



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-5-112-119>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 004.932+004.258

СКЕЛЕТИЗАЦИЯ НИЗКОКОНТРАСТНЫХ ЗАШУМЛЕННЫХ ПОЛУТОНОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

МА ЦЗЮНЬ, В. Ю. ЦВЕТКОВ, А. А. БОРИСКЕВИЧ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)*

Поступила в редакцию 22.02.2023

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2023
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2023

Аннотация. Рассмотрена задача формирования скелетов полутоновых изображений с двухмодовыми гистограммами яркости в условиях изменения контраста и действия шума. На таких гистограммах одна мода соответствует объектам, а другая – фону. Благодаря данной особенности изображения относительно просто бинаризируются, а затем скелетизируются. Скелет однородной по яркости области представляет собой множество тонких (в пределе однопиксельных) связанных линий, заключенных внутри этой области и компактно описывающих ее структуру. В условиях высокого контраста и слабого шума на исходном полутоновом изображении широко используются алгоритмы бинарной скелетизации. Они относительно просты и могут быть устойчивы к мультипликативному шуму, проявляющемуся на границах областей после бинаризации. Однако при снижении контраста и усилении зашумления исходного полутонового изображения скелеты, формируемые такими алгоритмами, разрушаются под действием аддитивного шума, проявляющегося в глубине областей скелетизируемого бинарного изображения. Для уменьшения ошибок скелетизации в таких случаях применяются алгоритмы, основанные на предварительной низкочастотной фильтрации исходного полутонового изображения. Для повышения устойчивости скелетов полутоновых изображений с двухмодовой гистограммой яркости к шуму в статье предложена модель скелетизации, учитывающая наличие мультипликативной и аддитивной составляющих шума на бинарном скелетизируемом изображении. На основе данной модели разработан алгоритм скелетизации, отличающийся учетом искажений форм областей скелетизируемого бинарного изображения в результате низкочастотной фильтрации исходного полутонового изображения и позволяющий уменьшить ошибки скелетизации полутоновых изображений.

Ключевые слова: скелетизация полутоновых изображений, мультипликативный шум, аддитивный шум, чувствительность скелета к шуму.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Ма Цзюнь. Скелетизация низкоконтрастных зашумленных полутоновых изображений / Ма Цзюнь, В. Ю. Цветков, А. А. Борискевич // Доклады БГУИР. 2023. Т. 21, № 5. С. 112–119. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-5-112-119>.

SKELETING OF LOW-CONTRAST NOISY HALFTONE IMAGES

MA JUN, VIKTAR YU. TSVIATKOU, ANATOLIY A. BORISKEVICH

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 22.02.2023

Abstract. The problem of forming the skeletons of halftone images with two-mode brightness histograms under conditions of changing contrast and noise is considered. On such histograms, one mode corresponds to the objects, and the other to the background. Thanks to this feature, images are relatively easy to binarize and then skeletonize.

nize. The skeleton of a region uniform in brightness is a set of thin (limited by one-pixel) connected lines enclosed within this region and compactly describing its structure. Under conditions of high contrast and low noise on the original halftone image, binary skeletonization algorithms are widely used. They are relatively simple and can be resistant to multiplicative noise that appears at the boundaries of the regions after binarization. However, when the contrast is reduced and the noise of the original halftone image is increased, the skeletons formed by such algorithms are destroyed under the influence of additive noise, which manifests itself in the depth of the regions of the skeletonized binary image. To reduce skeletonization errors in such cases, algorithms based on preliminary low-pass filtering of the original grayscale image are used. To increase the stability of the skeletons of halftone images with a two-mode brightness histogram to noise, the article proposes a skeletonization model that takes into account the presence of multiplicative and additive noise components in a binary skeletonized image. Taking this model into account, a skeletonization algorithm has been developed, which takes into account the distortions in the shapes of the areas of the skeletonized binary image as a result of low-frequency filtering of the original halftone image and allows to reduce errors in the skeletonization of halftone images.

Keywords: skeletonization of halftone images, multiplicative noise, additive noise, sensitivity of the skeleton to noise.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Ma Jun, Tsviatkou V. Yu., Boriskevich A. A. (2023) Skeleting of Low-Contrast Noisy Halftone Images. *Doklady BGUIR*. 21 (5), 112–119. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-5-112-119> (in Russian).

