

АЛГОРИТМ ЗАПОЛНЕНИЯ ОТВЕРСТИЙ С ОЦЕНКОЙ ИХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ МОРФОЛОГИЧЕСКОЙ РЕКОНСТРУКЦИИ БИНАРНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Иванов К.О.

Поволжский государственный технологический университет, Йошкар-Ола

Аннотация

В статье предложен метод заполнения отверстий при морфологической реконструкции бинарных изображений. Подход основан на комбинации методов контурного анализа и морфологической обработки изображений. Для оценки параметров отверстий на бинарном изображении формируется их аналитическое описание в виде контуров. Далее оцениваются параметры прослеженных контуров, а именно площадь или длина, на основании которых принимается решение о заливке области, ограниченной контуром отверстия.

Ключевые слова: прослеживание контуров, заливка, заполнение отверстий, морфологическая реконструкция, обработка изображений.

Введение

В представленной работе осуществляется анализ бинарных по яркости изображений, в которых яркость пикселей фона равна 0, яркость объектов изображения – 1. Под отверстиями будем понимать малоразмерные области, которые состоят из фоновых пикселей и находятся внутри объектов изображения. Отверстия часто возникают в изображениях, полученных в результате цветовой сегментации либо после пороговой обработки. При этом, кроме визуального улучшения качества изображений, операция заполнения отверстий полезна при построении скелета (остова) изображения. Если изображение объекта будет содержать отверстия, то его остов будет разделён на несколько линий вблизи отверстия (рис. 1), что не соответствует действительности и только затрудняет дальнейший анализ изображения, особенно при прослеживании контуров.

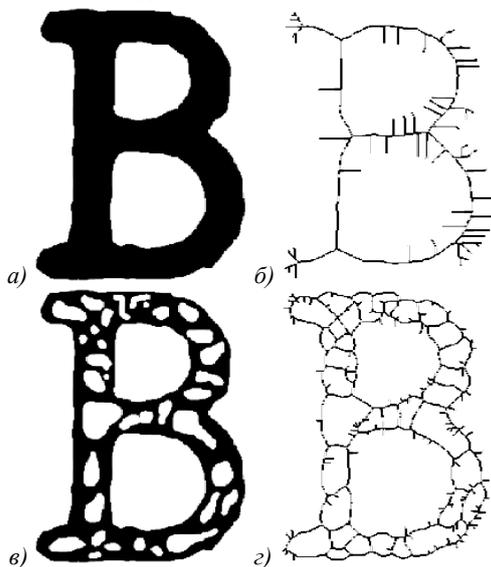


Рис. 1. Примеры нахождения скелетов изображений: (а–б) бинарное изображение без отверстий и его скелет; (в–з) бинарное изображение с отверстиями и его скелет

Кроме того, операция заполнения отверстий позволяет исключить ошибки при выделении граничных точек объекта бинарного изображения. Прикладные программы, в частности MATLAB Image Processing Toolbox, снабжены функциями заполнения отвер-

стий в бинарном изображении. Однако вследствие того, что заполнение осуществляется при помощи классического алгоритма [1], зачастую заполняются фоновые области, которые отверстиями не являются. В работе представлен алгоритм для заполнения отверстий, работа которого основана на комбинации методов контурного анализа и морфологической обработки изображений. На начальном этапе выделяются граничные точки объектов и осуществляется прослеживание контуров на граничном изображении. Под контуром будем понимать границу объекта изображения – совокупность точек (пикселей), отделяющих объект от фона, а также некоторое аналитическое описание последовательности граничных точек объекта изображения. В системах технического зрения применяется несколько способов кодирования контура – наиболее известны полигональное кодирование, код Фримена, Р-представление, комплекснозначный код. В представленной работе контур кодируется полярным кодом [2]. На изображении $A(m_1, m_1)$ выбирается полюс – начало отсчёта (точка P), который совмещается с началом собственной системы координат изображения – верхний левый угол изображения A . Центры граничных точек объекта изображения соединяются с точкой P . В результате получается последовательность радиус-векторов $\beta(n)$, однозначно задающих контур изображения (рис. 2).

