

АХУНДЖАНОВ У. Ю.¹, СТАРОВОЙТОВ В. В.^{1,2}

ОБ ИНВАРИАНТНОСТИ ЦИФРОВОГО ОПИСАНИЯ РУКОПИСНОЙ ПОДПИСИ

¹Государственное научное учреждение “Объединенный институт проблем информатики
Национальной академии наук Беларуси”

²Белорусский национальный технический университет

В статье представлены результаты экспериментов, выполненных с целью исследования инвариантности цифрового описания изображения рукописной подписи, представленной на бумажном носителе. Описание строится на базе нормализованного изображения подписи, оцифрованного в видимом диапазоне электромагнитного спектра сканером, с последующим вычислением распределения ее локальных особенностей. Экспериментально исследована изменчивость данного представления подписи относительно разных условий, имитирующих изменение ее цвета, ориентации на бумаге, толщины линии и размеров. Показано, что цифровое описание изображения рукописной подписи, ранее предложенное авторами, достаточно инвариантно относительно перечисленных условий ее исполнения для выполнения процедуры верификации рукописной подписи.

Ключевые слова: подпись; цифровое описание подписи; бинарное изображение подписи; локальный бинарный шаблон; инвариантность.

Введение

Для удостоверения подлинности документа обычно требуется знак подтверждения, для чего до сих пор традиционно используется рукописная подпись. Она представляет собой изображение, нанесенное человеком вручную с помощью пишущего средства на бумажный носитель документа. Подпись – это совокупность символов и линий, индивидуализирующих человека, часто она содержит несколько букв имени или фамилии. Как правило, подписи, сделанные одним человеком, различаются по исполнению, размерам и цвету. При определении подлинности подписи ее подобное представление получило название статического или офлайнного (offline signature), а методы верификации, использующие такое представление подписи, — статических или офлайнных методов [1-4, 14,15]. Чтобы подпись выполняла свои главные функции – удостоверение подлинности документа и его защиты от подделок, необходимо ее собственноручное выполнение [11, с. 50]. Подпись служит своего рода удостоверительным знаком человека, который позволяет идентифицировать и аутентифицировать ее производителя. Сложности, связанные с исследованием подлинности подписи, обусловлены спецификой данного почеркового материала, состоящей в дефиците полезной информации и единичном проявлении признаков [1-3,11-12].

Любые две рукописные подписи одного человека всегда имеют небольшие отклонения в исполнении, а их ориентация и размеры несколько отличаются.

Ранее авторы данной статьи предложили и начали исследования цифрового представления подписи формируемого посредством ее геометрической нормализации, бинаризации, выделения контурного представления и вычисления признаков на базе локальных бинарных шаблонов [14-15]. В данной статье выполнены исследования инвариантности предложенного представления подписи относительно размеров, поворотов, цвета подписи и ее нанесения ручками разных типов.

1. Этапы предварительной обработки и нормализации

Все цифровые изображения подписей подвергались предварительной обработке и нормализации с последующим вычислением локальных бинарных шаблонов (local binary patterns, LBP) вычисленных на бинарном представлении границ подписей согласно процедуре, описанной в статье [15] в следующей последовательности:

- оцифровка бумажных изображений подписей;
- преобразование цветных цифровых изображений 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 LBP признаков контура изображения подписи;
- построение гистограммы вычисленных LBP-признаков.

2. Исследование инвариантности цифрового описания рукописной подписи к повороту и размерам исходного изображения

Был выполнен следующий эксперимент. Подписи нескольких человек, представленные на бумажном носителе, вручную поворачивались на строго определенные углы и сканировались с разным разрешением. Целью эксперимента было исследование инвариантности нормализованного представления одной и той же бумажной подписи, оцифрованной при разных условиях, имитирующих изменение ее ориентации и размеров.

Для формирования набора исходных данных для данного эксперимента 20 человек нанесли каждый по 10 подписей на бумагу. Всего было

получено 200 рукописных подписей. Бумажные носители вручную поворачивались на -30° , -20° , -10° , -5° , 0° , $+5^\circ$, $+10^\circ$, $+20^\circ$. Каждая подпись была оцифрована в трех разрешениях: 300 dpi, 600 dpi, 1200 dpi и записана в виде цветных изображений в формате

bmp. Всего было сформировано 4800 цифровых представлений исходных подписей. Параметры построения набора экспериментальных данных приведены в Таблице 1.

