

УДК 004.932.72'1; 004.93'14

ТЕХНОЛОГИЯ ПОСТРОЕНИЯ АЛГОРИТМОВ УТОНЬШЕНИЯ ДЛЯ СКЕЛЕТИЗАЦИИ ПРОТЯЖЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

Д.А. БУШЕНКО, Р.Х. САДЫХОВ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь*

Поступила в редакцию 24 августа 2009

Скелетизация протяженных объектов сопряжена с различными трудностями, вызванными формой объекта. В статье рассмотрен классический алгоритм скелетизации Зонг-Суня и показаны его недостатки. Предложены четыре модификации алгоритма, предназначенные для скелетизации протяженных объектов на различных изображениях: бинарных, полутоновых, цветных двумерных и многомерных.

Ключевые слова: цифровая обработка изображений, скелетизация, утоньшение, протяженные объекты.

Введение

Скелетизация объектов применяется в различных областях цифровой обработки изображений. Так, например, необходимо выделить скелеты рукописных символов для того, чтобы получить их инвариантные характеристики; необходима скелетизация волокон мышечной ткани на медицинских изображениях для выполнения их последующей обработки с целью поиска заболеваний; скелетизация нужна также при идентификации текстильных волокон для получения их характеристик [1-3]. Исходя из этого, было разработано большое количество различных алгоритмов скелетизации.

Методы скелетизации делятся на несколько больших групп, основанных на модификациях алгоритма эрозии [4-7], различных видах векторизации [8-10], фильтрации [11-12], морфологических преобразованиях [8, 13] и деформируемых моделях [14]. Эти методы сходным образом применяются как для $2D$, так и $3D$ -объектов: как для бинарных, так и для полутоновых и цветных изображений. Обычно для каждого типа задачи разрабатывается свой собственный алгоритм на основе упомянутых выше алгоритмов, оптимизированный для некоторого класса входных данных. Рассматриваемый ниже класс протяженных объектов изображения (далее – объектов) также требует специализированных алгоритмов. Наибольшей популярностью пользуются методы утоньшения, основанные на модификациях алгоритма эрозии, ввиду того, что они легко реализуются, масштабируются и обладают высокой производительностью при приемлемом качестве. Поскольку различные методы утоньшения в разной степени применимы для скелетизации протяженных объектов, было бы удобно иметь принципы построения алгоритмов скелетизации таким образом, чтобы можно было обрабатывать как бинарные, так и полутоновые и цветные протяженные объекты как на двумерных, так и на многомерных изображениях.

Алгоритм Зонг-Суня

Скелет объекта – это такое множество его точек, которое состоит из центров вписанных в объект окружностей [4]. Однако для обработки протяженных объектов важно, чтобы их скелеты не только повторяли форму объектов, но и чтобы у них не было разъединенных участков. Таким образом, к базовому определению скелета добавим свойство скелета протяженного объ-

екта: одному протяженному объекту соответствует только один скелет, который не имеет разьединенных фрагментов.

Наиболее известным алгоритмом скелетизации является алгоритм Зонг-Суня [15]. Его отличие от обычного утоньшения в том, что прежде, чем удалить пиксель в процессе эрозии, исследуется, насколько повлияет удаление этого пикселя на соединенность скелета. В случае, если удаление пикселя не создаст разьединенных фрагментов скелета, пиксель удаляется.

Способ определения возможности удаления пикселя основан на обработке пикселей окрестности вокруг исследуемого пикселя (рис. 1).

P_1	P_2	P_3
P_8	P_0	P_4
P_7	P_6	P_5

Рис. 1. Окрестность пикселя P_0 .

На первой субитерации пиксель удаляется, если соответствует следующим условиям:

$$2 \leq B(P_1) \leq 6$$

$$B(P_1) = \sum_{i=1}^8 P_i$$

$$A(P_1) = 1$$

$$P_2 \cdot P_4 \cdot P_6 = 0$$

$$P_8 \cdot P_4 \cdot P_6 = 0,$$

где $A(P_1)$ – количество конфигураций 0/1 в последовательности P_1 - P_8 (заканчивая пикселем P_1). Это значит, что вокруг пикселя P_0 существует всего один переход из 0 в 1.