Введение

Большинство известных алгоритмов скелетизации обрабатывают бинарные изображения, на которых единичные значения соответствуют скелетизируемой области, а нулевые значения – фону [1]. Такие бинарные изображения получаются из полутоновых с помощью пороговой обработки. При этом базовой моделью исходного полутонового изображения является функция распределения значений пикселей с двумя модами, между которыми посередине выбирается значение порога бинаризации.

Один из основных показателей качества бинарной скелетизации – устойчивость к бинарному контурному шуму. Такой шум является мультипликативным и связан с искажениями значений граничных пикселей на исходном полутоновом изображении, возникающими из-за аддитивного шума. Известные алгоритмы бинарной скелетизации [2–4] не учитывают связь между аддитивным шумом на исходном полутоновом изображении и мультипликативным шумом на скелетизируемом бинарном изображении, а также возможность появления бинарного аддитивного шума на скелетизируемом изображении при усилении аддитивного шума на исходном полутоновом изображении.

Алгоритмы скелетизации полутоновых изображений [5–7] формируют более устойчивые к шуму скелеты. Среди них особенно эффективен алгоритм, предложенный в [6], в котором выбор параметров низкочастотного фильтра основан на вычислении минимального значения метрики чувствительности скелета к шуму. Скелет может формироваться с помощью любого алгоритма бинарной скелетизации. Основной недостаток алгоритма [6] состоит в том, что используемая в нем метрика чувствительности скелета к шуму не учитывает искажения форм областей скелетизируемого бинарного изображения в результате низкочастотной фильтрации исходного полутонового изображения.

Целью исследований являлось уменьшение ошибок скелетизации полутоновых изображений с двухмодовым распределением яркости в условиях шума.

Модель скелетизации изображений

Скелет однородной по яркости области представляет собой множество тонких (в пределе однопиксельных) связанных линий, заключенных внутри этой области и характеризующих ее локальные и глобальные свойства. Для формирования скелета используется бинарное изображение $B = \|b(y, x)\|_{(y=0, \overline{Y-1}, x=0, \overline{X-1})}$ размером $Y \times X$ пикселей, содержащее единичную область A . Изображение B формируется в результате бинаризации исходного полутонового изображения $I = \|i(y, x)\|_{(y=0, \overline{Y-1}, x=0, \overline{X-1})}$ с двухмодовым распределением яркости по порогу T_B : $B = f_B(I)$, где f_B – функция бинаризации, такая, что $(b(y, x) = 1) \wedge (b(y, x) \in A) \wedge (i(y, x) \in A_{HT})$

при $i(y, x) \geq T_B$; $(b(y, x) = 0) \wedge (b(y, x) \notin A) \wedge (i(y, x) \notin A_{HT})$ при $i(y, x) < T_B$; A_{HT} – область пикселей на полутоновом изображении I , соответствующая области A на бинарном изображении B . В результате скелетизации изображения B формируется скелетизированное изображение $S = \|s(y, x)\|_{(y=0, Y-1, x=0, X-1)}$: $S = f_s(B)$, где f_s – функция скелетизации, такая, что $s(y, x) = 1$ для элементов скелета и $s(y, x) = 0$ для элементов фона.

Формируемые в реальных условиях полутоновые изображения содержат аддитивный шум. Реальное (зашумленное) изображение $\hat{I} = \|\hat{i}(y, x)\|_{(y=0, Y-1, x=0, X-1)}$ можно представить суммой исходного незашумленного изображения I и аддитивного шума $N_{HT} = \|n_{HT}(y, x)\|_{(y=0, Y-1, x=0, X-1)}$: $\hat{i}(y, x) = i(y, x) + n_{HT}(y, x)$. После бинаризации изображение \hat{I} преобразуется в зашумленное бинарное изображение $\hat{B} = \|\hat{b}(y, x)\|_{(y=0, Y-1, x=0, X-1)}$: $\hat{B} = f_B(\hat{I})$, которое состоит из исходного незашумленного изображения B и бинарного шума N_B : $\hat{B} = B \oplus N_B$ и $\hat{b}(y, x) = b(y, x) \oplus n_B(y, x)$, где \oplus – операция сложения по модулю два. Изображение \hat{B} содержит единичную область $\hat{A} = A + N_B$, искаженную бинарным шумом N_B . Область \hat{A} на бинарном изображении \hat{B} соответствует области \hat{A}_{HT} на полутоновом изображении \hat{I} . В результате скелетизации зашумленного изображения \hat{B} формируется искаженное скелетизированное изображение $\hat{S} = \|\hat{s}(y, x)\|_{(y=0, Y-1, x=0, X-1)}$. В результате действия шума N_{HT} базовое скелетизированное изображение S может разрушиться.

