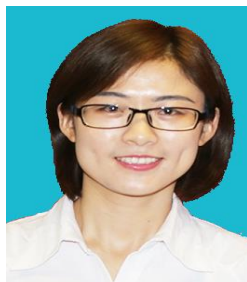


УДК [004.932]

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И АЛГОРИТМ СКЕЛЕТИЗАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ ОРТА И ZHANG-SUEN



Ц. Ма
Аспирант БГУИР
Гражданин Китай



С.Х. Жэнь
Аспирант БГУИР
Гражданин Китай



В.Ю. Цветков
заведующий кафедрой
инфокоммуникационных
технологий БГУИР
доктор технических
наук, доцент



В.К. Конопелько
Профессор кафедрой
инфокоммуникационных
технологий БГУИР,
доктор технических
наук, профессор

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь
E-mail: volos@bsuir.by

Аннотация. Рассматривается задача скелетизации бинарных изображений. Для построения предельно тонких связанных скелетов бинарных изображений с низкой вычислительной сложностью предложены математическая модель и алгоритм ОРСА (One-Pass Combination Algorithm) одноподитерационной скелетизации на основе комбинации и упрощения моделей одноподитерационной ОРТА и двухподитерационной Zhang-Suen (ZS) скелетизации. Эксперименте показано, что ОРСА алгоритм позволяет повышение скорости скелетизации, уменьшение избыточности связей между пикселями скелета в несколько раз.

Ключевые слова: скелетизации изображений, одноподитерационной скелетизации, двухподитерационной скелетизации, алгоритм ОРТА, алгоритм ZS, алгоритм ОРСА.

Введение. Одним из способов распознавания объектов на изображении является структурный подход, основанный на построении скелета объектов. Существует довольно много подходов, позволяющих скелетизировать изображение. В качестве наиболее известных можно взять параллельные алгоритмы ОРТА и ZS. Основная идея алгоритма ZS заключается в том, что на каждом шаге, пробегая по изображению рамкой 3×3 , проверяется принадлежность каждого пикселя к границе заданной связной области. Если условия проверки выполняются, то пиксель удаляется из области. И вне зависимости от количества выполненных шагов область останется связной, в предельном случае она выродится в линию толщиной в один пиксель. Наиболее высокое качество скелетов обеспечивают итерационные параллельные алгоритмы. Они могут реализовываться с использованием одной или нескольких подитераций, на каждой из которых происходит удаление избыточных элементов, окрестности которых удовлетворяют определенным условиям. Для многих одноподитерационных алгоритмов характерно нарушение связности и формирование избыточных фрагментов скелета. Наиболее качественные скелеты формирует известный одноподитерационный алгоритм ОРТА, основанный на 18-ти бинарных масках, но он чувствителен к контурному шуму и имеет высокую вычислительную сложность. Благодаря относительной простоте широкую известность получил двухподитерационный алгоритм Zhang и Suen (ZS), основанный на 6-ти логических условиях, но он размывает диагональные линии толщиной 2 пикселя и удаляет области размером 2×2 пикселя. Оба алгоритма не обеспечивают достижение минимальной толщины линий скелета [1-5].

Проблемами многих одноподитерационных алгоритмов являются нарушение связности и формирование избыточных фрагментов скелета. Для их решения в некоторых алгоритмах каждая итерация разбивается на две и более подитераций. Благодаря относительной простоте, согласно анализу [6], широкую известность получил двухподитерационный алгоритм ZS (Zhang-Suen) [7], основанный на 6-ти логических условиях. Как установлено в [8], основными недостатками алгоритма ZS являются размытие диагональных линий толщиной 2 пикселя и удаление областей размером 2x2 пикселя. Для устранения данных недостатков и развития алгоритма ZS предложены следующие его модификации: изменение порогового значения в первом логическом условии [6]; использование горизонтальных и вертикальных прямоугольных окон [9-10]. Использование расширенных окон из 11 пикселей [11-13]; расширение алгоритма на полутоновые изображения [14]; расширение условий удаления пикселей на второй подитерации для устранения чрезмерной эрозии [17]. Повышение качества скелетов в данных модификациях достигается за счет роста вычислительной сложности. Многие двухподитерационные алгоритмы, как и одноподитерационные, ориентированы на скелетизацию символов сканированных документов.

Целью работы является формирование связанных скелетов минимальной толщины для объектов произвольной формы на бинарных изображениях с низкой вычислительной сложностью.

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

В алгоритме ОРТА на каждой итерации окрестность единичного элемента $s_{ОРТА}(y, x)$ матрицы $S_{ОРТА}$ скелетизации проходит две проверки.