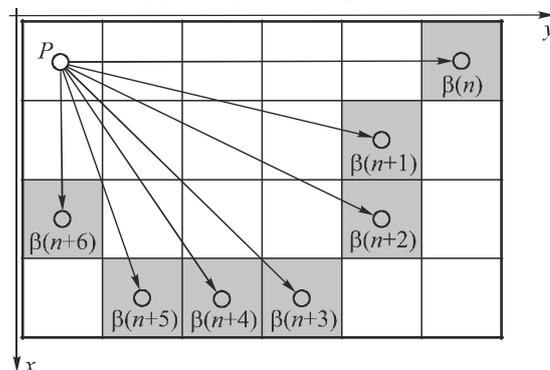


Рис. 2. Пример задания фрагмента контура полярным кодом: $\mathbf{V} = \{ \dots; 5; 4 + i; 4 + 2i; 3 + 3i; 3 + 3i; 1 + 3i; 2i; \dots \}$

Радиус-вектор $\beta(n) = \beta_0(n) + i\beta_1(n)$ является комплексным числом, действительная часть которого

равна координате граничной точки изображения по оси абсцисс, мнимая часть – координате граничной точки изображения по оси ординат в соответствии с выбранным направлением осей.

После формирования аналитического описания контуров осуществляется оценка их параметров, а именно площади или длины. Если требуемый параметр оказывается больше определённого порога, то данный контур удаляется из памяти ЭВМ, в результате чего в памяти остаются лишь контуры замкнутых малоразмерных областей изображения, которые, вероятно, являются отверстиями.

На следующем этапе строится маска изображения [1] в виде последовательности граничных точек объектов, полученных в результате прослеживания контуров. Далее формируется маркерное изображение из внутренних точек объектов маски изображения. После того, как маска и маркер изображения найдены, выполняется морфологическая реконструкция изображения, т.е. заполняются области, ограниченные граничными точками объектов на маске изображения. На завершающем этапе осуществляется объединение результата морфологической реконструкции с исходным изображением при помощи операции логического «ИЛИ».

В статье представлено формульно-словесное описание алгоритма без привязки к какому-либо языку программирования. Кроме того, уделяется внимание методам прослеживания контуров, поиска внутренних точек изолированной области изображения, вкратце рассматриваются классические методы морфологической обработки изображений – выделение граничных точек и заливка областей.

В общем случае в системах компьютерного зрения пикселю с единичным значением яркости соответствует белый цвет, с нулевым – чёрный. В представленной работе все изображения инвертированы для удобства восприятия, точки с единичным значением выделены серым цветом, точки с нулевым значением яркости имеют белый цвет.

Получение граничных изображений и прослеживание контуров объектов

Обозначим через A исходное бинарное изображение, в котором необходимо заполнить отверстия. Для выделения граничных восьмисвязных точек бинарного изображения из него вычитается результат его эрозии со структурообразующим элементом C (рис. 3б) [2]:

$$B = A \setminus (A \ominus C), \tag{1}$$

где знак \ominus обозначает эрозию изображения A со структурообразующим элементом C . На рис. 3 приведены основные шаги процедуры выделения граничных точек изображения.

После получения граничного изображения можно перейти к процедуре прослеживания контуров. Пусть на обрабатываемом изображении всего имеется L объектов. Граничные точки каждого l -го

($l \in [0, L-1]$) объекта изображения образуют множество $a_l = \{a_l(n), n = 0, 1, N-1\}$, где N – длина контура l -го объекта изображения (рис. 4).