В связи с этим предлагается уточненная модель бинарного скелетизируемого изображения \hat{B} , основанная на учете мультипликативной $N_{BM} = \|n_{BM}(y, x)\|_{(y=0, Y-1, x=0, X-1)}$ и аддитивной $N_{BA} = \|n_{BA}(y, x)\|_{(y=0, Y-1, x=0, X-1)}$ составляющих шума и позволяющая уменьшить ошибки формирования скелета \hat{S} . Эта модель учитывает два процесса изменения скелета под действием шума: деформации, вызванные мультипликативным шумом, и разрушения, вызванные аддитивным шумом. Математическая модель формирования скелета можно представить в виде трех взаимосвязанных соотношений:

$$\hat{S} = \begin{cases} S_O(B) \text{ при } \hat{B} = B; \\ \{S_O(B), (S_O(B) \cup S_{MO}(B, N_{BM}))\} \text{ при } \hat{B} = B \oplus N_{BM}; \\ \{S_A(B, N_{BA}), (S_A(B, N_{BA}) \cup S_{MA}(B, N_{BA}, N_{BM}))\} \text{ при } \hat{B} = B \oplus N_{BA} \oplus N_{BM}, \end{cases} \quad (1)$$

где \cup – операция «объединение»; $S_O(B) = \|s_O(B, y, x)\|_{(y=0, Y-1, x=0, X-1)}$ – базовые составляющие скелета, сохраняющиеся в условиях мультипликативного бинарного шума; $S_{MO}(B, N_{BM}) = \|s_{MO}(B, N_{BM}, y, x)\|_{(y=0, Y-1, x=0, X-1)}$ – дополнительные к $S_O(B)$ составляющие скелета, появляющиеся в условиях воздействия мультипликативного бинарного шума; $S_A(B, N_{BA}) = \|s_A(B, N_{BA}, y, x)\|$ – скелет, сформированный под действием аддитивного бинарного шума, не содержащий базовые составляющие скелета $S_O(B)$; $S_{MA}(B, N_{BA}, N_{BM}) = \|s_{MA}(B, N_{BA}, N_{BM}, y, x)\|_{(y=0, Y-1, x=0, X-1)}$ – дополнительные к $S_A(B, N_{BA})$ составляющие скелета, появляющиеся в условиях воздействия мультипликативного бинарного шума.

Проявление мультипликативной N_{BM} и аддитивной N_{BA} составляющих шума на скелетизируемом бинарном изображении \hat{B} зависит от значений яркости пикселей и амплитуды $N_{HT} = I - \hat{I}$ шума на исходном полутоновом изображении \hat{I}

$$\begin{aligned} & (i(y, x) \leq T_B) \wedge (\hat{i}(y, x) > T_B) \vee (i(y, x) > T_B) \wedge (\hat{i}(y, x) \leq T_B) \Rightarrow \\ & \Rightarrow (b(y, x) \in E \Rightarrow n_{BM}(y, x) \leftarrow 1) \vee (b(y, x) \in (A - E) \Rightarrow n_{BA}(y, x) \leftarrow 1), \end{aligned} \quad (2)$$

где E – множество граничных пикселей $b(y, x)$ области A бинарного изображения (рис. 1, а).

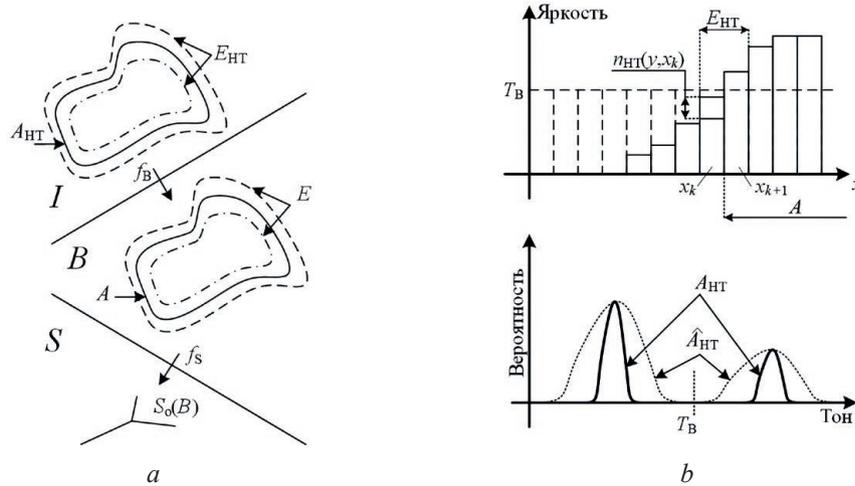


Рис. 1. Иллюстрация процесса скелетизации полутонового изображения: *a* – формирование скелета полутонового изображения; *b* – профиль яркости и гистограмма полутонового изображения в условиях шума и снижения контраста

