

Ц. МА, В. Ю. ЦВЕТКОВ, В. К. КОНОПЕЛЬКО

ДВУХШАГОВАЯ СКЕЛЕТИЗАЦИЯ БИНАРНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ ЗАНГА-СУЕНА И ПОРОЖДАЮЩЕЙ МАСКИ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

Целью работы является предельное утоньшение и повышение устойчивости к контурному шуму скелетов бинарных объектов произвольной формы при сохранении высокой скорости скелетизации. Скелет представляет собой множество тонких линий, взаимное расположение, размеры и форма которых передает информацию о размере, форме и ориентации в пространстве соответствующей однородной области изображения. Для обеспечения устойчивости к контурному шуму каждая итерация алгоритмов скелетизации разделяется на несколько шагов. Благодаря относительно качественным скелетам и средней производительности широкую известность получил двухшаговый алгоритм Занга-Суена. Его недостатками являются размытие диагональных линий толщиной 2 пикселя и удаление областей размером 2х2 пикселей. Для их устранения в статье предложена математическая модель, дополняющая модель Занга-Суена порождающей маской и двумя логическими условиями оценки ее элементов.

Ключевые слова: скелетизация изображений, алгоритм Занга-Суена, двухшаговая скелетизация, параллельная скелетизация.

Введение

В задачах параметризации объектов изображений часто используется скелетизация (утоньшение) – преобразование однородной области, соответствующей объекту, во множество тонких линий, взаимное расположение, размеры и форма которых передает информацию о размере, форме и ориентации в пространстве соответствующей области. Алгоритмы скелетизации делятся на две основные группы [1]: неитерационные и итерационные. Неитерационные алгоритмы реализуют скелетизацию за один проход, что обеспечивает высокое быстродействие, но приводит к низкому качеству скелетов. Итерационные алгоритмы постепенно удаляют слои пикселей на границе области до получения тонких линий, что улучшает качество скелетов, но приводит к высокой вычислительной сложности. Итерационные алгоритмы разделяются на последовательные и параллельные. В последовательных алгоритмах результат скелетизации на каждой итерации зависит от порядка выборки пикселей, что приводит к неинвариантности скелета к повороту изображения. В параллельных алгоритмах порядок обработки пикселей на каждой итерации не влияет на результат,

что повышает стабильность скелета к повороту изображения. Основными проблемами параллельных алгоритмов является сохранение связности фрагментов скелета и чувствительность к контурному шуму. Для их решения в некоторых параллельных алгоритмах каждая итерация разбивается на несколько шагов. Широкую известность получил параллельный алгоритм Занга-Суена (ZS) с двумя шагами на каждой итерации [2], основанный на 6-ти логических условиях и обеспечивающий средние характеристики по скорости и качеству по сравнению с другими параллельными алгоритмами [3]. Как установлено в [4], основными недостатками алгоритма ZS являются размытие диагональных линий толщиной 2 пикселя и удаление областей размером 2х2 пикселей. Для устранения данных недостатков и развития алгоритма ZS предложены следующие его модификации: изменение порогового значения в первом логическом условии [4]; изменение логических условий на втором шаге [5]; расширение набора логических условий на первом и втором шагах [6–10] в сочетании с масками [10]; обработка скелетов после применения алгоритма ZS с использованием дополнительных логических условий [11–14],

расширенных прямоугольной [11] и квадратных [13] масок, измененного порогового значения в первом логическом условии [14]; предварительная обработка скелета перед алгоритмом ZS с использованием дополнительных логических условий [15]. Повышение качества скелетов в этих модификациях достигается за счет роста вычислительной сложности. Некоторые из рассмотренных алгоритмов ориентированы на обработку специфических изображений: сканированных символов [2, 4, 8, 11–15], топологических схем [10], отпечатков пальцев [5]. Целью работы является предельное утоньшение и повышение устойчивости к контурному шуму скелетов бинарных объектов произвольной формы при сохранении высокой скорости скелетизации.

Постановка задачи

Для бинарного изображения $I = \left\| i(y, x) \right\|_{(y=0, \overline{Y-1}, x=0, \overline{X-1})}$ размером $Y \times X$, пиксели которого имеют значения 1 или 0 в зависимости от принадлежности площадному объекту или фону соответственно, алгоритмы скелетизации формируют матрицу $S = \left\| s(y, x) \right\|_{(y=0, \overline{Y-1}, x=0, \overline{X-1})}$ скелетизации, значения элементов которой 1 или 0 указывают на фрагменты скелета или фона соответственно.