Таблица 1 – Параметры построения набора экспериментальных данных

Число рукописных подписей	200
Восемь углов поворотов	-30° , -20° , -10° , -5° , 0° , $+5^\circ$, $+10^\circ$, $+20^\circ$
Три варианта разрешения при сканировании	300 dpi, 600 dpi, 1200 dpi
Общее число сформированных цифровых представлений	$4800 \rightarrow (200 \times 8 \times 3 = 4800)$
Количество сравнений нормализованных представлений подписей	$14400 \rightarrow (4800 \times 3 = 14400)$

На рисунках 1 и 2 приведены примеры отсканированных изображений рукописных подписей с разными углами поворота.

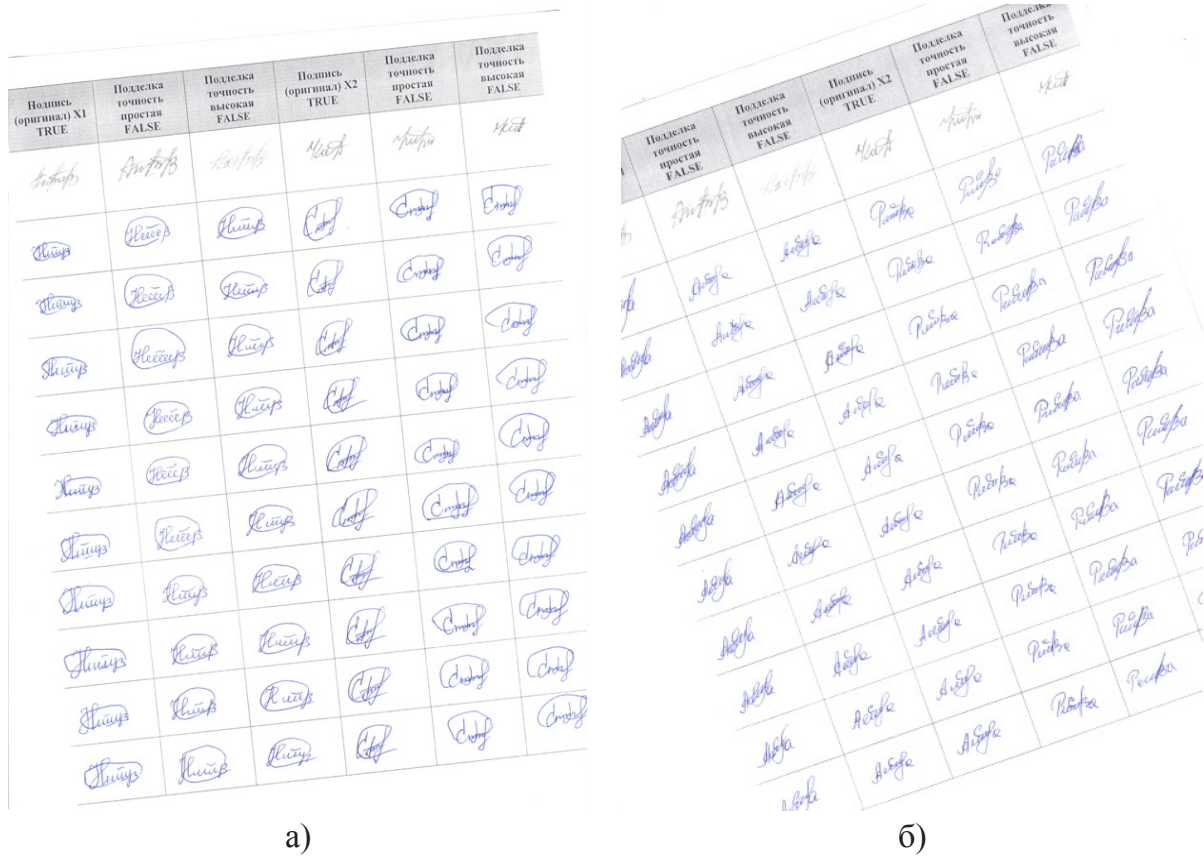


Рисунок 1 – Примеры отсканированных изображений листов с рукописными подписями, повернутыми на -5° (а) и на -20° (б)