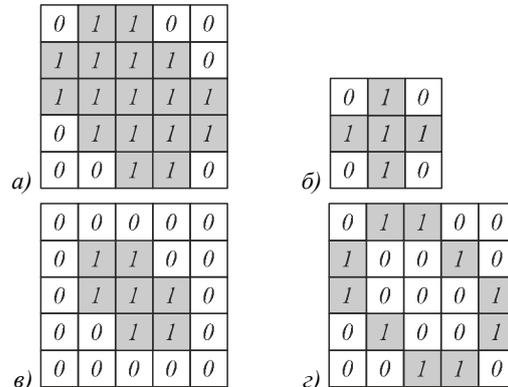


Рис. 3. Выделение граничных точек изображения: а) исходное изображение A' ; б) структурообразующий элемент C ; в) результат эрозии изображения A' структурообразующим элементом C ; г) результат выделения граничных точек изображения A' (вычитание из A' результата эрозии)

Множество соседних с точкой $a_l(n)$ пикселов изображения обозначим через $c_{l,n} = \{c_{l,n}(k), k = 0, 1, \dots, 7\}$ (рис. 5). Например, если некоторая граничная точка $a_l(n)$ объекта изображения B имеет координаты (x, y) , то множество её соседних пикселов определяется как:

$$c_{l,n} = \{B(x, y+1); B(x+1, y+1); B(x+1, y); B(x+1, y-1); B(x, y-1); B(x-1, y-1); B(x-1, y); B(x-1, y+1)\}.$$

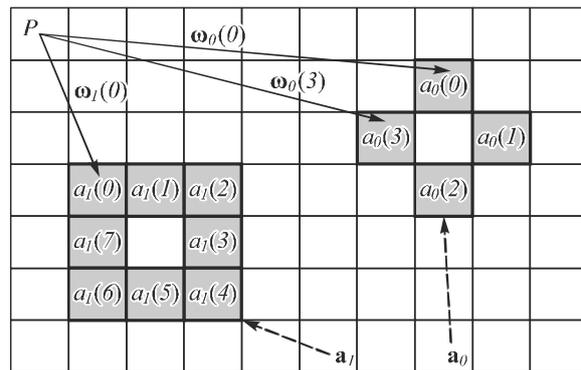


Рис. 4. Пример двух множеств граничных точек a_0 и a_1 , а также два радиус-вектора контура ω_0 : $\omega_0(0)$, $\omega_0(3)$ и один радиус-вектор контура ω_1 : $\omega_1(0)$

Отметим, что ось x в собственной системе координат изображения направлена вниз от начала координат, а ось y – вправо от начала координат. Последовательность радиус-векторов, задающих контур l -го объекта изображения в полярном коде, обозначим через

$\omega_l = \{\omega_l(n), n = 0, 1, \dots, N-1\}$, где $\omega_l(n)$ – радиус-вектор, соединяющий начало координат изображения с граничной точкой $a_l(n)$ l -го объекта (рис. 4).

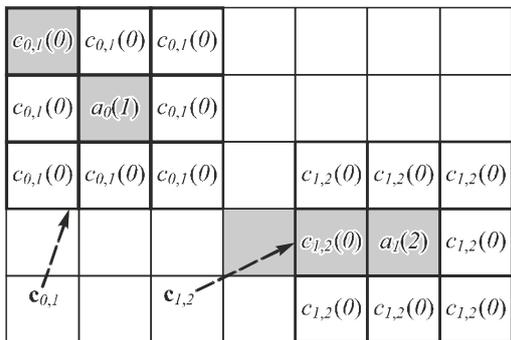


Рис. 5. Пример двух множеств соседних пикселей $c_{0,1}$ и $c_{1,2}$ с граничными точками $a_0(1)$ и $a_1(2)$ разных контуров