В алгоритме ZS каждая итерация состоит из двух шагов и приводит к обнулению части единичных элементов $s_{zs}(y, x)$ матрицы S_{zs} скелетизации (перед первой итерацией значения пикселей бинарного изображения I переносятся в матрицу S_{zs} скелетизации), смежные элементы в окрестности которых (рис. 1, а, $p(1) = s_{zs}(y, x)$) удовлетворяют определенным условиям.

На первом шаге обнуляются элементы $s_{zs}(y, x)$, смежные элементы которых удовлетворяют условиям

$$2 \leq \sum_{k=2}^9 p(k) \leq 6, \quad (1)$$

$$A(p(1)) = 1, \quad (2)$$

$$p(2) p(4) p(6) = 0, \quad (3)$$

$$p(4) p(6) p(8) = 0, \quad (4)$$

где $A(p(1))$ – число комбинаций 01, встречающихся среди элементов $p(2) - p(9)$.

На втором шаге обнуляются элементы $s_{zs}(y, x)$, смежные элементы которых удовлетворяют условиям (1), (2) и условиям

$$p(2) p(4) p(8) = 0, \quad (5)$$

$$p(2) p(6) p(8) = 0. \quad (6)$$

Итерации продолжаются до тех пор, пока элементы $s_{zs}(y, x)$ обнуляются.

Из выражений (1) – (6) следует, что элементы $p(2)$, $p(4)$, $p(6)$, $p(8)$ выбираются для обработки 7 раз, остальные элементы – 4 раза. Таким образом, на каждый единичный элемент $s_{zs}(y, x)$ матрицы S_{zs} приходится 44 операции обработки смежных элементов.

В качестве примера на рис. 1 приведены бинарное изображение I размером 15×15 пикселей (рис. 1, б), содержащее несколько объектов, бинарное изображение матрицы скелетизации S , соответствующее этому изображению и сформированное с помощью алгоритма ZS [2] (рис. 1, в). Из рис. 1 следует, что алгоритм ZS не обеспечивает минимальную толщину линий скелета (многие неузловые элементы имеют более двух соседей) и теряет некоторые диагональные линии и области 2×2 .

Предлагаемые математическая модель и алгоритм скелетизации

Для построения предельно тонких, устойчивых к контурному шуму связанных скелетов (неузловые элементы скелета имеют не более

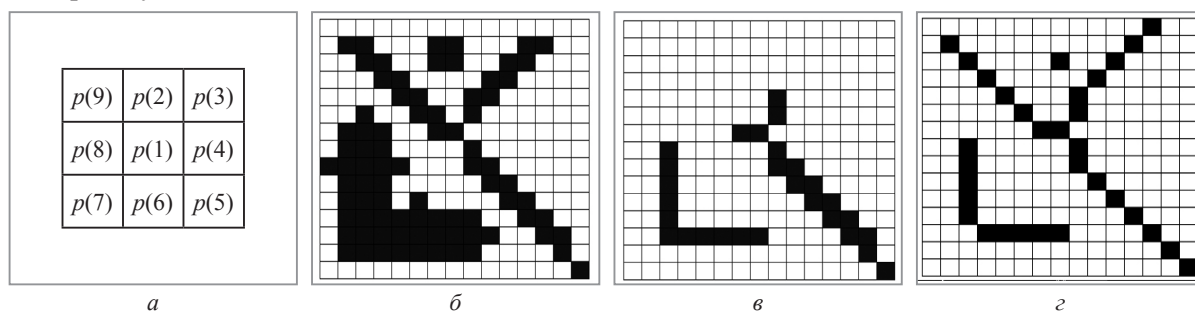


Рисунок 1. Бинарное изображение и результаты его скелетизации:

а – бинарная маска алгоритма ZS; б – бинарное изображение; в – скелеты ZS; г – скелеты ZSM (г – угол)

выбираются элементы $m(4)$, $m(6)$, $m(9)$, $m(10)$, $m(24)$, $m(25)$, что увеличивает число операций на 6 раз. А при невыполнении условия $A(p(1))=1$, проверяется условие $A(p(1))=2$ и дополнительно выбираются еще ряд элементов из набора $m(2) - m(25)$. С учетом того, что контурных элементов, обрабатываемых алгоритмом ZSM, значительно меньше по сравнению с общим числом элементов матрицы I , условия $A(p(1))=1$ и $A(p(1))=2$ выполняются относительно редко. Таким образом, вычислительная сложность алгоритма ZSM несколько выше вычислительной сложности алгоритма ZS.