В алгоритме ZS каждая итерация состоит из двух подитераций и приводит к обнулению части единичных элементов $s_{ZS}(y, x)$ матрицы S_{ZS} скелетизации, смежные элементы в окрестности которых удовлетворяют определенным условиям.

На первой подитерации 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 второй подитерации 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.

Превосходя в качестве скелетов, алгоритм ОРТА имеет большую вычислительную сложность в сравнении с алгоритмом ZS. Это подтверждается теоретической оценкой сложности алгоритмов.

Предлагаемая математическая модель и алгоритм скелетизации. Для построения предельно тонких связанных скелетов одноподитерационной скелетизации на основе комбинации и упрощения моделей одноподитерационной ОРТА и двухподитерационной ZS скелетизации. Согласно предлагаемой модели на каждой итерации единичный элемент $s_{OPCA}(y, x)$ матрицы S_{OPCA} скелетизации обнуляется (перед первой итерацией значения пикселей бинарного изображения I переносятся в матрицу S_{OPCA} скелетизации), если значения элементов выборки $P = \left\| p(k) \right\|_{(k=2,11)}$, формируемой из элементов окрестности $s_{OPCA}(y, x)$, как показано на рис. 1, $(p(1) = s_{OPCA}(y, x))$, удовлетворяют условию (1), а также условиям:

$$\sum_{k=2}^9 |p(k) - p(\text{mod}_8(k-2+1)+2)| = 2, \quad (7)$$

$$\neg((p(4)=1) \wedge (p(8)=0) \wedge (p(10)=0) \vee (p(6)=1) \wedge (p(2)=0) \wedge (p(11)=0)) \quad (8)$$

После выполнения всех итераций, когда не удаляется ни одного элемента скелета на основании условий (1), (7) и (8), полученная матрица S_{OPCA} скелетизации проходит еще одну проверку, в результате которой удаляются единичные элементы $s_{OPCA}(y, x)$, удовлетворяющие условию

$$(p(k)=0) \wedge (p(\text{mod}_8(k-2+3)+2)=1) \wedge (p(\text{mod}_8(k-2+5)+2)=1) \text{ при } k = \{3, 5, 7, 9\} \quad (9)$$

На основе рассматриваемой модели предлагается алгоритм ОРСА скелетизации на основе комбинации и упрощения алгоритмов ОРТА и ZS. Сущность алгоритма ОРСА состоит в формировании матрицы S_{OPCA} скелетизации путем переноса в нее значений пикселей обрабатываемого бинарного изображения; итеративной обработке матрицы S_{OPCA} скелетизации для удаления ее избыточных единичных элементов с использованием условий (1), (7), (8); прекращении итеративной обработки при отсутствии избыточных единичных элементов матрицы S_{OPCA} скелетизации, для которых выполняются условия (1), (7), (8); удалений избыточных единичных элементов матрицы S_{OPCA} скелетизации с использованием условия (9). В результате выполнения алгоритма ОРСА формируется матрица S_{OPCA} скелетизации, единичные элементы которой указывают на линии скелетов, соответствующих бинарным объектам на исходном изображении I .

Произведено сравнение предложенного алгоритма ОРСА с известными алгоритмами одноподитерационной ОРТА [13] и двухподитерационной ZS [15] скелетизации, скорость скелетизации TS (число удаляемых элементов в секунду; чем значение TS больше, тем скорость утоньшения выше).

Значения оценок ST , TS , MA для 3-ти тестовых изображений $I(1) - I(3)$ (рис. 1) и алгоритмов ОРТА, ZS и ОРСА приведены в табл. 1. Результаты скелетизации $S(1) - S(3)$ тестовых изображений с помощью алгоритмов ОРТА, ZS и ОРСА приведены на рисунке 1.