Для формирования аналитического описания границ объектов в виде их контуров в полярном коде прямоугольная матрица отсчётов граничного изображения (изображение B) сканируется в формате построчной развёртки [4]. В случае, если найдена граничная точка изображения (яркость пиксела равна единице), она принимается за нулевую граничную точку нулевого объекта изображения – $a_0(0)$, сканирование останавливается, координаты найденной точки $a_0(0)$ по оси абсцисс и ординат записываются в память ЭВМ как действительная и мнимая части вектора $\omega_0(0)$, точке $a_0(0)$ присваивается нулевое значение яркости, что соответствует яркости фоновых пикселей изображения. Следует отметить, что множества a_l и $c_{l,n}$ являются подмножествами изображения B , поэтому изменения значений элементов этих подмножеств влечёт за собой изменения соответствующих элементов в изображении B . Далее запускается рекурсивная процедура прослеживания контура объекта изображения. Осуществляется циклический осмотр множества соседних пикселей $c_{0,0}$ с точкой $a_0(0)$, начиная с нулевого элемента, и при условии, что элемент $c_{0,0}(k)$ множества $c_{0,0}$ является граничной точкой изображения (яркость пиксела равна единице), процедура осмотра останавливается, координаты текущего пиксела $c_{0,0}(k)$ по оси абсцисс и оси ординат записываются в память ЭВМ как реальная и мнимая часть вектора $\omega_0(1)$ соответственно. Найденной точке $c_{0,0}(k)$ присваивается нулевое значение яркости, чтобы исключить ситуацию бесконечного закливания процедуры прослеживания контура. Для поиска последующих радиус-векторов $\omega_0(n+1|n \geq 1)$, кодирующих объект изображения, рекурсивная процедура повторяется, за исключением того, что начало осмотра множества $c_{0,n}$ выбирается по правилу:

$$start = (k' + 5) \bmod 8, \tag{2}$$

где k' – порядковый номер точки $a_0(n)$ во множестве $c_{0,n-1}$, что позволяет обеспечить минимальное количество просматриваемых пикселей при прослеживании контура объекта изображения со случайной формой [5], тем самым увеличить быстродействие алгоритма. Сигналом к остановке процедуры прослеживания контура l -го объекта служит отсутствие граничных точек во множестве $c_{l,n}$. По окончании процедуры прослеживания контура объекта продолжается сканирование граничного изображения B в формате построчной развёртки с места предыдущей остановки. В случае, если найдена некоторая граничная точка, снова запускается процедура прослеживания контура объекта изображения. Как видно из рис. 5, элементы множества $c_{l,n}$ строго пронумерованы. При поиске граничных точек в множестве $c_{l,n}$ соседние с a_n пиксели просматриваются в направлении по часовой стрелке, что обеспечивает последовательный поиск граничных точек объекта изображения, прослеживание контура осуществляется в одном направлении (по часовой стрелки) без пропуска каких-либо граничных пикселей. На рис. 6. изображено несколько итераций процедуры прослеживания контура на изображении.

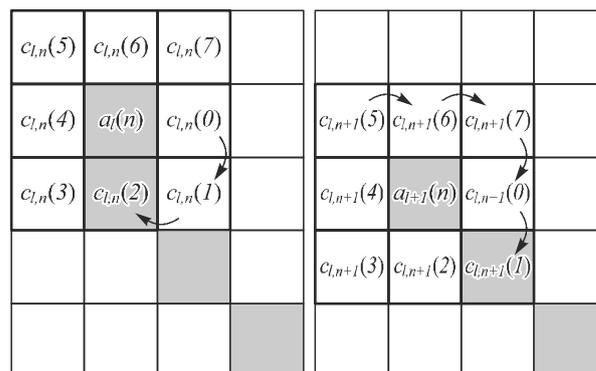


Рис. 6. Две итерации процедуры прослеживания контуров на граничном изображении

Если длина контура объекта превышает некоторое пороговое значение, то он стирается из памяти ЭВМ, кроме того, имеется возможность оценить площадь прослеженного контура по формуле:

$$S(\omega_l) = \left| \frac{1}{2} \sum_{n=0}^{N-1} \left((\text{Re}(\omega_l(n+1)) - \text{Re}(\omega_l(n))) \times \right. \right. \tag{3}$$

$$\left. \left. \times (\text{Im}(\omega_l(n)) + \text{Im}(\omega_l(n+1))) \right) \right|,$$

где N – длина прослеженного контура, а $\omega_l(N) = \omega_l(0)$. Если вычисленное значение площади больше порога, заданного пользователем, то данный контур не принимается во внимание. Разомкнутые контура также удаляются из памяти ЭВМ.