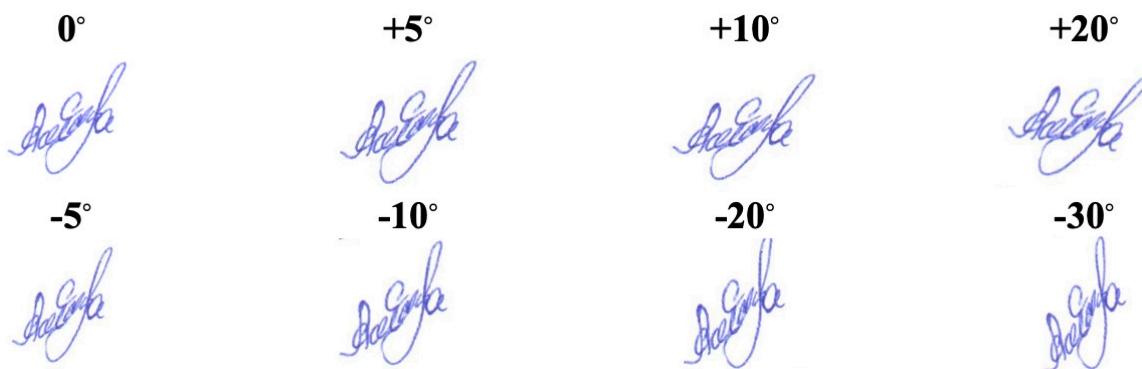


Рисунок 2 – Примеры вырезанных изображений рукописной подписи, отсканированной при разных углах поворотов

Разные цифровые представления одной подписи каждого человека сравнивались между собой. Признаки цифрового представления каждой рукописной подписи попарно сравнивались между собой посредством вычисления коэффициента корреляции Пирсона. Всего было получено 14400

коэффициентов корреляции между парами LBP-признаков цифровых представлений подписей. Коэффициенты корреляции 10 подписей, отсканированных в трех разрешениях, в качестве примеров представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Примеры корреляции между парами цифровых представлений рукописных подписей, оцифрованных с разным разрешением

Сравниваемые подписи 300 dpi и 600 dpi		коэф. сог.	Сравниваемые подписи 300 dpi и 1200 dpi		коэф. сог.	Сравниваемые подписи 600 dpi и 1200 dpi		коэф. сог.
org1	org1.1	0,9972	org1	org01	0,9875	org1.1	org01	0,9925
org2	org1.3	0,9980	org2	org02	0,9705	org1.3	org02	0,9811
org3	org1.3	0,9895	org3	org03	0,9921	org1.3	org03	0,9988
org4	org1.4	0,9955	org4	org04	0,9897	org1.4	org04	0,9967
org5	org1.5	0,9676	org5	org05	0,9778	org1.5	org05	0,9744
f1	f1.1	0,9702	f1	f0.1	0,9875	f1.1	f0.1	0,9670
f2	f1.2	0,9880	f2	f0.2	0,9705	f1.2	f0.2	0,9722
f3	f1.3	0,9601	f3	f0.3	0,9921	f1.3	f0.3	0,9880
f4	f1.4	0,9814	f4	f0.4	0,9897	f1.4	f0.4	0,9879
f5	f1.5	0,9699	f5	f0.5	0,9778	f1.5	f0.5	0,9877

На рисунке 3 приведены цифровые изображения рукописной подписи с разными углами поворота и разрешения (изображения уменьшены в целях экономии бумаги). По выше описанной

процедуре подписи подвергались предварительной обработке. На рисунке 4 приведены нормализованное представление подписи.

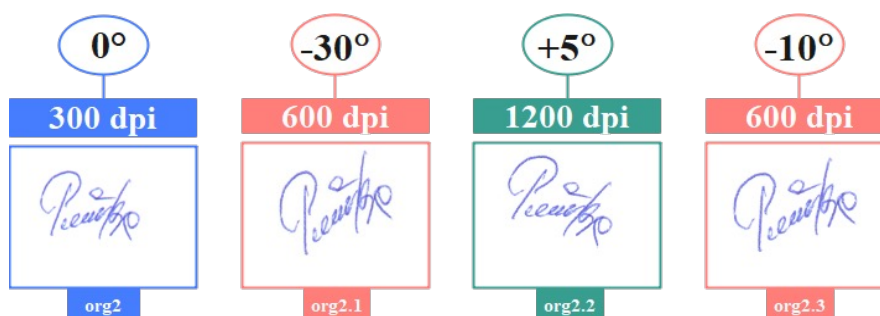


Рисунок 3 – цифровые представления оригинальной подписи с разными углами поворотов и разрешений

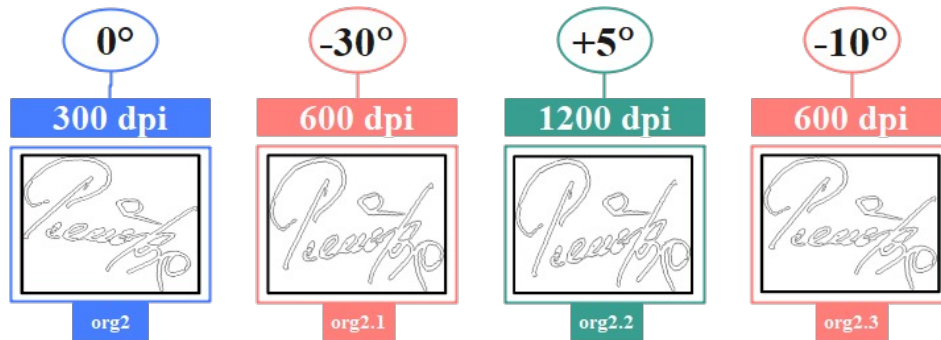


Рисунок 4 – Нормализованные представления рукописных подписей

Коэффициенты корреляции рукописных подписей, приведенных на рисунке 3, представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Примеры корреляции между цифровыми описаниями подписей, представленных на рисунке 2

