

УДК 621.391

ОДНОПОДИТЕРАЦИОННАЯ СКЕЛЕТИЗАЦИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Ц. МА, В.Ю. ЦВЕТКОВ, В.К. КОНОПЕЛЬКО

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь**Поступила в редакцию 30 марта 2020*

Аннотация. 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 ZS скелетизации.

Ключевые слова: скелетизация изображений, алгоритм ОРТА, алгоритм ZS, одноподитерационная скелетизация.

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. 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]. 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.

Постановка задачи

Для бинарного изображения $I = \left\| i(y, x) \right\|_{(y=0, Y-1, x=0, X-1)}$ размером $Y \times X$, пиксели которого имеют значения 1 или 0 в зависимости от принадлежности площадному объекту или фону соответственно, алгоритмы скелетизации формируют матрицу $S = \left\| s(y, x) \right\|_{(y=0, Y-1, x=0, X-1)}$ 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 (перед первой итерацией значения пикселей бинарного изображения I переносятся в матрицу $S_{ОРТА}$ скелетизации). Если окрестность элемента $S_{ОРТА}(y, x)$ соответствует одной из масок: а) приведенных на рис. 1, а, то $S_{ОРТА}(y, x) \leftarrow 0$ (шаг 1); б) приведенных на рис. 1, б, то $S_{ОРТА}(y, x) \leftarrow 1$ (шаг 2). Затем полученная матрица $S_{ОРТА}$ скелетизации проходит еще одну проверку, в результате которой удаляются единичные элементы $S_{ОРТА}(y, x)$, окрестность которых совпадает с одной из масок, приведенных на рис. 1, в (шаг 3). Обобщенная маска для алгоритма ОРТА приведена на рис. 1, г, где $p(1) = S_{ОРТА}(y, x)$.

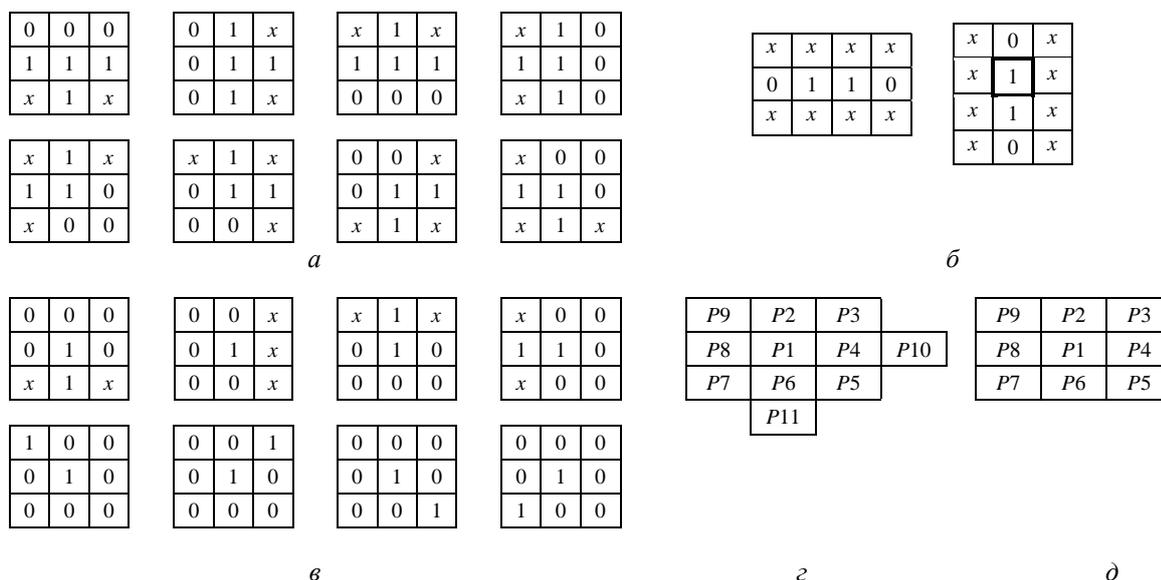


Рис. 1. Бинарные маски алгоритмов ОРТА и ZS
 а – на шаге 1ОРТА (x – безразличное состояние); б – на шаге 2ОРТА;
 в – на шаге 3ОРТА; г – общий по шагам 1-3ОРТА; д – для ZS