Формирование маски и маркерного изображения, заполнение отверстий

Для морфологической реконструкции необходимо сформировать два изображения – маску и маркер.

Маркер является исходной точкой преобразования, маска накладывает определённые ограничения на эти преобразования [1]. Обозначим маску изображения через H . Маска формируется из набора прослеженных на предыдущем шаге контуров и извлекает некоторые связанные компоненты изображения A . Следует отметить, что контура, обладающие большой площадью или длиной, были удалены из памяти, таким образом, маска представляет собой изображение граничных точек отверстий и малоразмерных объектов исходного изображения A .

С помощью маркера отмечаются связанные компоненты маски H [6]. Маркер представляет собой изображение некоторых точек, которые лежат внутри областей, ограниченных граничными точками изображения H (рис. 7).

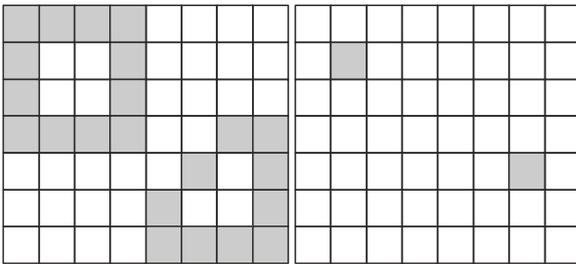


Рис. 7. Маска и маркер изображения

Обозначим маркерное изображение, взятое в том же масштабе, что и маска H , через G . Изначально значения яркостей всех пикселей маркерного изображения установлены в ноль. Для поиска координат внутренних точек контуров маски изображения создаётся массив изображений $E = \{E_l, l = 0, 1, \dots, L - 1\}$. Каждый элемент массива – изображение $E_l(x, y)$, $x \in [\min(\text{Im}(\omega_l)), \max(\text{Im}(\omega_l))]$, $y \in [\min(\text{Re}(\omega_l)), \max(\text{Re}(\omega_l))]$ представляет собой изображение граничных точек контура ω_l (рис. 8).

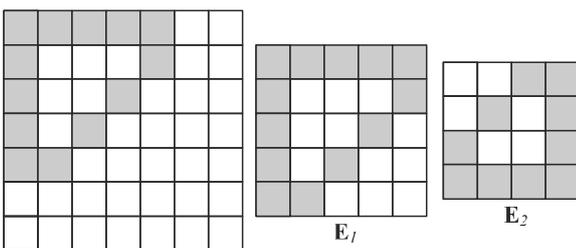


Рис. 8. Участок изображения маски и пример двух изображений массива E : E_1 и E_2

Изображение E_l имеет минимальный размер, при котором оно способно полностью включить область, которую занимает контур ω_l на плоскости, а индексация пикселей по оси абсцисс и ординат начинается с минимальных значений действительных и мнимых частей контура ω_l соответственно, т.е. самый верхний левый пиксел изображения E_l имеет координаты

$(\min(\text{Im}(\omega_l)), \min(\text{Re}(\omega_l)))$. При этом самый правый нижний пиксел изображения E_l будет иметь координаты $(\max(\text{Im}(\omega_l)), \max(\text{Re}(\omega_l)))$. Изменение индексации позволяет совместить системы координат изображения E_l с маркерным изображением G .

Так, если на каком-либо изображении E_l точка, лежащая внутри контура, будет иметь координаты (x_1, y_1) , то и на изображении G она будет иметь такие же координаты. Далее для поиска координат внутренних точек замкнутых контуров каждое изображение E_l подвергается линейной фильтрации

$$P(x, y) = \sum_{i=0}^1 \sum_{j=0}^1 E_l(x-1+i, y-1+j) \Omega(i, j),$$

$$x \in [\min(\text{Im}(\omega_l)) + 1, \max(\text{Im}(\omega_l))],$$

$$y \in [\min(\text{Re}(\omega_l)) + 1, \max(\text{Re}(\omega_l))]$$

с окном

$$\Omega = \begin{bmatrix} 1 & 4 \\ 2 & 8 \end{bmatrix}.$$

Если на выходе фильтра значение $P(x, y)$ равно 6 или 7, то процедура фильтрации останавливается, а пикселу с координатами (x, y) на маркерном изображении G присваивается единичное значение яркости.