Сравниваемые подписи		коэф. сог.	Сравниваемые подписи		коэф. сог.	Сравниваемые подписи		коэф. сог.
org2	org2.1	0,9632	org2	org2.2	0,9615	org2	org2.3	0,9675
org2.2	org2.3	0,9770	org2.1	org2.3	0,9855	org2.1	org2.2	0,9897

Значения всех коэффициентов корреляции были выше 0,961. На рисунке 5 приведены изображения рукописной подписи, оцифрованной с разрешениями 300 dpi, 600 dpi, 1200 dpi и гистограммы LBP признаков трех цифровых представлений этой

подписи. Коэффициент корреляции между первым и вторым набором признаков равен 0,9981, между первым и третьим – 0,9801, между вторым и третьим – 0,9962.

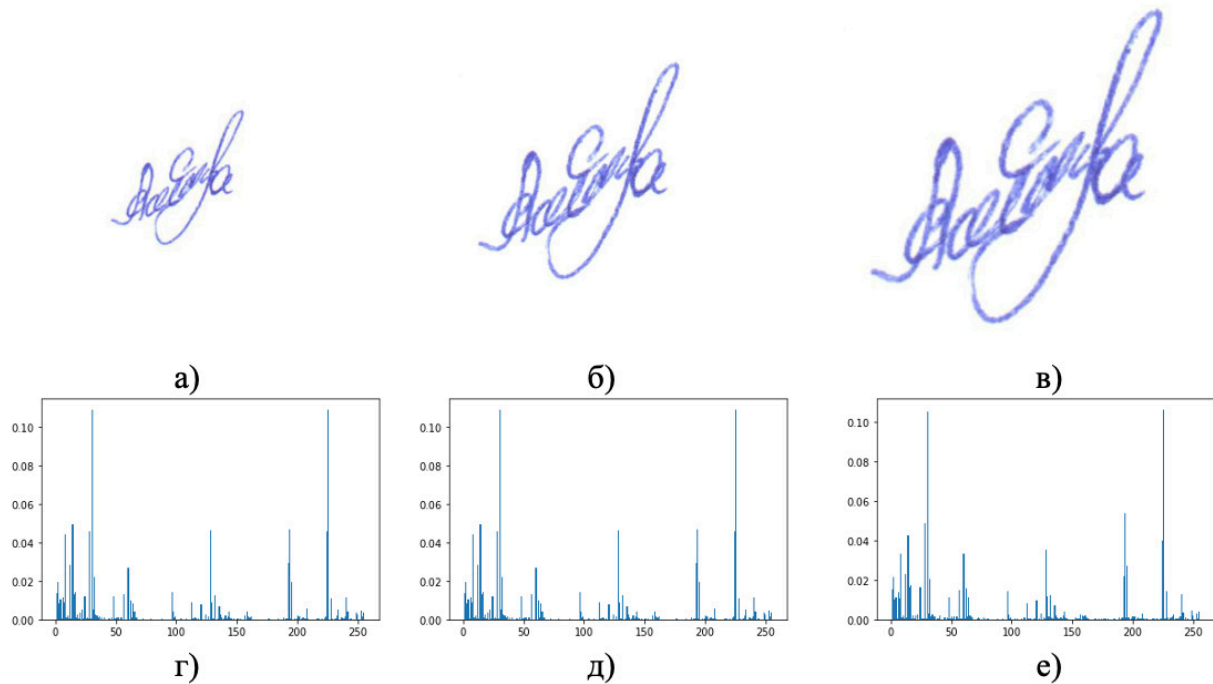


Рисунок 5 – (а)-(в)- Три цифровых представления оригинальной подписи при разрешениях 300 dpi, 600 dpi, 1200 dpi и гистограммы LBP признаков, вычисленных для нормализованных цифровых представлений

В таблице 5 представлены средние арифметические значения и стандартные отклонения коэффициентов корреляции между

всеми рукописными подписями, оцифрованными с разным разрешением. Значения всех коэффициентов корреляции были выше 0,978.