Fig. 1. Illustration of the halftone skeletonization process: *a* – halftone skeletal shaping; *b* – brightness profile and histogram of the halftone image

С учетом максимального значения шума $\max(|N_{HT}|)$ и (1) можно описать условия формирования скелетов с помощью выражений:

$$(\min(A_{HT}) - \max(|N_{HT}|) \geq T_B) \wedge (\max(\overline{A_{HT}}) + \max(|N_{HT}|) < T_B) \Rightarrow (\hat{B} = B) \Rightarrow (\hat{S} = S_0(B)); \quad (3)$$

$$\begin{aligned} & (\min(A_{HT} - E_{HT}) - \max(|N_{HT}|) \geq T_B) \wedge (\min(A_{HT} \cap E_{HT}) - \max(|N_{HT}|) < T_B) \wedge \\ & \wedge (\max(\overline{A_{HT}} \cap E_{HT}) + \max(|N_{HT}|) \geq T_B) \Rightarrow \\ & \Rightarrow (\hat{B} = B \oplus N_{BM}) \Rightarrow (\hat{S} = S_0(B) \vee (S_0(B) \oplus S_{MO}(B, N_{BM}))); \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} & (\min(A_{HT} - E_{HT}) - \max(|N_{HT}|) < T_B) \Rightarrow (\hat{B} = B \oplus N_{BA} \oplus N_{BM}) \Rightarrow \\ & \Rightarrow (\hat{S} = S_A(B, N_{BA}) \vee (S_A(B, N_{BA}) \oplus S_{MA}(B, N_{BA}, N_{BM}))). \end{aligned} \quad (5)$$

Из (5) следует, что при интенсивном шуме N_{HT} на исходном полутоновом изображении \hat{I} возникает аддитивный бинарный шум N_{BA} на изображении \hat{B} (рис. 1, *b*). Это приводит к сильным изменениям в скелете \hat{S} из-за отсутствия в нем постоянной составляющей, зависящей только от изображения B , и делает неэффективными алгоритмы бинарной скелетизации. Для повышения устойчивости скелетов к шуму N_{HT} на исходном полутоновом изображении \hat{I} можно снизить данный шум, например с помощью низкочастотного фильтра, для преобразования выражения $\hat{B} = B \oplus N_{BA} \oplus N_{BM}$ к $\hat{B} = B \oplus N_{BM}$. Таким образом, актуальными задачами являются разработка устойчивого к аддитивному шуму алгоритма скелетизации полутоновых изображений на основе предварительной низкочастотной фильтрации и оценки его эффективности.

Алгоритм скелетизации полутоновых изображений на основе адаптивной низкочастотной фильтрации

Для скелетизации полутоновых изображений \hat{I} с двухмодовой гистограммой яркости в условиях аддитивного шума предлагается алгоритм, основанный на адаптивной низкочастотной фильтрации и бинаризации для формирования скелетизированного изображения $\tilde{S} = \|\tilde{s}(y, x)\|_{(y=0, \overline{y-1}, x=0, \overline{x-1})}$ с использованием сглаженного $\tilde{I} = \|\tilde{i}(y, x)\|_{(y=0, \overline{y-1}, x=0, \overline{x-1})}$ и бинарного $\tilde{B} = \|\tilde{b}(y, x)\|_{(y=0, \overline{y-1}, x=0, \overline{x-1})}$ изображений. Сущность данного алгоритма состоит в выборе значения σ дисперсии Гаусс-фильтра, обеспечивающего минимальное значение модифицированной

метрики чувствительности скелета к шуму, учитывающей искажения форм бинарных областей скелетизируемого изображения в результате низкочастотной фильтрации исходного полутонового изображения и вычисляемой с помощью выражения

$$M_s(\hat{B}, \tilde{B}, \tilde{S}) = \frac{1}{N_s(\tilde{S})} \sum_{y=0}^{Y-1} \sum_{x=0}^{X-1} m_s(\hat{B}, \tilde{B}, y, x), \quad (6)$$