Алгоритм ZSM состоит из следующих шагов.

Вход: Бинарное изображение I .

Инициализация матрицы S_{ZSM} скелетизации: $S_{ZSM} \leftarrow I$.

Цикл 1 (итеративная обработка матрицы S_{ZSM}):

Инициализация счетчика удаленных элементов: $N_{DE} \leftarrow 0$

Цикл 2 по (y, x) (удаление избыточных элементов матрицы S_{ZSM}):

Если для $s_{ZSM}(y, x)=1$ выполняются условия (1), (7), то $s_{ZSM}(y, x) \leftarrow 0$;
 $N_{DE} \leftarrow N_{DE} + 1$.

Конец цикла 2.

Цикл 3 по (y, x) (удаление избыточных элементов матрицы S_{ZSM}):

Если для $s_{ZSM}(y, x)=1$ выполняются условия (1), (8), то $s_{ZSM}(y, x) \leftarrow 0$;
 $N_{DE} \leftarrow N_{DE} + 1$.

Конец цикла 3.

Если $N_{DE} = 0$, то выход из цикла 1.

Конец цикла 1.

Выход: Матрица S_{ZSM} скелетизации.

Таким образом, в результате выполнения алгоритма ZSM формируется матрица S_{ZSM} скелетизации, единичные элементы которой указывают на линии скелетов, соответствующих бинарным объектам на исходном изображении I .

Оценка эффективности алгоритма скелетизации

Произведено сравнение предложенного алгоритма ZSM с алгоритмом двухшаговой ZS скелетизации [2], а также алгоритмом одношаговой скелетизации ОПТА [16] и его модификацией ОРСА [17]. Алгоритм ОРСА

отличается от алгоритмов ZS и ОПТА исключением избыточных масок и упрощением условий удаления пикселей, что делает его более быстрым. Алгоритмы реализованы на языке программирования C++ и протестированы на компьютере с ОС Windows 8 64-бит, CPU i7 2,6 GHz, RAM 8 GB. При этом использованы, предложенные в [6, 18] оценки: толщина скелета ST ($ST \in [0, 1]$; чем значение ST ближе к единице, тем скелет тоньше) [6], скорость скелетизации TS (число удаляемых элементов в секунду; чем значение TS больше, тем скорость утоньшения выше) [18], средняя ось MA (определяет возможность восстановления исходного изображения по скелету; чем значение MA ближе к единице, тем восстанавливаемость выше) [6], определяемые с помощью выражений (9) – (11).

$$ST = 1 - \frac{\sum_{y=0}^{Y-1} \sum_{x=0}^{X-1} \bigcup_{k=1}^4 s(y, x) Q(k)}{\sum_{y=0}^{Y-1} \sum_{x=0}^{X-1} s(y, x)}, \quad (9)$$

где $Q(k)$ – бинарная маска (рис. 3), позволяющая выявить избыточные элементы скелета.

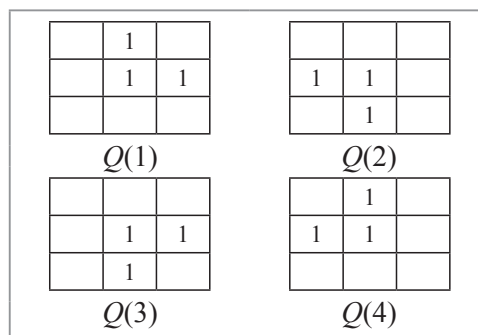


Рис. 3. Бинарные маски

$$TS = \left(\sum_{y=0}^{Y-1} \sum_{x=0}^{X-1} i(y, x) - \sum_{y=0}^{Y-1} \sum_{x=0}^{X-1} s(y, x) \right) / ET, \quad (10)$$

где ET – время скелетизации в секундах.

$$MA = \frac{\sum_{y=0}^{Y-1} \sum_{x=0}^{X-1} i'(y, x)}{\sum_{y=0}^{Y-1} \sum_{x=0}^{X-1} i(y, x)}, \quad (11)$$

где $i'(y, x)$ – пиксели восстановленного по скелету S изображения

$$I' = \left\| i'(y, x) \right\|_{(y=0, Y-1, x=0, X-1)}.$$

Результаты скелетизации 6-ти тестовых изображений $I(1) - I(6)$ и значения их оценок ST , TS , MA для алгоритмов ZS и ZSM приведены на рис. 4 и в табл. 1.