Таблица 5 – Средние арифметические значения и стандартные отклонения коэффициентов корреляции при сравнении подписей, отсканированных с разным разрешением

Разрешение	300 dpi и 600 dpi	300 dpi и 1200 dpi	600 dpi и 1200 dpi
$\mu \pm \sigma$	0,9793 \pm 0,010178	0,9781 \pm 0,010694	0,9809 \pm 0,009836

1. Исследование инвариантности цифрового описания рукописных подписей, отличающихся цветом и толщиной линий

В технико-криминалистической экспертизе при анализе рукописных подписей основное внимание исследователя уделяется нажимным характеристикам подписи [11-12]. Исследование таких характеристик ведется в трех направлениях: изучение глубины штрихов (например, с помощью профилографа) [11]; изучение ширины штрихов с помощью микроскопических измерений (в частях штрихов определяют пропорциональное соотношение ширины); изучение распределения красителя в штрихах, осуществляющееся

различными способами.

В данной работе исследованы представления оцифрованных рукописных подписей, выполненных разными ручками. Подписи отличаются друг от друга цветом исполнения и толщиной линий. В качестве экспериментальных данных было сформировано 60 рукописных подписей 10 человек. Инструментом сбора рукописных подписей послужили несколько ручек разных типов (шариковая ручка, гелевая ручка, капиллярная ручка) разных цветов, с головками разной толщины. На рисунке 6 приведены примеры подписей разного цвета и толщины.



Рисунок 6 – Цветные рукописные подписи выполненные: а) шариковой ручкой; б) гелевой ручкой; в) капиллярной ручкой; г) ручкой-роллером; д) шариковой ручкой розового цвета; е) шариковой ручкой зеленого цвета

При верификации нескольких подписей одного человека важно преобразовать их в максимально инвариантное представление. Эта задача решается на этапе предварительной обработки изображений, описанном в разделе 1. От выбора метода преобразования исходного цветного изображения в полутоновое представление зависит точность их описания и результат верификации. Опишем наиболее простые способы преобразования цветных изображений в полутоновые [5-8, 10] и (как простейший вариант) использование одного из компонент цвета R, G, B:

$$R = R \frac{255}{R_{\max}}; \quad G = G \frac{255}{G_{\max}}; \quad B = B \frac{255}{B_{\max}}; \quad (1)$$

$$\text{Gray1} = (R + G + B) / 3; \quad (2)$$

$$\text{Gray2} = 0,2989 \times R + 0,5870 \times G + 0,1140 \times B; \quad (3)$$

$$\text{Gray3} = 0,2126 \times R + 0,7152 \times G + 0,0722 \times B, \quad (4)$$

где R, G, B – значения яркостей красного, зеленого и синего каналов соответственно.

На рисунке 7 приведены примеры цветных рукописных подписей, их одноканальные представления R, G, B в виде полутоновых изображений, а также гистограммы яркости цветных и полутоновых изображений.