На рис. 2 в качестве примера приведены бинарное изображение I размером 15×15 пикселей (рис. 2, а), содержащее несколько объектов, и бинарные изображения матриц скелетизации S , соответствующие этому изображению и сформированные с помощью алгоритмов скелетизации: одноподытерационного ОРТА[11] (рис. 2, б) и двухподытерационного ZS[13] (рис. 2, в).

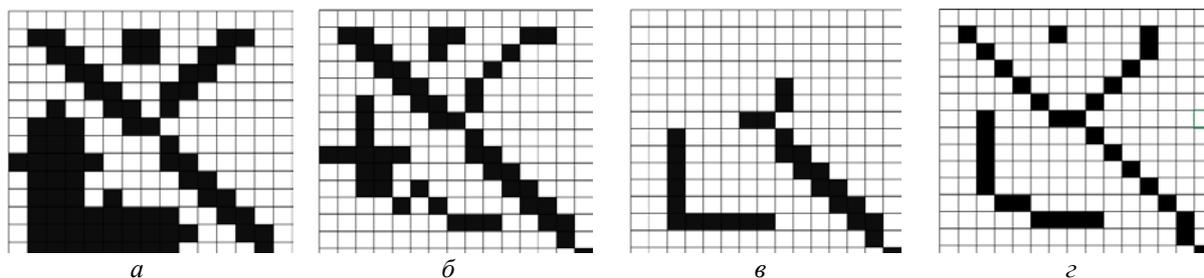


Рис. 2. Бинарное изображение и результаты его скелетизации:
 а – бинарное изображение I ; б – скелеты ОРТА; в – скелеты ZS; г – скелеты ОРСА

Рис. 2 показывает основные недостатки алгоритмов ОРТА и ZS. В обоих алгоритмах не достигается минимальная толщина линий скелета (многие узловые элементы имеют более двух соседей). Алгоритм ZS теряет некоторые диагональные линии и области 2×2 . Скелеты, формируемые алгоритмом ОРТА, лишены этих недостатков, но подвержены контурному шуму (незначительные искривления контурной линии отражаются на форме скелета).

Алгоритм скелетизации

Для построения предельно тонких связанных скелетов (неузловые элементы скелета имеют не более двух соседей) бинарных изображений с низкой вычислительной сложностью предлагается математическая модель ОРСА (One-Pass Combination Algorithm) одноподитерационной скелетизации на основе комбинации и упрощения моделей одноподитерационной ОРТА и двухподитерационной ZS скелетизации. Согласно предлагаемой модели на каждой итерации единичный элемент $S_{ОРСА}(y, x)$ матрицы $S_{ОРСА}$ скелетизации обнуляется (перед первой итерацией значения пикселей бинарного изображения I переносятся в матрицу $S_{ОРСА}$ скелетизации), если значения элементов выборки $P = \{p(k)\}_{k=2,11}$, формируемой из элементов окрестности $S_{ОРСА}(y, x)$, как показано на рис. 1, $z(p(1) = S_{ОРСА}(y, x))$.