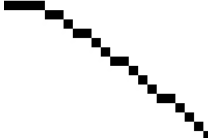

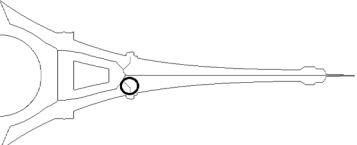


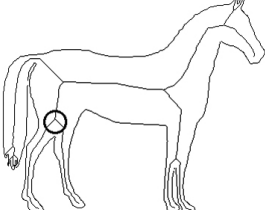
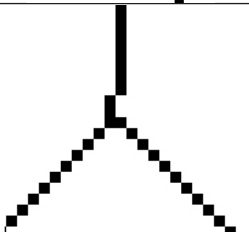
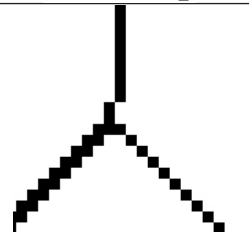
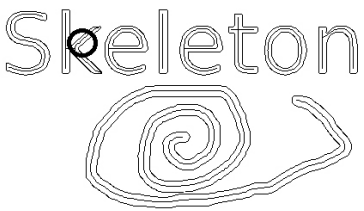
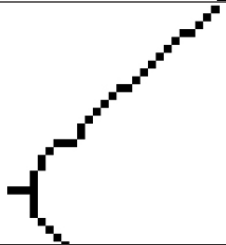


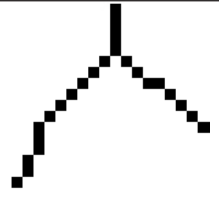
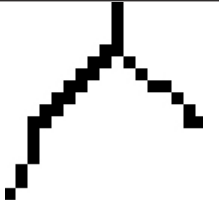

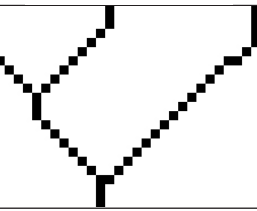
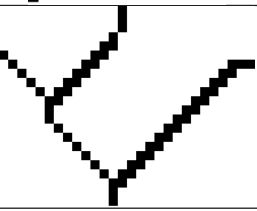
Тестовое изображение с выделенным фрагментом для алгоритма ZSM		Увеличенные изображения фрагментов, ограниченных окружностями	
		для алгоритма ZSM	для алгоритма ZS
I(1)			
I(2)			
I(3)			
I(4)			
I(5)			
I(6)			

Рис. 4. Результаты скелетизации тестовых изображений с помощью алгоритмов ZS и ZSM

Из табл. 1 следует, что по оценке ST алгоритм ZSM превосходит алгоритм ZS, уступая ему в большинстве случаев в производительности (оценка TS), что подтверждает теоретическую оценку. Оценка MA не дает однозначного результата. Поэтому в табл. 1 приведены также значения избыточности связей между

пикселями скелета SC ($SC \geq 0$; чем значение SC ближе к нулю, тем меньше избыточных связей и пикселей в скелете; неконцевые и узловые пиксели предельно тонкого скелета должны иметь связи только с двумя смежными пикселями), для определения которой предлагается использовать выражение

$$SC = \left(\sum_{y=1}^{Y-2} \sum_{x=1}^{X-2} \left(s(y,x) \left(\sum_{j=-1}^1 \sum_{i=-1}^1 s(y+j, x+i) - 1 \right) \right) - \left(2 \sum_{y=1}^{Y-2} \sum_{x=1}^{X-2} s(y,x) - N_{EP} \right) \right) / \sum_{y=1}^{Y-2} \sum_{x=1}^{X-2} s(y,x), \quad (12)$$

где N_{EP} – число концевых элементов скелета.

