ, РЕЧИ, ТЕКСТА И РАСПОЗНАВАНИЕ ОБРАЗОВ

## SIGNAL, IMAGE, SPEECH, TEXT PROCESSING AND PATTERN RECOGNITION



УДК 004.932  
<https://doi.org/10.37661/1816-0301-2022-19-3-62-73>

Оригинальная статья  
Original Paper

### Новый признак для описания изображений рукописной подписи на базе локальных бинарных шаблонов

В. В. Старовойтов<sup>✉</sup>, У. Ю. Ахунджанов

Объединенный институт проблем информатики  
Национальной академии наук Беларуси,  
ул. Сурганова, 6, Минск, 220012, Беларусь  
<sup>✉</sup>E-mail: [valerys@newman.bas-net.by](mailto:valerys@newman.bas-net.by)

#### Аннотация

**Цели.** Рассматривается задача описания инвариантных признаков цифрового изображения рукописной подписи, представляющих распределение ее локальных особенностей. Подробно описывается формирование принципиально нового подхода к вычислению таких признаков.

**Методы.** Используются методы обработки цифровых изображений. Сначала изображение преобразуется в бинарное представление, затем выполняется его морфологическая и медианная фильтрация. Далее с помощью метода главных компонент осуществляется поворот изображения для придания подписи горизонтальной ориентации. Вырезается описывающий подпись прямоугольник и масштабируется в шаблон определенного размера (в статье использовался шаблон размером 300×150 пикселей). После этого формируется граница подписи. По ее бинарному контуру вычисляются локальные бинарные шаблоны, т. е. каждому пикселу ставится в соответствие число от 0 до 255, которое описывает расположение контурных пикселей в окрестности 3×3 каждого пикселя. Формируется гистограмма вычисленных шаблонов для 256 интервалов. Первый и последний интервалы отбрасываются, так как они соответствуют всем черным и белым пикселям в окрестности и не являются информативными. Оставшиеся 254 числа представляют собой массив новых локальных признаков подписи.

**Результаты.** Исследования выполнены на базах оцифрованных подписей TUIT и CEDAR, содержащих истинные и поддельные подписи 80 человек. Точность корректной верификации подписей на этих базах составила порядка 78 и 70 %.

**Заключение.** Экспериментально подтверждена возможность применения предложенного признака для решения задач верификации подлинности рукописной подписи.

**Ключевые слова:** оцифрованная подпись, верификация, обработка изображений, математическая морфология, структурирующий элемент, локальный бинарный шаблон, гистограмма, признак описания подписи

Для цитирования. Старовойтов, В. В. Новый признак для описания изображений рукописной подписи на базе локальных бинарных шаблонов / В. В. Старовойтов, У. Ю. Ахунджанов // Информатика. – 2022. – Т. 19, № 3. – С. 62–73. <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2022-19-3-62-73>

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию | Received 25.07.2022

Подписана в печать | Accepted 22.08.2022

Опубликована | Published 29.09.2022

## A new feature for handwritten signature image description based on local binary patterns

Valery V. Starovoitov<sup>✉</sup>, Umidjon Yu. Akhundjanov

*The United Institute of Informatics Problems  
of the National Academy of Sciences of Belarus,  
st. Surganova, 6, Minsk, 220012, Belarus*

<sup>✉</sup>E-mail: [valerys@newman.bas-net.by](mailto:valerys@newman.bas-net.by)

### Abstract

**Objectives.** The problem of describing the invariant features of a digital image of handwritten signature that describes the distribution of its local features is considered. The formation of fundamentally new approach to the calculation of such features is described.

**Methods.** Digital image processing methods are used. First an image is converted into a binary representation, then its morphological and median filtering is performed. Then using the method of principal components, the image is rotated to give the signature a horizontal orientation. A rectangle describing the signature is cut out, then it is scaled to the template of a certain size. In the article the template of 300×150 pixels was used. Then the border of the signature is formed. Local binary patterns are calculated from its binary contour, i.e. each pixel is assigned a number from 0 to 255, which describes the location of the edge pixels in 3×3 neighborhood of each pixel. A histogram of calculated patterns for 256 intervals is formed. The first and last intervals are discarded because they correspond to all black and white pixels in the neighborhood and are not informative. The remaining 254 numbers of the array form new local features of the signature.

**Results.** The studies were performed on the bases of digitized signatures TUIT and CEDAR containing true and fake signatures of 80 persons. The accuracy of correct verification of signatures on these bases was about 78 % and 70 %.

**Conclusion.** The possibility of using the proposed possibilities for solving the problems of verifying the authenticity of handwritten signatures has been experimentally confirmed.