где $N_s(M_B)$ – функция, определяющая количество единичных элементов в бинарной матрице $M_B = \|m_B(y, x)\|_{(y=0, \overline{Y-1}, x=0, \overline{X-1})}$, $N_s(M_B) = \sum_{y=0}^{Y-1} \sum_{x=0}^{X-1} m_B(y, x)$; $m_s(y, x)$ – чувствительность к локальным искажениям скелета, определяемая с помощью выражения

$$m_s(\hat{B}, \tilde{B}, y, x) = \begin{cases} 1, & \text{при } (N_{ES}(y, x) > 2) \vee (\tilde{s}(y, x) \oplus \hat{s}(y, x) = 1); \\ 5, & \text{при } \left(\sum_{j=-1}^1 \sum_{i=-1}^1 \hat{b}(y+j, x+i) = 0 \right) \wedge (N_{ES}(y, x) > 1); \\ 10, & \text{при } \left(\left| N_s(\tilde{B}) - N_s(\hat{B}) \right| / N_s(\hat{B}) > 0,02 \right) \vee (R(\tilde{S}) \neq R(\hat{S})); \\ 0 & \text{в других случаях;} \end{cases} \quad (7)$$

$R(\tilde{B})$, $R(\hat{B})$ – количество областей на изображениях \tilde{B} и \hat{B} ; $N_{ES}(y, x) = 9 - \sum_{j=-1}^1 \sum_{i=-1}^1 \tilde{s}(y+j, x+i)$ – количество граничных пикселей для каждого пикселя скелета.

Алгоритм состоит из следующих шагов.

1) Инициализация значений переменных алгоритма: дисперсии ($\sigma = 1$), количества итераций ($n = 0$), матрицы бинарного изображения \hat{B} ($\hat{B} = f_B(\hat{I})$).

2) Начало цикла вычисления метрики чувствительности. Формирование сглаженного изображения \tilde{I} в результате свертки исходного изображения \hat{I} с ядром Гаусс-фильтра.

3) Формирование гистограммы яркости сглаженного изображения \tilde{I} и определение по ней порога бинаризации T_B . Формирование бинарного изображения \tilde{B} с помощью алгоритма адаптивной пороговой обработки Otsu [2].

4) Формирование n -го скелетизированного изображения $\tilde{S}(n)$ с помощью алгоритма бинарной скелетизации (например ОРТА [3] и др.).

5) Вычисление n -го значения метрики $M_s(\hat{B}, \tilde{B}, \tilde{S}, n)$ чувствительности скелета к шуму с использованием выражения (6).

6) Приращение значения дисперсии: $\sigma = \sigma + 1$.

7) Приращение счетчика количества итераций: $n = n + 1$.

8) Проверка счетчика количества итераций на достижение максимального значения, например 20 (зависит от доступных вычислительных ресурсов). Если $n < 20$ – переход на шаг 2.

9) Поиск минимального значения $M_{S_{\min}}$ метрики чувствительности скелета к шуму и номера $N_{S_{\min}}$ итерации для такой метрики при $n = 0, 19$.

10) Завершение алгоритма и формирование результата: $\tilde{S}(N_{S_{\min}})$.

Оценка эффективности алгоритмов скелетизации полутоновых изображений

Для оценки эффективности алгоритмов скелетизации использованы тестовые полутоновые изображения с контролируемым контрастом и уровнем аддитивного шума. На рис. 2 приведены комбинированные изображения $(\hat{B} + \tilde{S})$, сформированные в результате сложения бинарных изображений \hat{B} , полученных после адаптивной пороговой обработки, и бинарных скелетизированных изображений \tilde{S} , полученных с помощью алгоритмов ОРТА, АТФ и предложенного АТФМ. Из рис. 2 следует, что алгоритм АТФМ позволяет формировать скелеты, более устойчивые к шуму (имеют меньше структурных искажений), по сравнению с ОРТА и АТФ.