После нахождения маски и маркера изображения можно перейти непосредственно к морфологической реконструкции. Для этого используется следующая рекурсивная процедура:

$$X_k = (X_{k-1} \oplus C) \cap H^c,$$

где знак \oplus обозначает дилатацию, $X_0 = G$, H^c – дополнение множества H [1]. Процедура продолжается до тех пор, пока количество точек с ненулевым значением яркости в изображении X_k будет постоянным.

На завершающем этапе процедуры заполнения отверстий осуществляется объединение результата морфологической реконструкции X_k с исходным изображением при помощи операции логического «ИЛИ»:

$$R = A \cup X_k.$$

Рис. 9. демонстрирует основные шаги представленной процедуры заполнения отверстий.

На рис. 10а приведён реальный пример бинарного изображения с отверстиями, полученного в результате цветовой сегментации сканированного изображения ЭЭГ. На рис. 10б результат заполнения отверстий при помощи функции “imfill” пакета MATLAB Image Processing Toolbox. Из рис. 10б видно, что при использовании стандартной процедуры заполнения отверстий закрашиваются фоновые пиксели изображения, отверстиями не являющиеся, в результате чего происходит значительная потеря информации о форме объектов на обрабатываемом изображении.

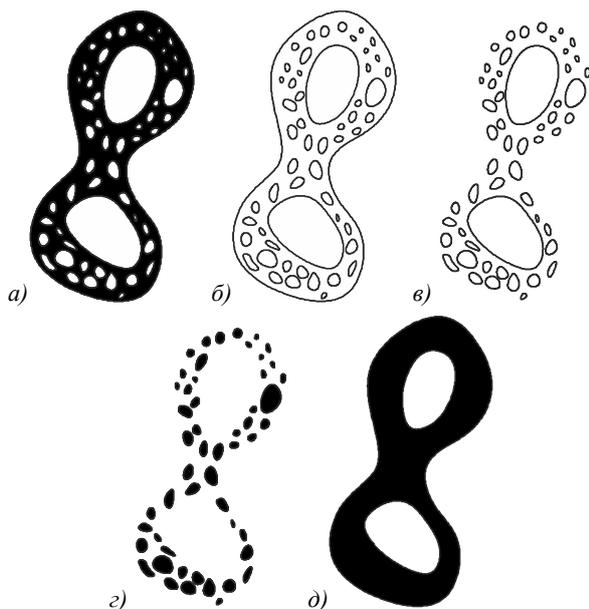


Рис. 9. Основные этапы обработки бинарного изображения: а) исходное бинарное изображение, в котором необходимо заполнить отверстия; б) результат выделения граничных точек; в) маска изображения, сформированная из контуров отверстий и малоразмерных объектов; г) результат морфологической реконструкции; д) результат объединения исходного изображения с результатом его морфологической реконструкции

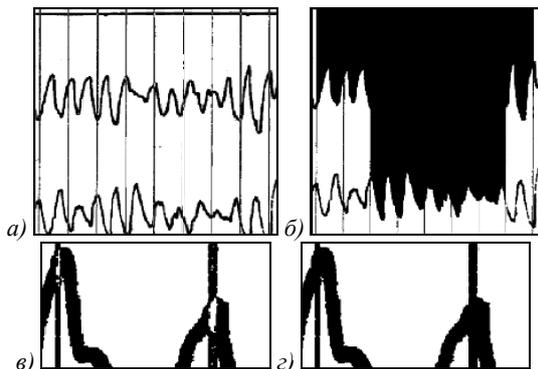


Рис. 10. Заполнение отверстий при морфологической реконструкции (изображения инвертированы для удобства восприятия): а) реальное изображение с отверстиями, полученное в результате цветовой сегментации сканированной ЭЭГ; б) результат заполнения отверстий при помощи классического алгоритма; в) увеличенный участок исходного изображения; г) результат заполнения отверстий на изображении при помощи предложенного алгоритма