**Keywords:** digitized signature, verification, image processing, mathematical morphology, structuring element, local binary template, histogram, sign description attribute

**For citation.** Starovoitov V. V., Akhundjanov U. Yu. *A new feature for handwritten signature image description based on local binary patterns*. *Informatika [Informatics]*, 2022, vol. 19, no. 3, pp. 62–73 (In Russ.). <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2022-19-3-62-73>

**Conflict of interest.** The authors declare of no conflict of interest.

**Введение.** Рукописная подпись широко применяется с давних времен для удостоверения подлинности документов и верификации личности. Традиционно анализ подписи используется при проведении криминалистической экспертизы. Для эффективной верификации подписи необходимо привлечение специалистов, что увеличивает стоимость этой процедуры, снижает производительность ее выполнения и вносит субъективность в результат анализа. Таким образом, задача разработки эффективных систем автоматизированного распознавания подлинности рукописной подписи является актуальной [1–4].

Верификация – это подтверждение соответствия представленной биометрической характеристики человека определенному идентификатору, который указывает пользователь [5]. Про-

цедура выполняется путем сравнения кода (из представленной биометрической характеристики) с кодами, хранящимися в базе данных и соответствующими определенному идентификатору пользователя. Проблема проверки подлинности рукописной подписи относится к задачам распознавания образов. Основные сложности с распознаванием подписи связаны со следующими факторами:

- подпись представляет собой краткое, малоинформативное, не всегда инвариантное представление данных;
- она может быть выполнена разными предметами (шариковыми либо чернильными ручками, карандашами), иметь разные оттенки цвета и толщину линий;
- почерки разных людей естественным образом бывают похожи;
- подпись человека всегда вариативна;
- злоумышленники могут подделывать подписи, в том числе с применением технических средств.

Верификацию рукописной подписи можно выполнять статически в режиме online и динамически в режиме offline. Статическое, или offline-, распознавание подписи выполняется после того, как ее образ на бумаге был оцифрован. Затем цифровые изображения преобразуются и анализируются [1–3]. В динамических, или online-, системах анализ начинается в процессе написания подписи. Это позволяет дополнительно собирать информацию о последовательности координат  $x$  и  $y$  точек при написании подписи, информацию о силе нажатия, скорости написания и т. д. У статического режима проверки подписи меньше информативных признаков, что делает его более сложным [1, 2].

Для решения задачи распознавания подписи человека большое значение имеет ее инвариантное представление в виде цифрового изображения. Для этого изображение необходимо подвергнуть предварительной обработке.

**Основные этапы предварительной обработки.** В работе были определены следующие основные этапы предварительной обработки исходных цифровых изображений подписей (ИЦП):

- оцифровка ИЦП с разрешением порядка 600 dpi;
- преобразование ИЦП в бинарное изображение подписи (БИП);
- фильтрация БИП методами математической морфологии для стабилизации толщины линий;
- медианная фильтрация БИП;
- нормализация ориентации БИП;
- вырезание описывающего БИП прямоугольника;
- масштабирование БИП в шаблон заданного размера;
- выделение краев нормализованного бинарного изображения подписи;
- вычисление локальных бинарных шаблонов (local binary patterns, LBP) признаков контура изображения подписи;
- построение гистограммы вычисленных LBP-признаков.

Исходное изображение подписи может быть сделано разными чернилами, например синего или черного цвета. Поэтому стандартное преобразование цветного изображения в полутоновое может привести к частичной потере информации. Проще вычислить сумму яркостей цифрового изображения подписи в каждом из трех RGB-каналов и в качестве полутонового представления подписи выбрать тот канал, в котором сумма максимальна. Далее оно преобразуется в бинарное изображение методом Отсу [6]. Это преобразование изображений с глобальным порогом. При однородном фоне данный метод хорошо сегментирует изображение. На рис. 1 показан пример преобразования ИЦП в БИП методом Отсу.

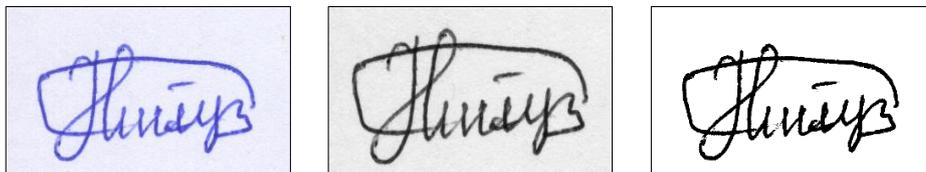


Рис. 1. Преобразование ИЦП в бинарное представление  
*Fig.1. Transformation of original digital image of a signature into binary representation*

**Операции математической морфологии.** Бинарные изображения легко интерпретировать в виде множества черных точек. Если яркость пиксела равна единице (черный цвет), он принадлежит подписи, если нулю (белый цвет) – фону. К такому представлению применимы методы математической морфологии, где важную роль играет понятие структурирующего элемента. Он задается в виде небольшой матрицы, состоящей из 0 и 1 и фиксированного центра элемента. Размер и форма элемента определяют результат морфологических операций [7]. На практике чаще используются симметричные структурирующие элементы (рис. 2), центр которых расположен в центре определяющей их матрицы.