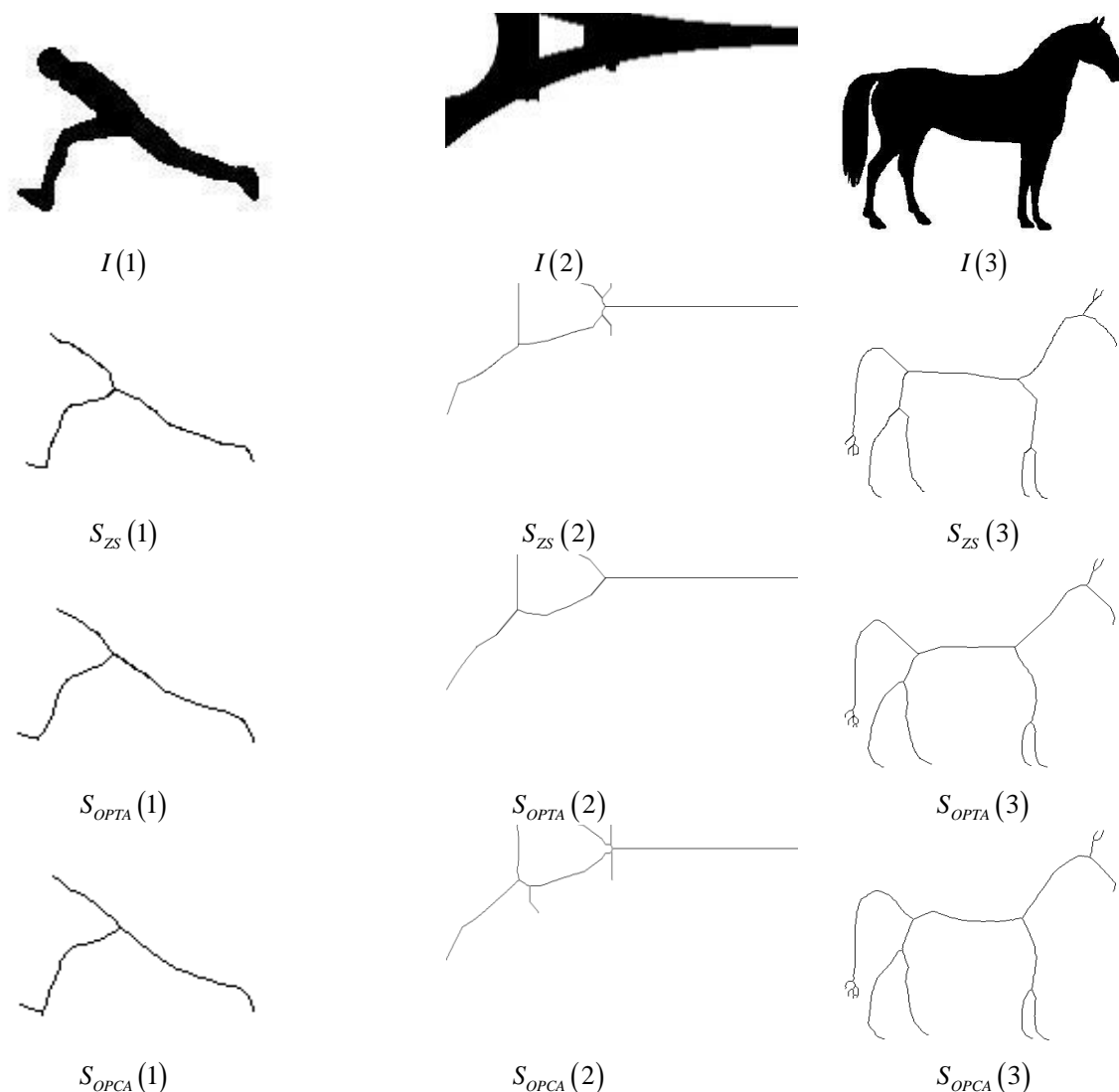


Рисунок 1. – Тестовые бинарные изображения и результаты скелетизации тестовых изображений с помощью алгоритма ОРТА, ZS и ОРСА.

Таблица 1. – Оценки результатов скелетизации тестовых изображений $I(1) – I(3)$

Изображение	Алгоритм	ST	TS	MA	SC
I(1)	ОРТА	0,8631	33,83	0,8521	0,1237
	ZS	0,7833	75,67	0,9208	0,1849
	ОРСА	0,9877	89,64	0,9263	0,0183
I(2)	ОРТА	0,8965	10,75	0,9115	0,0952
	ZS	0,8784	23,597	0,9602	0,1233
	ОРСА	0,9993	36,251	0,9606	0,0032
I(3)	ОРТА	0,9796	10,846	0,8941	0,0303
	ZS	0,8350	23,023	0,9502	0,1500
	ОРСА	0,9991	34,571	0,9544	0,0058

Все оценки, приведенные в табл. 1, свидетельствуют о более высокой эффективности алгоритма ОРСА в сравнении с алгоритмами ОРТА и ZS. Предложенная оценка SC избыточности связей между пикселями скелета также как оценка ST характеризует толщину линий скелета, но обеспечивает большую точность.