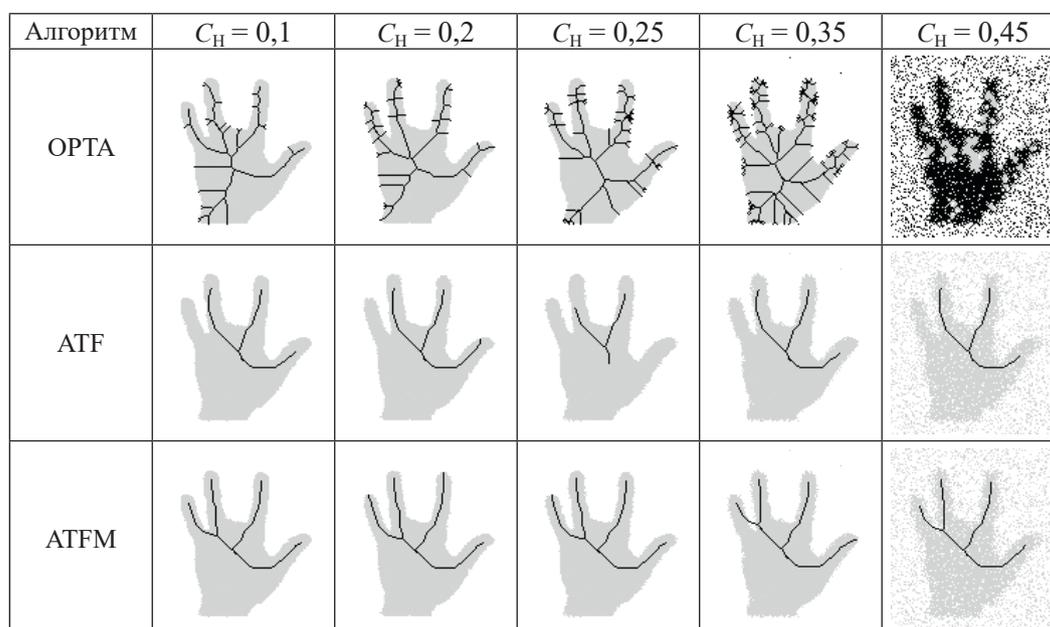


Рис. 2. Скелетизированные изображения, полученные при $\sigma = 1,0$, $A_{HT} = 10$

Fig. 2. Skeletonized images obtained at $\sigma = 1.0$, $A_{HT} = 10$

Для полутоновых изображений с различными коэффициентом C_H модификации гистограммы, параметром размытия σ и амплитудой A_{HT} шума и различных алгоритмов в табл. 1 приведены значения отклонения E_S от эталонного скелета при отсутствии шума, вычисляемые с помощью разности изображений скелетов S и S_1 при отсутствии и наличии аддитивного шума ($S = \hat{S}$ или $S = \tilde{S}$ в зависимости от алгоритма) в условиях заданного контраста

$$E_S = \sum_{y=0}^{Y-1} \sum_{x=0}^{X-1} |S - \hat{S}| / \sum_{y=0}^{Y-1} \sum_{x=0}^{X-1} S, \text{ при } y = \overline{0, Y-1}, x = \overline{0, X-1}. \quad (8)$$

Таблица 1. Оценка показателей эффективности алгоритмов скелетизации

Table 1. Evaluation of performance indicators of skeletonization algorithms

Показатель / Index	C_H	E_S			C_1	V_1	T_B	I_{max}	I_{min}	T_p, c		
		OPTA	ATF	ATFM						OPTA	ATF	ATFM
$A_{HT} = 10$ $\sigma = 0,5$	0,10	0,005	0,631	0,151	0,326	0,799	125	230	30	0,225	3,089	2,855
	0,20	0,010	0,613	0,154	0,244	0,566	141	204	55	0,211	2,903	2,827
	0,25	0,106	0,695	0,318	0,203	0,459	151	191	68	0,212	2,962	2,870
	0,35	1,121	0,681	0,431	0,122	0,262	164	166	91	0,384	2,923	2,847
	0,45	11,773	0,766	0,631	0,040	0,082	180	140	115	1,066	4,048	4,058
$A_{HT} = 20$ $\sigma = 0,5$	0,10	0,246	0,582	0,574	0,326	0,798	119	230	32	0,289	3,765	3,669
	0,20	0,968	0,713	0,441	0,244	0,567	119	204	55	0,443	3,848	3,741
	0,25	1,648	0,812	0,554	0,203	0,459	128	191	67	0,426	3,880	3,893
	0,35	5,249	0,649	0,585	0,122	0,263	134	166	91	0,972	5,119	5,061
	0,45	15,727	0,645	0,413	0,040	0,082	156	140	116	0,493	3,502	3,821
$A_{HT} = 10$ $\sigma = 1$	0,10	1,074	0,635	0,356	0,313	0,766	128	230	38	0,373	3,861	3,767
	0,20	1,017	0,713	0,151	0,234	0,543	143	204	61	0,395	3,898	3,790
	0,25	1,342	0,663	0,156	0,195	0,441	146	191	72	0,389	3,866	3,785
	0,35	2,207	0,617	0,597	0,117	0,252	164	166	94	0,501	3,967	4,036
	0,45	12,663	0,713	0,587	0,039	0,079	182	140	116	0,995	4,497	4,812
$A_{HT} = 20$ $\sigma = 1$	0,10	1,756	0,699	0,654	0,313	0,767	109	230	38	0,489	4,008	4,063
	0,20	2,305	0,064	0,515	0,234	0,543	115	204	58	0,538	3,962	4,142
	0,25	2,833	0,663	0,679	0,195	0,441	123	191	71	0,583	4,111	4,254
	0,35	6,049	0,667	0,649	0,117	0,251	141	166	94	0,971	5,893	6,347
	0,45	15,372	0,738	0,859	0,039	0,079	148	140	116	0,406	3,745	4,103