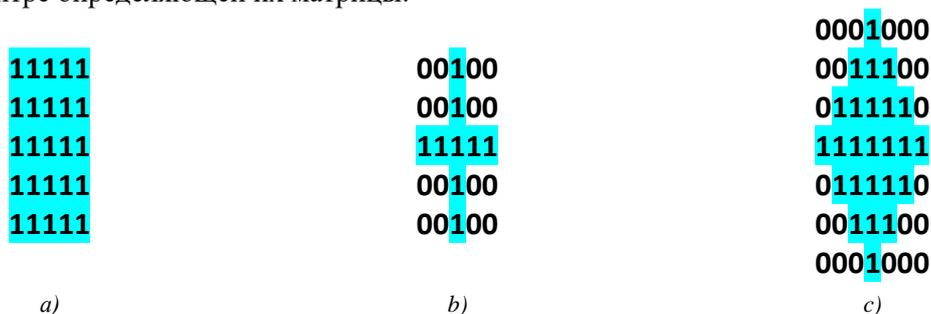


Рис. 2. Примеры структурирующих элементов: а) квадрат размерностью 5×5; б) крест размерностью 5×5; в) ромб размерностью 7×7

Fig. 2. Examples of structuring elements: a) square with dimension of 5×5; б) cross with dimension of 5×5; в) rhombus with dimension of 7×7

Основными операциями бинарной математической морфологии являются дилатация (dilation), эрозия (erosion), замыкание (closing) и отмыкание (opening) [5]. В результате выполнения эрозии исходное множество черных пикселей ужимается в соответствии с формой структурирующего элемента. Следует отметить, что в результате операции эрозии на изображениях могут исчезнуть объекты, размер которых меньше структурирующего элемента. Эрозия бинарного изображения  $B$  структурирующим элементом  $S$  обозначается  $B \ominus S$  и задается выражением  $B \ominus S = \{b | b + s \in B \forall s \in S\}$ .

Пример бинарного представления подписи до применения математической морфологии приведен на рис. 3. При увеличении изображения подписи можно увидеть неровные края изображения, которые требуют морфологической коррекции изображения для более точного выделения краев подписи. Использование краев подписи делает ее представление инвариантным к толщине линии.

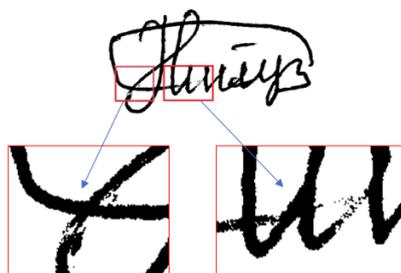


Рис. 3. Пример бинарного представления подписи без фильтрации  
 Fig. 3. An example of binary signature representation without filtering

Дилатация – это процедура, обратная эрозии. Она расширяет множество черных пикселей с учетом размеров и формы структурирующего элемента. Дилатация бинарного изображения  $B$  структурирующим элементом  $S$  обозначается  $B \oplus S$  и задается следующим образом:

$$B \oplus S = \bigcup_{b \in B} S_b.$$

Замыкание – это операция, которая состоит из последовательного применения операций дилатации и эрозии. Замыкание бинарного изображения  $B$  структурирующим элементом  $S$  обозначается  $B \bullet S$  и задается выражением  $B \bullet S = (B \oplus S) \ominus S$ .

Результат обработки БИП с помощью операций математической морфологии и структурирующим элементом в форме креста размером  $5 \times 5$  (см. рис. 2, *b*) представлен на рис. 4. После обработки толщина подписи стала более однородной. Утолщение линий можно компенсировать эрозией. Применение морфологических операций позволяет избавиться от искажений подписи, возникающих в процессе ее написания. Медианный фильтр с маской  $5 \times 5$  удаляет импульсный шум. На рис. 5 показан результат исправления фрагментов подписи, изображенных на рис. 3.

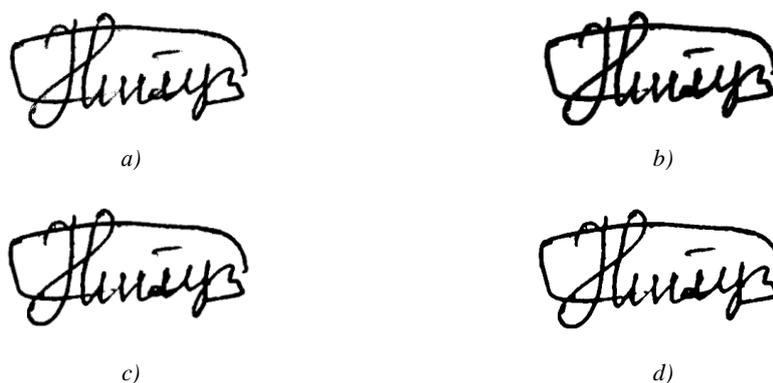


Рис. 4. Применение бинарной морфологии и фильтрации для рукописной подписи: *a*) исходное бинарное изображение; *b*) изображение после дилатации; *c*) после эрозии; *d*) после медианной фильтрации с маской  $5 \times 5$

*Fig. 4. Application of binary morphology and filtering for handwritten signature: a) original binary image; b) image after dilation; c) after erosion; d) after median filtering with  $5 \times 5$  mask*