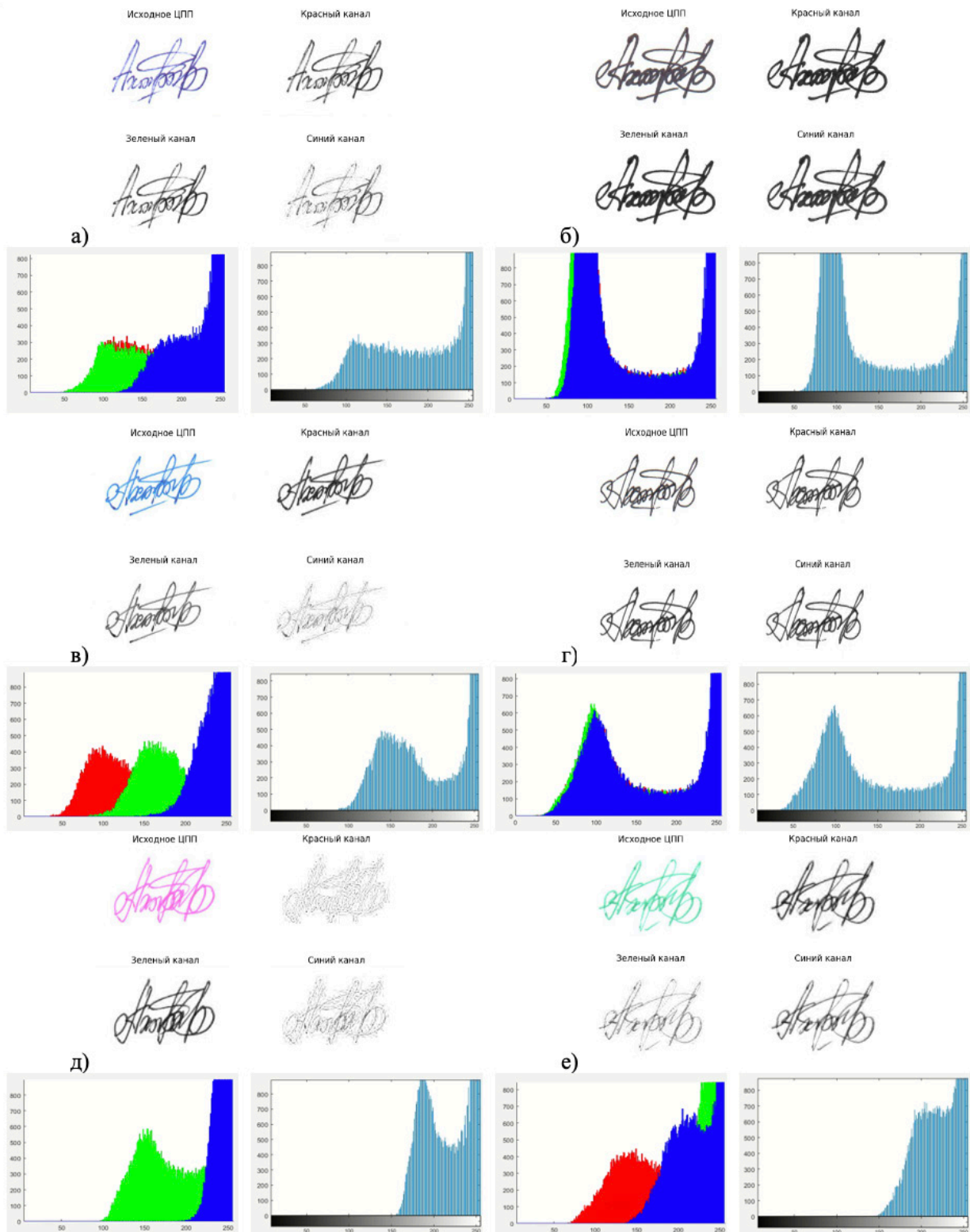


Рисунок 7 – Цветные и одноканальные полутоновые представления подписей, выполненных: а) шариковой ручкой; б) капиллярной ручкой; в) гелевой ручкой; г) ручкой-роллером; д) шариковой ручкой розового цвета; е) шариковой ручкой зеленого цвета

На рисунках 7 а), в), д), е) видны существенные перепады яркости на одноканальных представлениях цветных изображений подписей, что снижает точность их представления в полутоновом виде. В результате анализа экспериментальных

результатов были сформулированы следующие рекомендации по выбору метода преобразования цветного изображения подписи в полутоновое представление:

- для подписей выполненных шариковой ручкой сле-

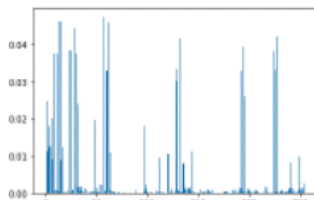
дует выбирать преобразование (3) или (4) - (4)).
 - (незначительно лучше преобразование по формуле (4));
 - капиллярной ручкой – преобразование (3) или (4) - (4));
 - (незначительно лучше преобразование по формуле (4));
 - гелевой ручкой – преобразование (3) или (4);
 - ручкой-роллером – преобразование (3) или (4), либо среднее красного и зеленого каналов (незначительно лучше преобразование по формуле (4));
 - шариковой ручкой розового цвета – преобразование (3) или (4), либо зеленый канал (незначительно лучше зеленый канал);
 - шариковой ручкой зеленого цвета – преобразование (3) или (4), либо среднее красного и синего канала (незначительно лучше преобразование по формуле

(4)).
 В результате анализа данных эксперимента по выбору метода преобразования цветного изображения в полутоновое представление сделан следующий вывод. Более высокий коэффициент корреляции при сравнении цифровых описаний подписей одного человека, выполненных ручками разных типов и цветов, был получен при использовании формулы (4), что указывает на доминирование зеленого канала над остальными при сканировании подписи (эффект мозаики Байера).

На рисунке 8 приведены примеры исходных изображений нескольких рукописных подписей одного человека, их LBP-гистограммы и коэффициенты корреляции между ними.