Таблица 1. Оценки результатов скелетизации тестовых изображений $I(1) - I(6)$

Изображение	Алгоритм	ST	TS	MA	SC	SE			
						CN=5%	CN=10%	CN=20%	CN=40%
I(1)	ZS	0,78	854	0,92	0,19	0,79	0,83	1,21	0,99
	ZSM	0,99	802	0,91	0,02	0,86	0,83	1,17	0,99
	OPTA	0,86	645	0,85	0,12	1,21	1,33	1,87	1,32
	OPCA	0,99	1318	0,93	0,02	3,52	4,54	4,04	3,15
I(2)	ZS	0,88	462	0,96	0,12	0,85	1,67	2,15	2,32
	ZSM	1,00	431	0,96	0,01	0,81	1,57	2,16	2,09
	OPTA	0,90	195	0,91	0,10	1,38	2,19	2,57	2,85
	OPCA	1,00	575	0,96	0,00	4,36	7,67	7,41	7,48
I(3)	ZS	0,84	516	0,95	0,15	0,46	1,16	1,77	1,79
	ZSM	0,99	482	0,95	0,02	0,57	1,13	1,83	1,70
	OPTA	0,98	204	0,89	0,03	0,90	1,98	1,87	2,42
	OPCA	1,00	705	0,95	0,01	6,46	7,91	9,93	9,73
I(4)	ZS	0,80	1352	0,95	0,17	0,88	1,11	1,12	1,21
	ZSM	0,99	1116	0,94	0,01	0,94	1,11	1,13	1,31
	OPTA	0,94	793	0,90	0,07	1,28	1,40	1,18	1,16
	OPCA	1,00	2549	0,95	0,00	4,87	5,38	5,55	5,56
I(5)	ZS	0,66	766	0,93	0,28	0,77	1,33	1,50	1,56
	ZSM	0,99	649	0,94	0,01	0,86	1,38	1,49	1,37
	OPTA	0,70	428	0,85	0,24	1,64	1,75	2,42	1,59
	OPCA	0,99	1092	0,94	0,02	3,96	4,71	4,80	5,55
I(6)	ZS	0,73	633	0,94	0,22	1,14	1,20	2,07	2,40
	ZSM	0,99	632	0,92	0,02	1,17	1,34	2,06	2,26
	OPTA	0,96	351	0,72	0,04	1,23	2,16	2,54	2,37
	OPCA	0,99	916	0,95	0,01	4,26	6,64	6,68	6,45

В табл. 2 приведены значения оценок (9)–(12), усредненные по 100 бинарным изображениям, содержащихся в работах [2, 4, 6] и тестовой базе Kimia's 99 [19]. Из табл. 2 следует, что алгоритм ZSM превосходит алгоритм ZS на 21 % по оценке ST и в 9,5 раза по оценке SC, уступая ему в производительности (оценка TS) только 2 %.

В табл. 1 и 2 приведены данные по алгоритмам одношаговой скелетизации OPTA [16]

и OPCA [17], из которых следует, что алгоритм ZSM по производительности (оценка TS) и качеству (оценки ST, MA, SC) превосходит OPTA, но уступает OPCA. Произведена оценка устойчивости рассматриваемых алгоритмов к контурному шуму. На рис. 5 приведены зашумленное изображение $I(1)$ и соответствующие ему скелеты, полученные с помощью алгоритмов ZS, ZSM, OPTA и OPCA, для уровня CN контурного шума 20 %.

Таблица 2. Средние значения оценок результатов скелетизации для 100 изображений

Алгоритм	ST	TS	MA	SC	SE			
					CN=5%	CN=10%	CN=20%	CN=40%
ZS	0,78	640	0,93	0,19	0,82	1,22	1,64	1,71
ZSM	0,99	627	0,93	0,02	0,93	1,23	1,61	1,62
OPTA	0,92	305	0,86	0,10	1,27	1,80	2,08	1,95
OPCA	1,00	860	0,95	0,01	4,57	6,14	6,40	6,32

Уровень CN контурного шума (в процентах) определяется на основе базового I (неза-

шумленного) и зашумленного \tilde{I} изображений с помощью выражения

$$CN = \sum_{y=0}^{Y-1} \sum_{x=0}^{X-1} (i(y, x) \oplus \tilde{i}(y, x)) / \left(4 \sqrt{\sum_{y=0}^{Y-1} \sum_{x=0}^{X-1} i(y, x)} \right) \cdot 100\%, \quad (13)$$

где \oplus – операция поэлементного суммирования по модулю два.