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

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

$$\neg((p(4) = 1) \wedge (p(8) = 0) \wedge (p(10) = 0) \vee (p(6) = 1) \wedge (p(2) = 0) \wedge (p(11) = 0)) \tag{3}$$

После выполнения всех итераций, когда не удаляется ни одного элемента скелета на основании условий (1-3) полученная матрица $S_{ОРСА}$ скелетизации проходит еще одну проверку, в результате которой удаляются единичные элементы $S_{ОРСА}(y, x)$, удовлетворяющие условию

$$(p(k) = 0) \wedge (p(\text{mod}_8(k - 2 + 3) + 2) = 1) \wedge (p(\text{mod}_8(k - 2 + 5) + 2) = 1) \text{ при } k = \{3, 5, 7, 9\} \tag{4}$$

Исходя из рассмотренной модели предлагается алгоритм ОРСА скелетизации на основе комбинации и упрощения алгоритмов ОРТА и ZS. Сущность алгоритма ОРСА состоит в формировании матрицы $S_{ОРСА}$ скелетизации путем переноса в нее значений пикселей обрабатываемого бинарного изображения; итеративной обработке матрицы $S_{ОРСА}$ скелетизации для удаления ее избыточных единичных элементов с использованием условий (1-3); прекращении итеративной обработки при отсутствии избыточных единичных элементов матрицы $S_{ОРСА}$ скелетизации, для которых выполняются условия (1-3); удалении избыточных единичных элементов матрицы $S_{ОРСА}$ скелетизации с использованием условия (9).

Оценка алгоритма скелетизации

Произведено сравнение предложенного алгоритма ОРСА с известными алгоритмами одноподитерационной ОРТА [19] и двухподитерационной ZS скелетизации (алгоритмы реализованы на языке программирования C++ и протестированы на компьютере с ОС Windows 8 64-бит, CPU i7 2,6 GHz, RAM 8 GB). Тестовые изображения $I(1) - I(3)$ показаны на рис. 3. Результаты скелетизации тестовых изображений с помощью алгоритмов ОРТА, ZS и ОРСА приведены на рис. 4.

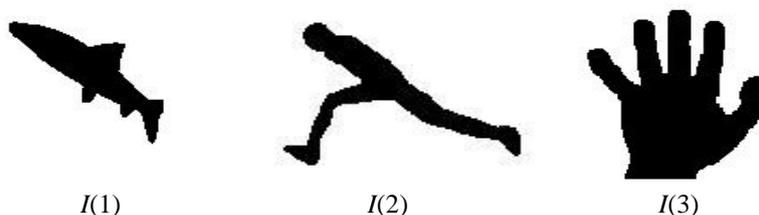


Рис. 3. Тестовые бинарные изображения: $I(1) - I(3)$

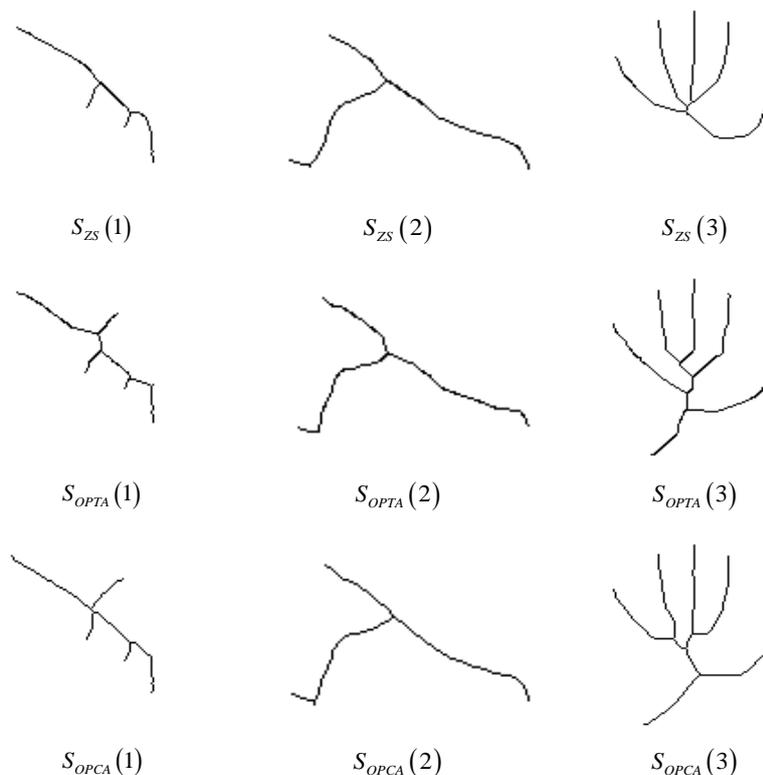


Рис. 4. Результаты скелетизации тестовых изображений: S_{ZS} (1–3) – Результаты ZS; S_{OPTA} (1–3) – Результаты OPTA; S_{OPCA} (1–3) – Результаты OPCA