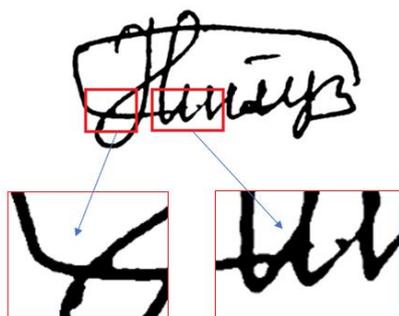


Рис. 5. Улучшение бинарного представления подписи в результате применения математической морфологии и фильтрации

*Fig. 5. Improving the binary representation of the signature as a result of applying mathematical morphology and filtering*

**Поворот и выделение контуров рукописной подписи.** На следующем этапе предварительной обработки выполняются поворот и приведение изображения подписи к определенному стандартному размеру, который сохраняет индивидуальные особенности ее начертания. Поворот выполняется для множества черных пикселей методом вычисления главных компонент (principal component analysis, PCA). В данном случае вычисляются две компоненты. Угол между главной компонентой и горизонтальной осью определяет угол поворота множества черных пикселей. Подробности приведены в работе [8].

Морфологические операции можно также использовать для выделения границ бинарного объекта. Граничные пиксели имеют в своей окрестности как минимум один фоновый пиксел размером  $3 \times 3$ . Таким образом, применив оператор эрозии со структурирующим элементом такого же размера, можно удалить все граничные точки. Тогда граница, т. е. связанное множество пикселей, вычисляется как разность между исходным изображением и изображением, полученным в результате эрозии (рис. 6). Граница подписи является более инвариантным ее представлением, чем скелет, так как меньше зависит от толщины линий.



Рис. 6. Пример выделения контуров подписи  
 Fig. 6. An example of highlighting the contours of the signature

**Новый признак подписи на базе локальных бинарных шаблонов.** В качестве признака, описывающего структуру подписи, предлагается использовать LBP, вычисляемые по бинарному представлению контура подписи. Они известны с 1994 г. как текстурные признаки, определяемые для полутоновых изображений, и вычисляются в окрестности каждого пиксела как однобайтовое число. LBP описывают окрестность пиксела размером  $3 \times 3$  в зависимости от значений яркости [5, 9, 10]. Порядок расположения соседей зафиксирован, их позиции пронумерованы от 0 до 7. Если яркость  $i$ -го соседнего пиксела больше яркости центрального, ему присваивается код  $2^i$ , если меньше – код 0. Затем коды всех восьми соседей суммируются. Сумма находится в диапазоне от 0 до 255 и присваивается в виде текстурного кода центральному пикселу окрестности.

В настоящей работе впервые предлагается применить вычисление LBP к пикселям бинарного представления контуров подписи. Они определяются так же, как описано выше, но код  $2^i$  присваивается  $i$ -му соседнему пикселу при условии, что он имеет черный цвет (значение 0) (рис. 7).



Рис. 7. Вычисление LBP-числа на бинарном изображении  
 Fig. 7. LBP-number calculation on a binary image

Десятичная форма получающегося восьмибитного двоичного числа может быть представлена на следующим образом:

$$LBP(x_c, y_c) = \sum_{n=0}^7 s(i_n, i_c) 2^n,$$

где  $i_c$  соответствует значению центрального пиксела  $(x_c, y_c)$ ,  $i_n$  – значениям восьми смежных пикселей, а знаковая функция  $s(x)$  определена как равенство

$$s(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{если } x = y = 0, \\ 0 & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

После кодирования всех пикселей изображения подписи строится гистограмма вычисленных LBP-значений, представляющая собой массив из 256 элементов. Из этого массива отбрасываются первый и последний элементы, соответствующие вариантам кода, когда все восемь соседних пикселей имеют белые либо черные значения. Получившийся набор из 254 чисел является новым инвариантным LBP-признаком, описывающим распределение локальных особенностей подписи человека независимо от ее цвета, толщины линий, исходных размеров и ориентации.

**Тестирование инвариантности нового признака подписи.** Для проверки возможности использования представленного выше признака для описания индивидуальных особенностей подписи человека был выполнен следующий эксперимент. Определялся коэффициент корреляции Пирсона между LBP-признаками описанного типа, вычисленными для сравниваемых подписей. Если эти признаки определяют настоящие подписи, сделанные одним человеком, корреляция между ними должна быть высокой, а корреляция между признаками, вычисленными для истинной и поддельной подписи, должна быть ниже. Коэффициент корреляции Пирсона рассчитывается по формуле

$$r_{xy} = \frac{\sum (x_i - x_{\text{сред}})(y_i - y_{\text{сред}})}{\sqrt{\sum (x_i - x_{\text{сред}})^2 \sum (y_i - y_{\text{сред}})^2}},$$

где  $x_i, y_i$  – значения LBP-признаков двух подписей;  $x_{\text{сред}}, y_{\text{сред}}$  – их средние значения.

Отметим, что если подпись была скопирована, то коэффициент корреляции при сравнении с оригинальной подписью может быть равен единице или очень близок к ней.