В табл. 1 и 2 приведены значения взвешенной ошибки SE формирования скелета, харак-

теризующей устойчивость к контурному шуму. Значения SE вычисляются на основе изображений I , \tilde{I} и соответствующих им матриц скелетизации S и \tilde{S} с помощью выражения

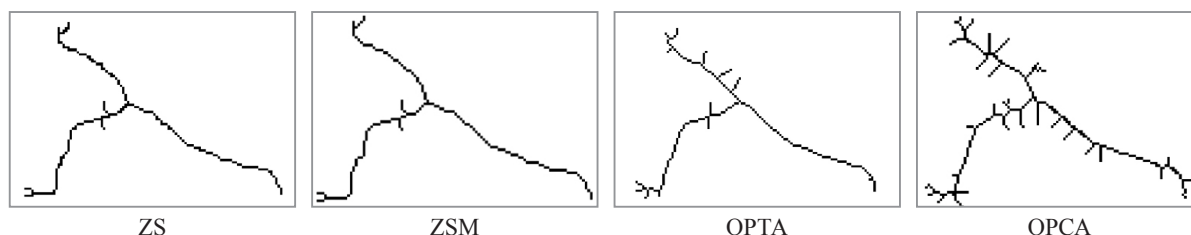


Рис. 5. Скелеты изображения $I(1)$, полученные с помощью ZS, ZSM и OPTA, при уровне контурного шума 20%

$$SE = \frac{\sum_{y=0}^{Y-1} \sum_{x=0}^{X-1} (s(y, x) \oplus \tilde{s}(y, x))}{\sum_{y=0}^{Y-1} \sum_{x=0}^{X-1} (i(y, x) \oplus \tilde{i}(y, x))}. \quad (14)$$

Числитель выражения (14) показывает количество несовпадающих пикселей скелетов S и \tilde{S} , а знаменатель – количество несовпадающих пикселей изображений I и \tilde{I} . Из табл. 1 и 2 следует, что по сравнению с ZS алгоритм ZSM уступает в устойчивости к слабому контурному шуму ($CN=5\%$) в 1,13 раза и выигрывает в устойчивости к сильному контурному шуму ($CN=40\%$) в 1,06 раза. При этом алгоритм ZSM в среднем в 1,33 и 4,45 раза более устойчив к контурному шуму по сравнению с OPTA и OPCA соответственно.

Заключение

Предложена математическая модель двухшаговой скелетизации на основе модифицированной модели Занга-Суена, дополненной порождающей маской и двумя логическими условиями оценки ее элементов. Реализация предложенной модели обеспечивает по сравнению с моделью Занга-Суена утоньшение скелета на 21% и сокращение числа избыточных связей между пикселями скелета в 9,5 раза при приблизительно такой же производительности и снижении устойчивости к контурному шуму в 1,1 раза.

ЛИТЕРАТУРА

1. Saha, P.K. A survey on skeletonization algorithms and their applications / P.K. Saha, G. Borgefors, G. Baja // Pattern Recognition Letters. – 2016. – Vol. 76. – P. 3–12.
2. Zhang, T.Y. A fast parallel algorithm for thinning digital patterns / T.Y. Zhang, C.Y. Suen // Comm. ACM. – 1984. – Vol. 27(3). – P. 236–239.
3. Harous, S. Handwritten Character-Based Parallel Thinning Algorithms: A Comparative Study / S. Harous, A. Elnagar // University of Sharjah Journal of Pure & Applied Sciences. – 2009. – Vol. 6(1). – P. 81–101.
4. Lu, H.E. A Comment on “A Fast Parallel Algorithm for Thinning Digital Patterns” / H.E. Lu, P.S.P. Wang // Communications of the ACM. – 1986. – Vol. 29(3). – P. 239–242.
5. Kocharyan, D. A Modified fingerprint image thinning algorithm / D. Kocharyan // American Journal of Software Engineering and Applications. – 2013. – Vol. 2(1). – P. 1–6.
6. Boudaoud, L.B. A new thinning algorithm for binary images / L.B. Boudaoud, A. Sider, A. Tari // 3rd International Conference on Control, Engineering & Information Technology. – 2015. – P. 1–6.
7. Boudaoud L.B. A modified ZS thinning algorithm by a hybrid approach / L.B. Boudaoud, B. Solaiman, A. Tari // The Visual Computer. – 2017. – P. 689–706.
8. Guo, Z. Parallel thinning with two-subiteration algorithms / Z. Guo, R. W. Hall // Communications of the ACM. – 1989. – Vol. 32(3). – P. 359–373.
9. Guo, Z. Fast fully parallel thinning algorithms / Z. Guo, R. W. Hall // CVGIP: Image Understanding. – 1992. – Vol. 55(3). – P. 317–328.
10. Zhang, Y.Y. A parallel thinning algorithm with two-subiteration that generates one-pixel-wide skeletons / Y.Y. Zhang, P.P. Wang // International Conference on Pattern Recognition, Vienna, Austria. – 1996. – Vol. 4. – P. 457–461.
11. Abdulla, W.H. A preprocessing algorithm for handwritten character recognition / W.H. Abdulla, A.O.M. Saleh, A.H. Morad // Pattern Recognition Letters. – 1988. – Vol. 7(1). – P. 13–18.
12. Sossa, J.H. An improved parallel algorithm for thinning digital patterns / J.H. Sossa // Pattern Recognition Letters. – 1989. – Vol. 10. – P. 77–80.
13. Tarabek, P. A Robust Parallel Thinning Algorithm for Pattern Recognition / P. Tarabek // 7th IEEE International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics. – 2012. – P. 75–79.
14. Kwon, J.-S. An enhanced thinning algorithm using parallel processing / J.-S. Kwon, J.-W. Gi, E.-K. Kang // IEEE. – 2001. – P. 752–755.
15. Dong, J. An improved parallel thinning algorithm / J. Dong, W. Lin, C. Huang // Proceedings of the 2016 International Conference on Wavelet Analysis and Pattern Recognition, Jeju, South Korea. – 2016. – P. 162–167.
16. Chin, R.T. A one-pass thinning algorithm and its parallel implementation // R.T. Chin, H.K. Wan, D.L. Stover, R.D. Iverson // Computer Vision, Graphics, and Image Processing. – 1987. – Vol. 40. – P. 30–40.