Также в табл. 1 приведены значения контраста C_1 , вариации V_1 , адаптивного порога T_B , определяемого с помощью алгоритма Otsu, минимальное I_{\min} и максимальное I_{\max} значения пикселей полутонового изображения без шума и время T_p скелетизации. Значения контраста C_1 и вариации V_1 вычисляли с помощью выражений:

$$C_1 = \sqrt{\frac{1}{YX} \sum_{y=0}^{Y-1} \sum_{x=0}^{X-1} (\hat{i}(y,x) - \mu(\hat{I}))^2}; \quad (9)$$

$$V_1 = \frac{D_{ST}(I)}{\mu(I)}, \quad (10)$$

где $\mu(I)$ – среднее значение яркости пикселей для изображения I , $\mu(I) = \frac{1}{YX} \sum_{y=0}^{Y-1} \sum_{x=0}^{X-1} i(y,x)$; $D_{ST}(I)$ – дисперсия значений пикселей для изображения I .

Для полутоновых изображений с резкими перепадами яркости (при $\sigma = 0,5$) алгоритм АТФМ позволяет:

- повысить устойчивость скелетов к шуму в сравнении с алгоритмом ОРТА;
- при низком уровне шума ($A_{HT} = 10$) и низком контрасте повысить устойчивость скелетов к шуму в сравнении с алгоритмом АТФ;
- при высоком уровне шума ($A_{HT} = 20$) сохранить устойчивость скелетов к шуму в сравнении с алгоритмом АТФ.

Предложенный алгоритм АТФМ имеет одинаковую скорость скелетизации с АТФ. Для алгоритмов ОРТА [3] и ZS [4] проанализированы зависимости отклонения E_S от отношения R_{SN} сигнал/шум, вычисляемого по формуле:

$$R_{SN} = \frac{\frac{1}{YX} \sum_{y=0}^{Y-1} \sum_{x=0}^{X-1} (i(y,x) - I_{\min})}{D_{ST}(N_{HT})}. \quad (11)$$

При $\sigma = 0,5$, $0,17 > V_1 > 0,16$ алгоритм АТФМ позволяет уменьшить отклонения скелета от эталона при:

- $R_{SN} = 2$ примерно в 3,6 раза в сравнении с ОРТА (при проигрыше алгоритму АТФ на основе ОРТА в 1,2 раза) и в 2,1 раза – в сравнении с ZS (при выигрыше по сравнению с алгоритмом АТФ на основе ZS в 1,03 раза);
- $R_{SN} = 1$ примерно в 19,4 раза в сравнении с ОРТА (при выигрыше по сравнению с алгоритмом АТФ на основе ОРТА в 1,2 раза) и в 12,5 раза – в сравнении с ZS (при выигрыше по сравнению с алгоритмом АТФ на основе ZS в 1,02 раза).