Инвариантность описания подписей с помощью LBP-признаков тестировалась на двух базах данных рукописных подписей: TUIT, сформированной с помощью студентов Ферганского филиала Ташкентского университета информационных технологий имени Мухаммада аль-Хорезми, и CEDAR (URL: <http://www.cedar.buffalo.edu/NIJ/data/signatures.rar>). Из каждой базы использовано по 400 изображений рукописных подписей 40 человек, по пять подлинных и пять поддельных подписей каждого человека. В экспериментах все изображения преобразовывались, как описано выше, в шаблон размером 300×150 пикселей.

LBP-признаки подлинных подписей каждого человека из указанных выше баз данных сравнивались между собой следующим образом. Первая истинная (org) подпись первого человека сравнивалась с его остальными истинными подписями: (Org1.1, Org1.2), (Org1.1, Org1.3), (Org1.1, Org1.4), (Org1.1, Org1.5), затем вторая подпись с остальными: (Org1.2, Org1.3), (Org1.2, Org1.4), (Org1.2, Org1.5), третья с остальными и т. д. Эти сравнения выполнялись для всех истинных подписей 40 человек. Всего вычислялись 400 коэффициентов корреляции между LBP-признаками истинных подписей 40 человек в каждой из двух баз. Эти данные составили класс 1 (истинные подписи). Затем LBP-признаки всех поддельных (false) подписей каждого из 40 человек сравнивались с двумя случайно выбранными подлинными подписями того же человека, например: (F1.1, Org1.1), (F1.2, Org1.1), (F1.3, Org1.1), (F1.4, Org1.1), (F1.5, Org1.1), (F1.1, Org1.3), (F1.2, Org1.3), (F1.3, Org1.3), (F1.4, Org1.3), (F1.5, Org1.3). Эти 400 чисел составили класс 2 (поддельные и истинные подписи). Схематично процедура сравнения представлена на рис. 8, общее количество сравниваемых пар истинных и поддельных подписей из каждой базы равно 800.

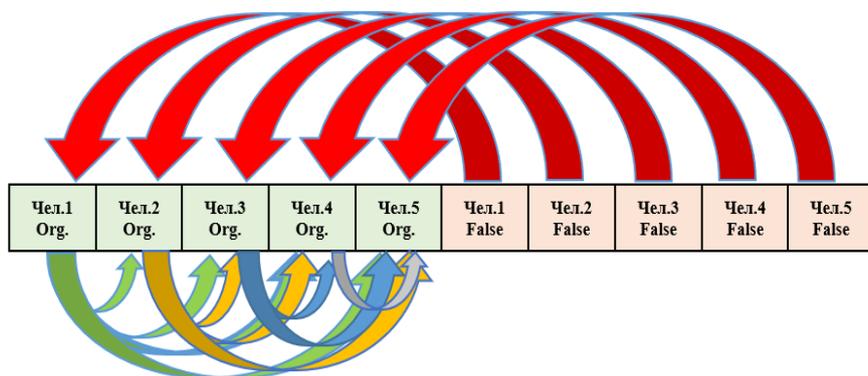


Рис. 8. Принцип сравнения подлинных и поддельных подписей одного человека

Fig. 8. The principle of comparing genuine and fake one person's signature

На рис. 9 приведены примеры LBP-гистограмм нескольких рукописных подписей и коэффициенты корреляции между ними.