17. **Ma, Ц.** Скелетизация изображений на основе комбинации одно- и двухподытерационных моделей // Ц. Ма, В. Ю. Цветков, В. К. Конопелько // Информатика. – 2020. – Т. 17, № 2. – С. 25–35.
18. **Jang, B. K.** One-pass parallel: analysis, properties, and quantitative evaluation / B. K. Jang, R. T. Chin // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 1992. – Vol. 14. – P. 1129–1140.
19. **Sebastian, T. B.** Recognition of shapes by editing their shock graphs / T. B. Sebastian, P. N. Klein, B. B. Kimia // IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence. – 2004. – Vol. 26(5). – P. 550–571.

Поступила
03.12.2020

После доработки
22.02.2021

Принята к печати
01.03.2021

MA J., TSVIATKOU V. Yu., KANAPELKA V. K.

TWO-STEP SKELETIZATION OF BINARY IMAGES BASED ON THE ZHANG-SUEN MODEL AND THE PRODUCING MASK

The aim of the work is to limit excessive thinning and increase the resistance to contour noise of skeletons resulted from arbitrary binary image shape while maintaining a high skeletonization rate. The skeleton is a set of thin lines, the relative position, the size and shape, which conveys information of size, shape and orientation in space of the corresponding homogeneous region of the image. To ensure resistance to contour noise, skeletonization algorithms are built on the basis of several steps. Zhang-Suen algorithm is widely known by high-quality skeletons and average performance, which disadvantages are the blurring of diagonal lines with a thickness of 2 pixels and the totally disappear patterns of 2x2 pixels. To overcome them, a mathematical model that compensates the Zhang-Suen algorithm has proposed in this paper, along with a producing mask and two logical conditions for evaluating its elements.

Keywords: image skeletonization, Zhang-Suen algorithm, two-step skeletonization, parallel skeletonization.



Ма Цзюнь – Аспирант кафедры инфокоммуникационных технологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.
Ma Jun PG student of department of infocommunication technologies of Belerussian state university of informatics and radioelectronics.
E-mail: majun1313@hotmail.com



Цветков В.Ю. – Доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой инфокоммуникационных технологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.
V. Yu. Tsviatkou. Doctor of Engineering, associate professor, head of department of infocommunications of Belerussian state university of informatics and radioelectronics.
E-mail: vtsvet@bsuir.by.



Конопелько В.К. – Доктор технических наук, профессор, профессор кафедры инфокоммуникационных технологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.
V. Yu. Tsviatkou. Doctor of Engineering, professor, professor of department of infocommunications of Belerussian state university of informatics and radioelectronics.
E-mail: kafikt@bsuir.by.

Работа выполнена в рамках ГБЦ 16–2033 «Исследование методов обработки и передачи видеоданных в инфокоммуникациях» (№ госрегистрации 20163903).