Вторая субитерация аналогична первой с единственным отличием:

$$P_2 \cdot P_4 \cdot P_8 = 0$$

$$P_2 \cdot P_6 \cdot P_8 = 0.$$

Алгоритм производит более точные скелеты, чем обычное утоньшение, хотя и они содержат разьединенные фрагменты (рис. 2). Другой недостаток описанного алгоритма состоит в появлении ложных ветвей скелетов. Третий недостаток алгоритма Зонг-Суня в том, что он подходит для скелетизации объектов только в двумерном пространстве и не применим для обработки многомерных данных, при количестве измерений больше двух. Поэтому, если указанные недостатки имеют важное значение для корректного решения задачи, нужен другой, более точный алгоритм скелетизации.

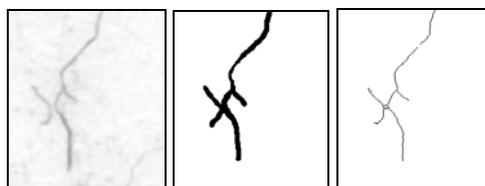


Рис. 2. Исходное изображение текстильного волокна – слева; бинаризованное изображение – в центре; скелетизированное изображение при помощи алгоритма Зонг-Суня – справа.

Модифицированный алгоритм утоньшения для скелетизации бинарных двумерных изображений

Итак, рассмотренный алгоритм утоньшения обладает рядом недостатков, делающих невозможным его применение в задачах скелетизации протяженных объектов, таких, как текстильные волокна. Наиболее подходящим является классический алгоритм утоньшения [6]. Поэтому он был доработан до соответствия следующим условиям.

1. Скелет одного объекта должен быть одной непрерывной линией.
2. Скелет должен быть не более одного пикселя шириной.
3. Скелет должен точно повторять форму объекта.

Схема предложенного модифицированного алгоритма утоньшения показана на рис. 3. Его отличие от классического алгоритма утоньшения заключается во введении понятия «пиксель-коннектор», т.е. такой пиксель, который во время утоньшения не удаляется.

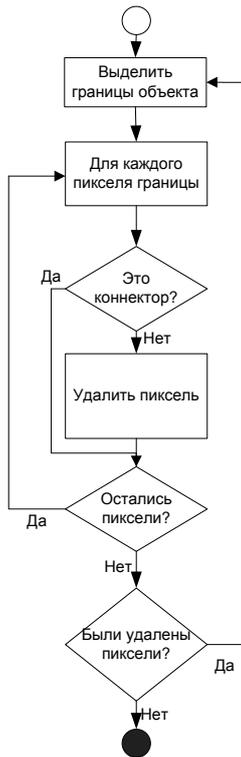


Рис. 3. Блок-схема модифицированного алгоритма утоньшения.

Используем следующий набор правил для построения модифицированного алгоритма утоньшения.

Правило 1. Пиксель-коннектор удалять нельзя.

Правило 2. Утоньшение необходимо проводить до тех пор, пока объект не будет состоять только из пикселей-коннекторов, которые и станут скелетом объекта.

Для того, чтобы при построении алгоритма утоньшения можно было выполнить правила 1-2, нужно иметь точный способ определения, является ли пиксель коннектором. Введем правило 3 для определения пикселей-коннекторов.

Правило 3. Если при удалении пикселя количество объектов в его окрестности изменилось, то пиксель является коннектором. Пиксель, в окрестности которого есть еще только один пиксель, также является коннектором.

Так, например, на рис. 4,а; 4,б показан пиксель, удаление которого увеличивает количество объектов в его окрестности (рассматриваемая окрестность равна 3x3 пикселя). На рис. 4,в; 4,г показан пиксель, удаление которого никак не влияет на число объектов в его окрестности.

Следует также отметить, что при реализации описанного алгоритма определение пикселей-коннекторов нужно выполнять на исходном изображении, а операции удаления пикселей – на временном изображении в памяти. Затем, когда итерация завершена, пиксели, удаленные

на временном изображении, должны быть удалены и на исходном.