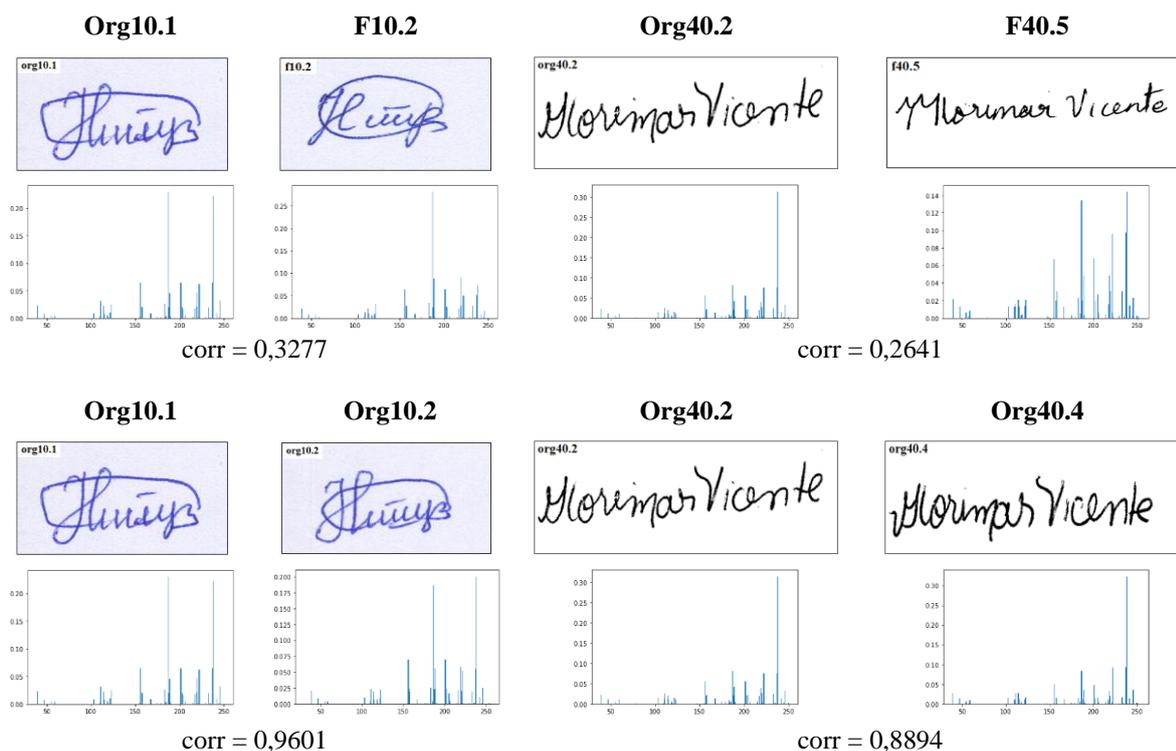


Рис. 9. Сравнение LBP-гистограмм и вычисленные по ним коэффициенты корреляции

Fig. 9. Comparison of LBP-histograms and calculated correlation coefficients

В процессе выполнения экспериментов выявлены случаи, когда поддельные подписи были очень похожи на реальные и коэффициент корреляции Пирсона между истинной подписью и поддельной был высоким. Например, на рис. 10 показаны поддельные подписи, у которых корреляция по данному признаку составляет 0,8771 и 0,7589. У отдельных людей, наоборот, их собственноручные подписи могут быть существенно различными.

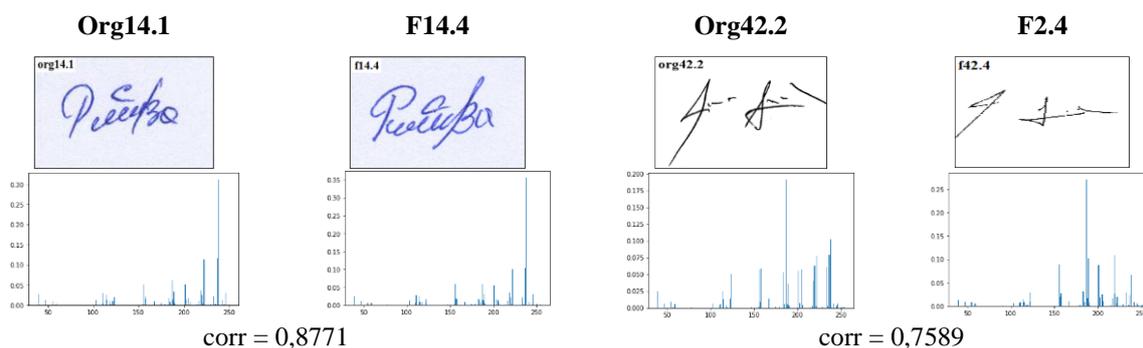


Рис. 10. Примеры высокой корреляции LBP-признака для подлинных и поддельных подписей

*Fig. 10. Examples of high LBP correlation for genuine and fake signatures*

Далее все множество коэффициентов корреляции между LBP-признаками истинных и поддельных подписей разных людей разделялось на два класса методом линейно-дискриминантного анализа [12, 13]. Порог, разделяющий поддельные и подлинные подписи, равнялся  $T = 0,6$  (рис. 11).

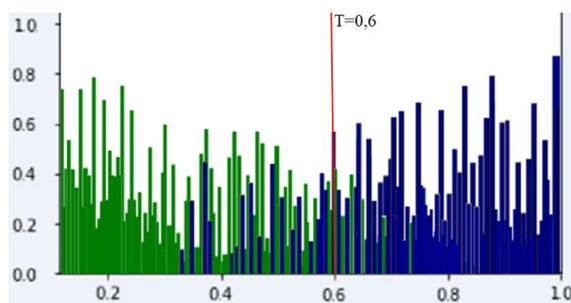


Рис. 11. График коэффициентов корреляции между LBP-признаками подлинных (синего цвета) и поддельных (зеленого цвета) подписей

*Fig. 11. Plot of correlation coefficients between LBP features of genuine (blue) and fake (green) signatures*

Результаты классификации собраны в матрицы ошибок (confusion matrix). В табл. 1 представлены количественные данные верно и ошибочно классифицированных по коэффициенту корреляции истинных подписей одного человека (класс 1) и истинных с поддельными подписями одного человека (класс 2) из баз CEDAR и TUIT.

Таблица 1  
Матрицы ошибок классификации пар подписей

Table 1  
Confusion matrices in the classification of pairs of signatures

Предсказанные классы <i>Predicted classes</i>	Истинная классификация <i>True classification</i>	
	Класс 1 (истинные – истинные) <i>Class 1 (true – true)</i>	Класс 2 (истинные – поддельные) <i>Class 2 (true – fake)</i>
<i>Для базы CEDAR</i> <i>For CEDAR base</i>		
Класс 1	319	92
Класс 2	81	308
<i>Для базы TUIT</i> <i>For TUIT base</i>		
Класс 1	284	108
Класс 2	116	292

По матрицам ошибок вычислены оценки результатов классификации: accuracy – доля правильных ответов или точность; balanced accuracy – сбалансированная доля правильных ответов; recall – полнота; F1 – гармоническое среднее (формулы приведены в работе [11]) (табл. 2).