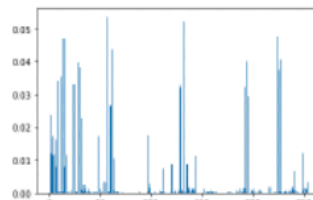
Использована формула (4)



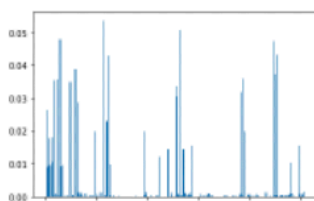
corr. = 0,8206



Использована формула (4)



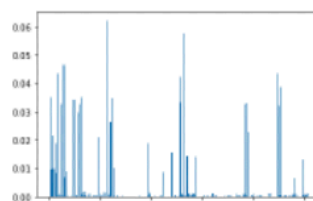
Использована формула (4)



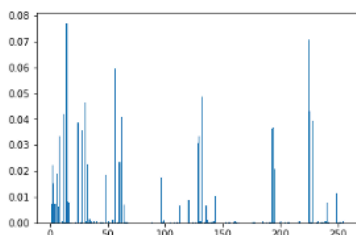
corr. = 0,8771



Использована формула (4)



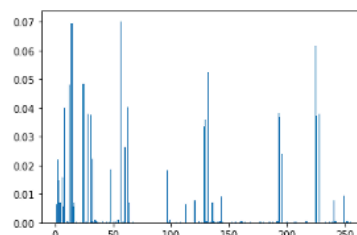
Выбран зеленый канал



corr. = 0,7822



Использована формула (4)



Рисунке 8 – Гистограммы LBP-признаков и вычисленные по ним коэффициенты корреляции

Заключение

По результатам выполненных экспериментов можно сделать вывод об инвариантности цифрового представления рукописной подписи, предложенного ранее авторами настоящей статьи

[15]. Оно инвариантно к размеру подписи, ее ориентации на бумажном носителе, цвету, толщине линий и небольшим вариациям в написании, присущим человеческому почерку.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ferrer, M. A. A behavioral handwriting model for static and dynamic signature synthesis / M. A. Ferrer, M. Diaz, C. Carmona-Duarte, A. Morales // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, – 2017. – Vol. 39, № 6. – P. 1041–1053.
2. Hafemann, L.G. Offline handwritten signature verification — Literature review / L.G. Hafemann, R. Sabourin, L.S. Oliveira // 7th International Conference on Image Processing Theory, Tools and Applications, – 2017. 8 p. DOI:10.1109/ipta.2017.8310112
3. Kaur, H. Signature identification and verification techniques: state-of-the-art work / H. Kaur, M. Kumar // Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing. – 2021. – P.1–19. <https://doi.org/10.1007/s12652-021-03356-w>
4. Houtinezhad, M. Writer-independent signature verification based on feature extraction fusion / M. Houtinezhad, H. R. Ghaffary // Multimedia Tools and Applications. – 2020. – Т. 79, № 9. – С. 6759–6779.
5. Гонсалес, Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс. М.: Техносфера, 2005. – 1072 с.
6. Гонсалес, Р. Цифровая обработка изображений в среде MATLAB / Р. Гонсалес, Р. Вудс, С. Эддинс – М.: Техносфера, 2006. – 616 с.
7. Шапиро, Л. Компьютерное зрение / Л.Шапиро, Дж.Стокман; Пер. с англ. — 3-е изд. — М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2015. – 763 с.
8. Грузман, И.С. Цифровая обработка изображений в информационных системах: учеб. пособие / И.С. Грузман, В.С. Киричук, В.П. Косых, Г.И. Перетягин, А.А. Спектор. – Новосибирск.: Новосиб. гос. техн. ун-т., 2003. – 352 с.
9. Iranmanesh, V. Online signature verification using neural network and Pearson correlation features // IEEE Conference on Open Systems. – IEEE, 2013. – P. 18–21. <https://doi.org/10.1109/ICOS.2013.6735040>
10. Recommendation ITU-R BT.709-6. Parameter values for the HDTV standards for production and international programme exchange. – 2015. – P. 19.
11. Попов, В.Л. / В.Л. Попов // Курс лекций по дисциплине «Технико-криминалистическая экспертиза документов». М.: Юридический институт МИИТ, 2015. –188 с.
12. Юматов, В.А. Судебнопочерковедческая экспертиза: теория и практика: Учебное пособие / В.А Юматов, П.Г. Лесникова // Н.Новгород: Изд-во ННГУ, 2017. – 336с.
13. Подволоцкий, И.Н. К вопросу о традиционных и современных способах технической подделки подписей и рукописных записей / И.Н Подволоцкий, Н.Ф. Бодров // Законы России: опыт, анализ, практика.– 2011. – №. 12. – С. 84–89.
14. 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>.
15. 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>.