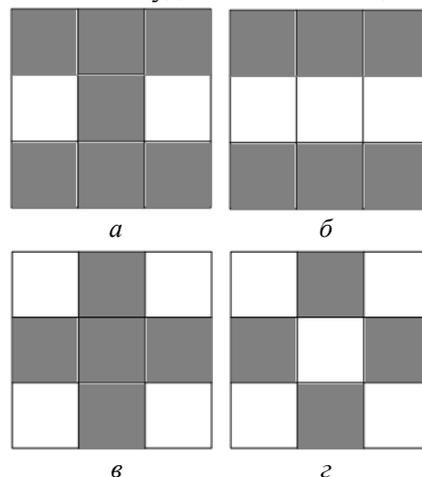


Рис. 4. Исходное изображение с пикселем-коннектором в центре – (а); Изображение с удаленным пикселем-коннектором – (б); исходное изображение с исследуемым пикселем в центре – (в); удаленный пиксель из центра не повлиял на число объектов в его окрестности – (г).

В случае, если ресурс памяти является критичным, то для бинарного изображения можно выполнять удаление пикселей и на исходном изображении. Однако, поскольку циклы просятривают пиксели слева направо и сверху вниз, везде, где на изображении есть «правый нижний угол», будет появляться лишняя ветвь скелета. Таким образом, прежде чем выполнить итерацию, такие пиксели нужно удалить. Исходя из описания окрестности пикселя (рис. 1),

ниже представлены условия, при которых пиксель должен быть удален до начала итерации. Пиксели объекта имеют значение 1, пиксели фона – 0. Тогда:

$$P_0 + P_1 + P_2 + P_3 = 4$$

$$P_3 + P_4 + P_5 + P_6 + P_7 = 0.$$

Используя предложенный модифицированный алгоритм, были получены лучшие результаты при скелетизации протяженных объектов в задачах идентификации текстильных волокон.

Рис. 5 сравнивает алгоритм утоньшения Зонг-Суня и предложенный модифицированный алгоритм. Легко заметить, что скелеты, выделенные при помощи предложенного модифицированного алгоритма, обладают большей точностью, чем скелеты, полученные при помощи алгоритма Зонг-Суня, и нигде не разомкнуты.

Модифицированный алгоритм утоньшения для скелетизации полутоновых двумерных изображений

На бинарных изображениях изначально все пиксели заданы таким образом, чтобы их было только два вида: пиксели объекта и пиксели фона. Но на полутоновых объектах нельзя точно определить, принадлежит ли пиксель объекту. Поэтому для того, чтобы применить правила 1-3 для утоньшения полутоновых объектов, нужно каким-то образом разграничить пиксели на два класса: пиксели объекта/фона.

Полутоновые изображения характеризуются тем свойством, что пиксели фона находятся ближе к одному концу диапазона яркостей, а пиксели объектов – к другому. На исследуемых в данной статье изображениях фон – белая бумага – при сканировании имеет яркости в диапазоне [240..255] и они ближе к концу диапазона 255. Объекты – текстильные волокна, в зависимости от окраски их яркости находятся в диапазоне [0..250], их ближайший конец диапазона – 0.