Таблица 2  
 Результаты классификации рукописных подписей

Table 2  
 The results of handwritten signatures classification

База данных Database	Accuracy	Balanced Accuracy	Recall	F1
CEDAR	0,7837	0,7837	0,7975	0,7839
TUIT	0,6950	0,7055	0,7300	0,6876



Рис. 12. Пары подлинных подписей одного человека из базы TUIT, имеющие низкий коэффициент корреляции между их LBP-признаками

Fig. 12. Pairs of genuine signatures of the same person from the TUIT database that have low correlation coefficient between LBP features

Часто истинные подписи одного человека визуальнo существенно отличаются друг от друга. На рис. 12 приведены примеры нескольких пар таких подписей из базы TUIT и коэффициенты корреляции между их LBP-признаками.

**Заключение.** Подпись человека очень вариативна, имеет разные размеры, ориентацию и цвет. Две подписи одного человека, сделанные в разное время, могут иметь разное количество элементов. В статье предложен принципиально новый признак описания рукописной подписи человека. Он инвариантен к ее размеру, повороту, цвету, толщине и небольшим изменениям, присущим человеческому почерку. Признак представляет собой массив значений гистограммы LBP-чисел, вычисленных по бинарному представлению границы геометрически нормализованной подписи. Эксперименты показали, что, вычисляя корреляцию Пирсона между такими признаками, можно различать подписи, сделанные одним человеком, и отличать поддельные под-

писи. Возможность разделения подлинных и поддельных подписей подтверждена с помощью линейно-дискриминантного анализа.

Для дальнейшего повышения точности распознавания поддельной рукописной подписи ЛВР-признаки, описанные в данной статье, будут использованы в классификаторах на базе искусственных нейронных сетей и случайного леса.

**Вклад авторов.** В. В. Старовойтов выдвинул предположение о новом признаковом описании подписи, осуществил постановку задачи исследования и научное редактирование статьи; У. Ю. Ахунджанов экспериментально подтвердил выдвинутое предположение, определил последовательность экспериментальных исследований, разработал ПО, выполнил эксперименты и проанализировал полученные результаты, подготовил иллюстративный материал.

### Список использованных источников

1. Kaur, H. Signature identification and verification techniques: state-of-the-art work [Electronic resource] / H. Kaur, M. Kumar // *J. of Ambient Intelligence and Humanized Computing*. – 2021. – P. 1–19. – Mode of access: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12652-021-03356-w>. – Date of access: 24.04.2022. <https://doi.org/10.1007/s12652-021-03356-w>
2. Hafemann, L. G. Offline handwritten signature verification – Literature review / L. G. Hafemann, R. Sabourin, L. S. Oliveira // *Seventh Intern. Conf. on Image Processing Theory, Tools and Applications, Montreal, Canada, 28 Nov. – 01 Dec. 2017. – Montreal, 2017. – P. 8.* <https://doi.org/10.1109/ipta.2017.8310112>
3. A perspective analysis of handwritten signature technology / M. Diaz [et al.] // *ACM Computing Surveys*. – 2019. – Vol. 51, no. 6. – P. 1–39. <https://doi.org/10.1145/3274658>
4. Kalera, M. K. Offline signature verification and identification using distance statistics / M. K. Kalera, S. Srihari, A. Xu // *Intern. J. of Pattern Recognition and Artificial Intelligence*. – 2004. – Vol. 18, no. 7. – P. 1339–1360. <https://doi.org/10.1142/S0218001404003630>
5. Шапиро, Л. Компьютерное зрение / Л. Шапиро, Дж. Стокман ; пер. с англ. – 3-е изд. – М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2015. – 763 с.
6. Otsu, N. A threshold selection method from gray-level histograms / N. Otsu // *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*. – 1979. – Vol. 9, no. 1. – P. 62–66.
7. A writer-independent off-line signature verification system based on signature morphology / R. Kumar [et al.] // *Proc. of the First Intern. Conf. on Intelligent Interactive Technologies and Multimedia, Allahabad, India, 27–30 Dec. 2010. – Allahabad, 2010. – P. 261–265.* <https://doi.org/10.1145/1963564.1963610>
8. Ахунджанов, У. Ю. Предварительная обработка изображений рукописных подписей для последующего распознавания / У. Ю. Ахунджанов, В. В. Старовойтов // *Системный анализ и прикладная информатика*. – 2022. – № 2. – С. 4–9. <https://doi.org/10.21122/2309-4923-2022-2-4-9>
9. Kamal, N. N. Offline signature recognition using centroids of local binary vectors / N. N. Kamal, L. E. George // *Intern. Conf. on New Trends in Information and Communications Technology Applications, Baghdad, Iraq, 2–4 Oct. 2018. – Baghdad, 2018. – Vol. 938. – P. 255–268.* [https://doi.org/10.1007/978-3-030-01653-1\\_16](https://doi.org/10.1007/978-3-030-01653-1_16)
10. Jadhav, T. Handwritten signature verification using local binary pattern features and KNN / T. Jadhav // *Intern. Research J. of Engineering and Technology*. – 2019. – Vol. 6, no. 4. – P. 579–586.
11. Старовойтов, В. В. Сравнительный анализ оценок качества бинарной классификации / В. В. Старовойтов, Ю. И. Голуб // *Информатика*. – 2020. – Т. 17, № 1. – С. 87–101. <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2020-17-1-87-101>
12. Huh, S. Linear discriminant analysis for signatures / S. Huh, D. Lee // *IEEE Transactions on Neural Networks*. – 2010. – Vol. 21, no. 12. – P. 1990–1996.
13. Bharathi, R. K. Discriminative DCT: An efficient and accurate approach for off-line signature verification / R. K. Bharathi, B. H. Shekar // *Fifth Intern. Conf. on Signal and Image Processing, Bangalore, India, 8–10 Jan. 2014. – Bangalore, 2014. – P. 179–184.* <https://doi.org/10.1109/ICSIP.2014.34>