REFERENCES

1. Ferrer, M. A. A behavioral handwriting model for static and dynamic signature synthesis / M. A. Ferrer, M. Diaz, C. Carmona-Duarte, cA. Morales // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, – 2017. – Vol. 39, no. 6. – P. 1041–1053.
2. Hafemann, L.G. Offline handwritten signature verification — Literature review / L.G. Hafemann, R. Sabourin, L.S. Oliveira // 7th International Conference on Image Processing Theory, Tools and Application. – 2017. 8 p. DOI:10.1109/ipta.2017.8310112.
3. Kaur, H. Signature identification and verification techniques: state-of-the-art work / H. Kaur, M. Kumar // Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing. – 2021. – P.1–19. <https://doi.org/10.1007/s12652-021-03356-w>
4. Houtinezhad, M. Writer-independent signature verification based on feature extraction fusion / M. Houtinezhad, H. R. Ghaffary // Multimedia Tools and Applications. – 2020. – Vol. 79, № 9. – P. 6759–6779.
5. Gonzalez, R. Digital Image Processing / R. Gonzalez, R. Woods. M: Technosphere, 2005. – 1072p.
6. Gonzalez, R. Digital image processing in MATLAB environment / R. Gonzalez, R. Woods, S. Eddins - M: Technosphere, 2006. – 616p.
7. Shapiro, L. Computer Vision / L. Shapiro, J. Stockman; Translated from English - 3rd ed. - M.: BINOM. Laboratory of knowledge, 2015. – 763p.
8. Gruzman I.S. Digital Image Processing in Information Systems: Tutorial / I.S. Gruzman, V.S. Kirichuk, V.P. Kosykh, G.I. Peretyagin, A.A. Spector. – Novosibirsk: Novosibirsk State Technical University, 2003. – 352p.
9. Iranmanesh, V. Online signature verification using neural network and pearson correlation features // IEEE Conference on Open Systems. – IEEE, 2013. – P. 18–21. <https://doi.org/10.1109/ICOS.2013.6735040>
10. Recommendation ITU-R BT.709-6. Parameter values for the HDTV standards for production and international programme exchange. – 2015. – P. 19.
11. Popov V.L. Course of lectures on the discipline «Technical and Criminalistic Examination of Documents». M: Law Institute MIIT, 2015. – 188p.
12. Yumatov, V.A. Forensic penmanship expertise: Theory and practice: Textbook / V.A. Yumatov, P.G. Lesnikova // N. Novgorod: Publishing house of the National Research University, 2017. – 336p.
13. Podvolotsky, I.N. On the question of traditional and modern methods of technical forgery of signatures and handwritten records / I.N. Podvolotsky, N.F. Bodrov // Laws of Russia: experience, analysis, practice.– 2011. – no. 12. – P. 84–89.

14. **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, P. 4–9 (In Russ.). <https://doi.org/10.21122/2309-4923-2022-2-4-9>

15. **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, P. 62–73 (In Russ.). <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2022-19-3-62-73>

AKHUNDJANOV U. Y.¹, STAROVOITOV V. V.^{1,2}

ON THE INVARIANCE OF THE DIGITAL DESCRIPTION OF A HANDWRITTEN SIGNATURE

¹State Scientific Institution “Joint Institute for Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus”

²Belarusian National Technical University

The article presents results of our experiments carried out to study the invariance of the digital description of the image of a handwritten signature presented on paper. The description is built on the basis of a normalized image of the signature, digitized in the visible range of the electromagnetic spectrum by a scanner, with subsequent calculation of the distribution of its local features. The variability of this representation of the signature under different conditions simulating a change in its color, orientation on paper, line thickness and dimensions has been experimentally studied. It is shown that the digital description of the handwritten signature image, previously proposed by the authors, is sufficiently invariant with respect to the listed conditions for its execution to perform the off-line signature verification procedure.

Keywords: signature; digital signature representation; binary signature representation; local binary pattern; invariance.



Ахунджанов Умиджон Юнус угли, аспирант Объединенного института проблем информатики Национальной академии наук Беларуси.
Akhundjanov Umidjon Yunus ugli, PhD student at the United Institute of Informatics Problems, National Academy of Sciences of Belarus.

E-mail: umidjan_90@mail.ru



Старовойтов Валерий Васильевич, доктор технических наук, профессор. Главный научный сотрудник ОИПИ НАН Беларуси. д.т.н., профессор БНТУ. Лауреат Государственной премии Республики Беларусь (2003г). Сфера научных интересов: обработка и анализ цифровых изображений, полученных в разных участках электромагнитного спектра. Опубликовал более 150 научных работ.

Starovoitov Valery, Doctor of Sciences and professor of computer science. He is a Principal research fellow at the United Institute of Informatics Problems, National Academy of Sciences of Belarus (UIIP NAN Belarus). Doctor of Sciences and professor at BNTU Belarusian National Technical University (BNTU). Award: the State Prize of the Republic of Belarus in science. Research interests of professor Starovoitov are processing and analysis of digital images obtained in different parts of the electromagnetic spectrum. He has published over 150 papers.

E-mail: mido@bntu.by