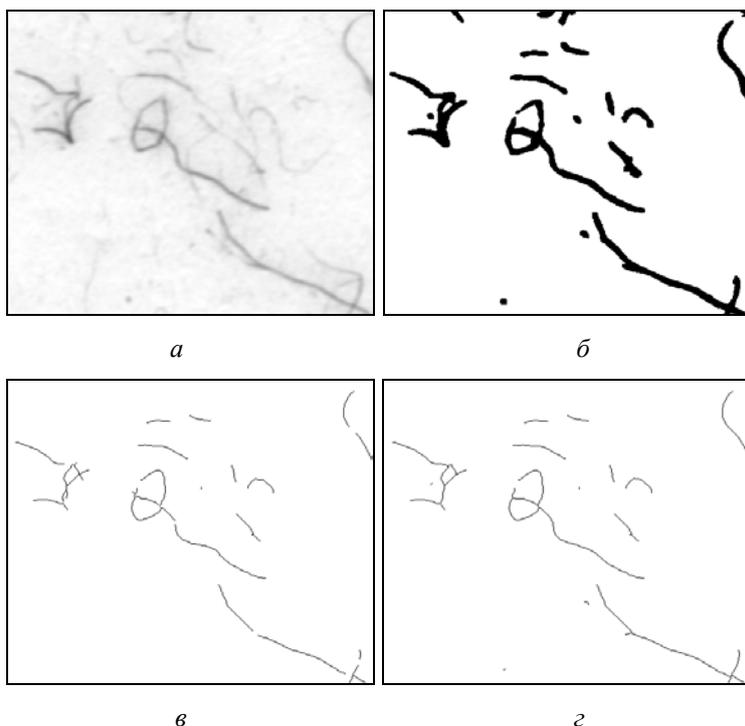


Рис. 5. Исходное изображение с текстильным волокном – (а); маска выделенных объектов – (б); скелеты, выделенные при помощи алгоритма Зонг-Суня – (в); скелеты, выделенные при помощи предложенного модифицированного алгоритма утоньшения – (г).

Введем правила для скелетизации полутоновых объектов.

Правило 4. Для скелетизации полутоновых объектов необходимо просматривать яркости от конца диапазона яркостей объектов до конца диапазона яркостей фона. При этом на каждой итерации для исследуемого уровня яркости объектом следует считать все пиксели, яр-

кость которых ниже либо равна этому уровню, фоном – пиксели, яркость которых выше. Разделив, таким образом, все пиксели на классы объект/фон, необходимо выполнить описанный выше модифицированный алгоритм утоньшения для скелетизации бинарных двумерных изображений.

Правило 5. При полутоновой скелетизации с применением правила 4 удалять можно только пиксели, яркость которых равна текущему уровню яркости на данной итерации.

Правило 6. Операцию удаления для полутонового утоньшения определим как присвоение пикселю значения уровня яркости фона. Будем считать, что это значение – минимальная яркость окрестности пикселя, и оно больше яркости самого пикселя.

Здесь необходимо отметить, что при применении *правила 6* важно, чтобы новая яркость пикселя была обязательно больше, чем его исходная яркость. Если примем, что яркость может быть больше либо равна исходной яркости пикселя, утоньшение зациклится.

На рис. 6 показан результат обработки полутонового изображения описанным выше алгоритмом. Легко заметить, что полученные скелеты точно повторяют форму объектов, нигде не разомкнуты и их ширина везде равна одному пикселю.

Можно выделить два недостатка полутонового утоньшения.

1. Результат не бинаризован, изображение содержит окрашенные фрагменты, принадлежащие как фону, так и объектам.

2. Выделено множество ветвей скелета, принадлежащих не только объектам, но и фону.

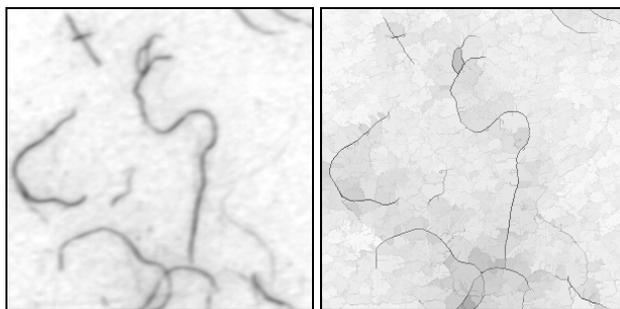


Рис. 6. Исходное изображение – (а); результат полутонового утоньшения – (б).

Преодолеть недостаток 1 можно при помощи специального морфологического фильтра, который удаляет все пиксели, образующие объект шириной более одного пикселя, а недостаток 2 – при помощи пороговой фильтрации.

Модифицированный алгоритм утоньшения для скелетизации цветных двумерных изображений

В зависимости от задачи, может потребоваться также модификация алгоритма и для скелетизации цветных изображений. Здесь возможны два случая.

1. Цвет пикселя описывается при помощи нескольких каналов, значения которых принадлежат конечному упорядоченному множеству с наименьшим и наибольшим элементом [16]. Такой, например, является система RGB, где значение каждого канала находится в диапазоне [0..255]. В этом случае утоньшение можно производить либо с дальнейшим усреднением результата, либо с отдельным использованием данных по каждому каналу.