При $\sigma = 1,0$, $V_1 \approx 0,65$, $R_{SN} = 5$ алгоритм АТФМ позволяет уменьшить отклонение скелета от эталона примерно в 5,2; 2,8; 1,6 и 1,03 раза в сравнении с ОРТА, АТФ на основе ОРТА, ZS и АТФ на основе ZS соответственно. При $\sigma = 1,0$, $V_1 = 0,164$ алгоритм АТФМ позволяет уменьшить отклонение скелета от эталона при:

- $R_{SN} = 2$ примерно в 4,8; 1,0; 2,7 и 1,1 раза в сравнении с ОРТА, АТФ на основе ОРТА, ZS и АТФ на основе ZS соответственно;
- $R_{SN} = 1$ примерно в 16,7; 1,0; 11,3 и 1,06 раза в сравнении с ОРТА, АТФ на основе ОРТА, ZS и АТФ на основе ZS соответственно.

Заключение

1. Предложена модель скелетизации полутоновых изображений, основанная на двухмодовой гистограмме яркости и учитывающая влияние контрастно-яркостных параметров, мультипликативной и аддитивной составляющих шума на качество скелетизированного изображения. Модель позволяет определить условия эффективной скелетизации полутоновых изображений, при которых искажения обусловлены влиянием только мультипликативной составляющей или комбинацией мультипликативной и аддитивной составляющих шума.

2. Разработан алгоритм скелетизации полутоновых изображений, основанный на предложенной модели и адаптивной низкочастотной фильтрации, отличающийся от известных алгоритмов учетом искажений форм областей бинарного скелетизируемого изображения в условиях аддитивного шума.

3. Определены условия влияния контрастно-яркостных параметров изображений на качество скелетизации.

Список литературы / References

1. Saha P. K., Borgefors G., Sanniti di Bajade G. (2016) A Survey on Skeletonization Algorithms and their Applications. *Pattern Recognition Letters*. 76, 3–12. DOI: 10.1016/j.patrec.2015.04.006.
2. Otsu N. (1979) A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*. 9 (1), 62–66. DOI: 10.1109/TSMC.1979.4310076.
3. Chin R.T. et al. (1987) A One-Pass Thinning Algorithm and its Parallel Implementation. *Computer Vision, Graphics and Image Processing*. 40, 30–40. DOI: 10.1016/0734-189X(87)90054-5.
4. Zhang T. Y., Suen C. Y. (1984) A Fast Parallel Algorithm for Thinning Digital Patterns. *Communications of the ACM*. 27 (3), 236–239. DOI: 10.1145/357994.358023.
5. Hoffman M. E., Wong E. K. (1998) Scale-Space Approach to Image Thinning Using the Most Prominent Ridge-Line in the Image Pyramid Data Structure. *Photonics West '98 Electronic Imaging, International Society for Optics and Photonics*. 30, 1369–1373. DOI: 10.1117/12.304636.
6. Chatbri H., Kameyama K. (2014) Using Scale Space Filtering to Make Thinning Algorithms Robust Against Noise in Sketch Images. *Pattern Recognition*. 42, 1–10. DOI: 10.1016/j.patrec.2014.01.011.
7. Cai J. (2012) *Robust Filtering-Based Thinning Algorithm for Pattern Recognition*. The Computer Journal. 55 (7), 887–896. DOI: 10.1093/comjnl/bxr124.

Вклад авторов

Ма Цзюнь предложил модель, разработал алгоритм и программные средства, произвел оценку эффективности скелетизации полутоновых изображений.

Цветков В. Ю. осуществил постановку задачи исследования и редактирование статьи.

Борискевич А. А. определил направление и цель исследования.

Authors' contribution

Ma Jun proposed the model, developed the algorithm and software tools, and evaluated the efficiency of grayscale image skeletonization.

Tsviatkou V. Yu. carried out the formulation of the research problem and the editing of the article.

Boriskevich A. A. determined the direction and purpose of the study.

Сведения об авторах

Ма Цзюнь, аспирант кафедры инфокоммуникационных технологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

Цветков В. Ю., д. т. н., профессор, заведующий кафедрой инфокоммуникационных технологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

Борискевич А. А., д. т. н., профессор, профессор кафедры инфокоммуникационных технологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 17 293-84-08
E-mail: vtsvet@bsuir.by
Цветков Виктор Юрьевич

Information about the authors

Ma Jun, Postgraduate at the Department of Infocommunication Technologies of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Tsviatkou V. Yu., Dr. of Sci. (Tech.), Professor, Head of the Department of Infocommunication Technologies of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Boriskevich A. A., Dr. of Sci. (Tech.), Professor, Professor at the Department of Infocommunication Technologies of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 17 293-84-08
E-mail: vtsvet@bsuir.by
Tsviatkou Viktor Yur'evich