Заклучение. Предложены математическая модель и алгоритм ОРСА одноподитерационной скелетизации на основе комбинации и упрощения моделей одноподитерационной ОРТА и двухподитерационной ZS скелетизации. ОРСА отличается от ОРТА исключением масок, предназначенных для удаления избыточных элементов на горизонтальных и вертикальных прямых линиях скелета, использованием упрощенного условия для удаления пикселей в точках изломов линий скелета, исключением масок, предназначенных для удаления избыточных концевых элементов скелета. ОРСА отличается от ZS исключением всех условий удаления пикселей, кроме двух основных. По сравнению с ОРТА и ZS алгоритм ОРСА обеспечивает уменьшение толщины скелета, повышение скорости скелетизации, и уменьшение избыточности связей между пикселями скелета.

Список литературы

- [1.] Lam, L. Thinning methodologies-a comprehensive survey / L. Lam AI // Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions. – 1992. – Vol. 14. – P. 869-885.
- [2.] Jagna, A. An efficient image independent thinning algorithm. International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering. – 2014. – Vol. 3.
- [3.] S, S. I. A fast parallel thinning algorithm for the binary image skeletonization / I.S. S. Deng. Weian, N. E. Brener // International Journal of High Performance Computing Application. – 2000. – Vol. 14. – P. 65-81.
- [4.] Rosenfeld, A. Digital Picture Processing / A. Rosenfeld, A. Kak // Elsevier. – 1976
- [5.] 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.
- [6.] Harous, S. Handwritten Character-Based Parallel Thinning Algorithms: A Comparative Study / S. Harous, Elnagar // A University of Sharjah Journal of Pure & Applied Sciences. – 2009. – Vol. 6, № 1. – P. 81-101.
- [7.] 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.
- [8.] Lu, H.E. A Comment on “A Fast Parallel Algorithm for Thinning Digital Patterns”. Communications of the ACM / Lu H.E., P. Wang, S.P. – 1986. – Vol. 29, № 3. – P. 239-242.
- [9.] Abdulla, W.H. A preprocessing algorithm for handwritten character recognition. Pattern Recognition Letters / W.H. Abdulla, A.O.M. Saleh, A.H. Morad. – 1988. – Vol. 7, № 1. – P. 13-18.
- [10.] Sossa, J.H. An improved parallel algorithm for thinning digital patterns / J.H. Sossa // Pattern Recognition Letters. – 1989. – Vol. 10. – P. 77-80.
- [11.] Guo, Z. Parallel thinning with two-subiteration algorithms. Communications of the ACM / Z. Guo, R.W. Hall. – 1989. – Vol. 32, № 3. – P. 359-373.
- [12.] Guo, Z. Fast fully parallel thinning algorithms / Z. Guo, R.W. Hall // CVGIP: Image Understanding. – 1992. – Vol. 52, № 3. – P. 317-328.
- [13.] 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.
- [14.] Kundu, M.K. A Parallel Graytone Thinning Algorithm (PGTA) / M.K. Kundu, B.B. Chaudhuri, D.D. Majumder // Pattern Recognition Letters. – 1991. – Vol. 12, № 8. – P. 491-494.

- [15.] Kwon J.S. An enhanced thinning algorithm using parallel processing / J.S. Kwon, J. W. Gi, E. K. Kang // Proceeding of the International Conf. on Image Processing. – 2001. – P. 752-755.
- [16.] 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.
- [17.] Boudaoud, L.B. A new thinning algorithm for binary images / L.B. Boudaoud, A. Tari, A. Sider // 3rd International Based Conference on Control, Engineering & Information Technology. – 2015. – P. 1-6.

SINGLE-ITERATION IMAGE SKELETONIZATION BASED ON OPTA AND ZHANG-SUEN ALGORITHMS

MA JUN <i>Postgraduate student of the BSUIR</i>	REN XUN HUAN <i>Postgraduate student of the BSUIR</i>	Y.YU. TSVLATKOU <i>Doctor of Engineering Sciences and Header of Infocommunication Technologies Department BSUIR, Associate professor</i>	V.K.KONOPELKO <i>Doctor of Engineering Sciences Professor of Infocommunication Technologies Departmen BSUIR, professor</i>
---	---	--	--

*Belarusian State University of Informatics and Radio Electronics, Republic of Belarus
E-mail: volos@bsuir.by*

Abstract. This paper is focused on the field of the skeletonization of the binary image. Mathematical model and OPCA algorithm which based on a combination and simplification of single-iterative OPTA and two-iterative ZS are proposed for constructing extremely thin bound skeletons of binary images with low computational complexity. The experiment showed that the OPCA algorithm allows increasing the skeletonization speed, reducing the redundancy of the bonds between the skeleton pixels several times.

Keywords: skeletonization image, single-iteration skeletonization, double-iteration skeletonization, algorithm OPTA, algorithm ZS, algorithm OPCA.