2. Цвет пикселя описывается при помощи кольца значений – упорядоченного множества без наименьшего и наибольшего элементов. Такой, например, является система HSV, где значение тона измеряется в радианах или градусах. Поскольку для исходного алгоритма полутонового утоньшения обязательно иметь наибольшее и наименьшее значения цвета, то их нужно каким-то образом вычислить. Так, например, наибольшим значением (значением фона) можно считать медиану тона изображения. Все же остальные значения расположить по шкале в зависимости от близости к медиане.

Модифицированный алгоритм утоньшения для скелетизации многомерных изображений

Исходный модифицированный алгоритм утоньшения легко применить и для многомерных изображений. Так, например, чтобы выполнить утоньшение трехмерных изображений, нужно использовать описанные *правила 1-6* (рис. 3), но при этом исследовать не двумерную, а трехмерную окрестность пикселя. Все остальное остается без изменений.

Выводы

Скелетизация объектов является актуальной проблемой цифровой обработки изображений, и хотя существует множество алгоритмов скелетизации, нет такого, который бы полностью подходил для скелетизации протяженных объектов. В статье представлены модификации алгоритма утоньшения для скелетизации объектов на изображениях: бинарных, полутоновых, цветных, а также двумерных и трехмерных. Представлены шесть правил, используя которые можно продолжать дальнейшие модификации алгоритмов с целью их доработки до соответствия более узкому классу входных данных. Описанные алгоритмы показывают результаты отличного качества при скелетизации протяженных объектов и могут быть использованы в самых различных задачах.

THE TECHNOLOGY OF DESIGNING OF THE THINNING ALGORITHMS FOR SKELETONIZATION OF EXTENDED OBJECTS

D.A. BUSHENKO, R.Kh. SADYKHOV

Abstract

Skeletonization of extended objects is usually a challenge due to their shape. The article observes the classical skeletonization technique by Zhang and Suen and the weak points of their algorithm. Also the article proposes four modifications of the skeletonization algorithm which could be applied to extended objects on the images of different type: binary, halftone, color 2D and 3D.

Литература

1. *Maltoni D., Maio D., Jain A.K., Prabhakar S.* Handbook of Fingerprints Recognition. 2003
2. *Недзьведь А.М.* Сегментация слабоконтрастных изображений гистологических объектов: Дис. ... канд. техн. наук. Минск, 1999.
3. *Bushenko D.A., Sadykhov R.Kh.* Segmentation of Extensive Objects on Low-Contrast Images, Proceedings of ICNNAI'2008. Minsk, 2008.
4. *Тузигов А.В., Шейнин С.А., Жук Д.В.* Математическая морфология, моменты, стереообработка. Минск, 2006.
5. *Jahne B.* Digital Image Processing. Berlin, 2002.
6. *Gonzalez R.C., Woods R.E.* Digital Image Processing. New Jersey, 2001.
7. *Serra J.* Image Analysis and Mathematical Morphology. London, 1982.
8. *Буренин С.Е.* Распознавание автомобильного регистрационного номерного знака с локализованной области. Томск, 2006
9. *Alt H., Schwarzkopf O.* The Voronoi diagram of curved objects. Proc. 11th Annual ACM Symposium on Computational Geometry. 1995. P. 89-97.
10. *Ogniewicz R., Ilg M.* Voronoi Skeletons: Theory and applications, CVPR'92. 1992. P. 63-69.
11. *Gustafsson F.* Adaptive Filtering and Change Detection, John Willey & Sons Ltd. 2000.
12. *Фурман А.Я.* Введение в контурный анализ. М., 2003.
13. *Мустафин С.А.* Об одном методе построения скелетов объектов изображения. Докл. 11-й Всеросс. конф. «Математические методы распознавания образов». М., 2003. С.374-376.
14. *Curwen, R.* Dynamic and Adaptive Contours, PhD thesis. 1993.
15. *Zhang T.Y., Suen C.Y.* // Commun. ACM. Vol. 27, No. 3. 1984. P.236-239.
16. *Большаков А.А., Каримов Р.Н.* Методы обработки многомерных данных и временных рядов. Смоленск, 2007.