---

### References

1. Kaur H., Kumar M. Signature identification and verification techniques: state-of-the-art work. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 2021, pp. 1–19. Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12652-021-03356-w> (accessed 24.04.2022). <https://doi.org/10.1007/s12652-021-03356-w>

2. Hafemann L. G., Sabourin R., Oliveira L. S. Offline handwritten signature verification – Literature review. *Seventh International Conference on Image Processing Theory, Tools and Applications, Montreal, Canada, 28 November – 01 December 2017*. Montreal, 2017, p. 8. <https://doi.org/10.1109/ipta.2017.8310112>
3. Diaz M., Ferrer M. A., Impedovo D., Malik M. I., Pirlo G., Plamondon R. A perspective analysis of handwritten signature technology. *ACM Computing Surveys*, 2019, vol. 51, no. 6, pp. 1–39. <https://doi.org/10.1145/3274658>
4. Kalera M. K., Srihari S., Xu A. Offline signature verification and identification using distance statistics. *International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 2004, vol. 18, no. 7, pp. 1339–1360. <https://doi.org/10.1142/S0218001404003630>
5. Shapiro L. G., Stockman G. C. *Computer Vision*. 1st ed., 2001, 608 p.
6. Otsu N. A threshold selection method from gray-level histograms. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 1979, vol. 9, no. 1, pp. 62–66.
7. Kumar R., Kundu L., Sharma J. D., Chanda B. A writer-independent off-line signature verification system based on signature morphology. *Proceedings of the First International Conference on Intelligent Interactive Technologies and Multimedia, Allahabad, India, 27–30 December 2010*. Allahabad, 2010, pp. 261–265. <https://doi.org/10.1145/1963564.1963610>
8. Akhundjanov U. Yu., Starovoitov V. V. *Pre-processing of handwritten signature images for following recognition*. *Sistemnyj analiz i prikladnaja informatika [System Analysis and Applied Information Science]*, 2022, no. 2, pp. 4–9 (In Russ.). <https://doi.org/10.21122/2309-4923-2022-2-4-9>
9. Kamal N. N., George L. E. Offline signature recognition using centroids of local binary vectors. *International Conference on New Trends in Information and Communications Technology Applications, Baghdad, Iraq, 2–4 October 2018*. Baghdad, 2018, vol. 938, pp. 255–268. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-01653-1\\_16](https://doi.org/10.1007/978-3-030-01653-1_16)
10. Jadhav T. Handwritten signature verification using local binary pattern features and KNN. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 2019, vol. 6, no. 4, pp. 579–586.
11. Starovoitov V. V., Golub Y. I. *Comparative study of quality estimates of binary classification*. *Informatika [Informatics]*, 2020, vol. 17, no. 1, pp. 87–101 (In Russ.). <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2020-17-1-87-101>
12. Huh S., Lee D. Linear discriminant analysis for signatures. *IEEE Transactions on Neural Networks*. 2010, vol. 21, no. 12, pp. 1990–1996.
13. Bharathi R. K., Shekar B. H. Discriminative DCT: An efficient and accurate approach for off-line signature verification. *Fifth International Conference on Signal and Image Processing, Bangalore, India, 8–10 January 2014*. Bangalore, 2014, pp. 179–184. <https://doi.org/10.1109/ICSIP.2014.34>

### Информация об авторах

Старовойтов Валерий Васильевич, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси.  
E-mail: valerys@newman.bas-net.by

Ахунджанов Умиджон Юнус угли, аспирант, Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси.  
E-mail: umidjan\_90@mail.ru

### Information about the authors

Valery V. Starovoitov, D. Sc. (Eng.), Professor, Chief Researcher, The United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus.  
E-mail: valerys@newman.bas-net.by

Umidjon Yu. Akhundjanov, Postgraduate Student, The United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus.  
E-mail: umidjan\_90@mail.ru