Заключение

Предложены математическая модель и алгоритм OPCA одноподтерационной скелетизации на основе комбинации и упрощения моделей одноподтерационной OPTA и двухподтерационной ZS скелетизации. OPCA отличается от OPTA 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. OPCA отличается от ZS исключением всех условий удаления пикселей, кроме двух основных.

SKELTONIZATION WITH SINGLE SUBITERATION

JUN MA, V.Yu. TSVIATKOU, V.K. KONOPELKO

Abstract. To construct extremely thin coupled skeletons of binary images with low computational complexity, a mathematical model and OPCA (One-Pass Combination Algorithm) single-feed skeletonization based on a combination and simplification of single-feed OPTA and two-feed ZS skeletonization are proposed.

Keywords: skeletonization, algorithm OPTA, algorithm Zhang-Suen, single-iteration skeletonization.

Список литературы

1. Dinneen G.P. // Western Joint Computer Conference. 1955. P. 94–100.
2. Kirsch R.A. // Eastern Computer Conference. 1957. P. 221–229.

3. Lam L., Lee S.W., Suen C.Y. // IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence. 1992. vol. 14, № 9. P. 869–885.
4. Holt C., Stewart A., Clint C., Perrott R. // Communication ACM. 1987. P. 156–160.
5. Manzanera A., [et. al.] // Discrete Geometry for Computer Imagery. 1999. P. 313–324.
6. Bernard T.M., Manzanera A. // Proceedings 10th International Conference on Image Analysis and Processing. 1999. P. 215–220.
7. Chen C.S., Tsai W.H. // Pattern Recognition Letters. 1990. vol. 11. P. 471–477.
8. Wu R.Y., Tsai W.H. // Pattern Recognition Letters, 1992. vol.13. P. 715–723.
9. Deng W., Lyengar S.S, Brener N.E. // International Journal of High Performance Computing Applications. 2000. P. 65–81.
10. Stefanelli R., Rosenfeld A. // Journal of the ACM. 1971. vol. 18. P. 255–264.
11. Chin R.T., [et. al.]// Computer Vision, Graphics, and Image Processing. 1987. vol. 40. P. 30–40.
12. Harous, S., Elnagar A. // University of Sharjah Journal of Pure & Applied Sciences. 2009. vol. 6, № 1. P. 81–101.
13. Zhang T.Y., Suen C.Y. // Comm. ACM. 1984. vol. 27, № 3. P. 236–239.
14. Lu H.E., Wang P.S.P. // Communications of the ACM. 1986. vol. 29, № 3. P. 239–242.
15. Abdulla W.H., Saleh A.O.M., Morad A.H. // Pattern Recognition Letters. 1988. vol. 7, № 1. P. 13–18.
16. Sossa J.H. // Pattern Recognition Letters. 1989. vol. 10. P. 77–80.
17. Guo Z., Hall R.W. // Communications of the ACM. 1989. vol. 32, № 3. P. 359–373.
18. Guo Z., Hall R.W. // CVGIP: Image Understanding. 1992. vol. 55, № 3. P. 317–328.
19. Zhang Y.Y., Wang P.P. // International Conference on Pattern Recognition, Vienna, Austria. 1996. vol. 4. P. 457–461.
20. Kundu M.K., Chaudhuri B.B., Majumder D.D. // Pattern Recognition Letters. 1991. vol. 12, № 8.P. 491–494.