На рис. 10в изображён увеличенный участок исходного бинарного изображения, на рис. 10г – результат заполнения отверстий в исходном изображении при помощи предложенного алгоритма. Из рис. 10г видно, что оценка геометрических параметров замкнутых контуров отверстий, в частности площади и длины, позволяет избирательно заливать области изображения, изолированные данными контурами, в результате чего остаются без изменения фоновые области, которые окружены объектами изображения, но при этом отверстиями не являются.

Заключение

В работе рассмотрен подход к заполнению отверстий при морфологической реконструкции бинарных изображений, основанный на комбинации методов контурного анализа и математической морфологии.

Рассмотрены процедуры прослеживания контуров, оценки их параметров и поиска внутренних точек. Практическая ценность предложенного алгоритма заключается прежде всего в его предварительном использовании при нахождении скелета изображения. Путём оценки параметров контуров отверстий в большинстве случаев исключается ситуация заполнения фоновых областей изображения, не являющихся отверстиями. Предварительное использование предложенного алгоритма позволяет получить скелет (остов) изображения с наибольшим сохранением информации о его форме.

Литература

1. Гонсалес, Р.С. Цифровая обработка изображений в среде MATLAB / Р.С. Гонсалес, Р.Е. Вудс, С.Л. Эддинс – М.: Техносфера, 2006. – 616 с.
2. Балабаш, Ю.Л. Вопросы статистической теории распознавания / Ю.Л. Балабаш, Б.В. Варский, В.Т. Зиновьев [и др.]. – М.: Советское радио, 1977.
3. Огнев, И.В. Обработка изображений методами математической морфологии в ассоциативной осцилляторной среде / И.В. Огнев, Н.А. Сидорова // Известия ВУЗов. Поволжский регион. Технические науки. – 2007. – № 4. – С. 87-97.
4. Методы компьютерной обработки изображений / М.В. Гашников, Н.И. Глумов, Н.Ю. Ильясова, В.В. Мясников, С.Б. Попов, В.В. Сергеев, В.А. Соيفер, А.Г. Храмов, А.В. Чернов, В.М. Чернов, М.А. Чичёва, В.А. Фурсов; под ред. В.А. Соифера. – 2-е изд., испр. – М.: Физматлит, 2003. – 784 с.
5. Фурман, Я.А. Введение в контурный анализ и его приложения к обработке изображений и сигналов / Я.А. Фурман, А.В. Кревецкий, А.К. Передреев, А.А. Роженцов, Р.Г. Хафизов, И.Л. Егошина, А.Н. Леухин. – М.: Физматлит, 2002. – 592 с. – ISBN 5-9221-0255-9.
6. Федотов, Н.Г. Предварительная обработка изображений ультразвуковых исследований в системах медицинской диагностики / Н.Г. Федотов, Л.А. Шульга, О.А. Смолькин, Д.А. Курынов, А.С. Кольчугин, С.В. Романов // Труды международного симпозиума надежность и качество. 2006. URL: <http://cyberleninka.ru/article/n/predvaritelnaya-obrabotka-izobrazheniy-ultrazvukovyh-issledovaniy-v-sistemah-meditsinskoy-diagnosticski>.

References

1. Gonzales, R. C. Digital image processing using MATLAB / R.C. Gonzales, R.E. Woods, S.L. Eddins. – Moscow: "Technosphere" Publisher, 2006. – 616 p. – (In Russian).
2. Balabash, Ju.L. Problems in statistical pattern recognition theory / Ju.L. Balabash, B.V. Varskij, V.T. Zinoviev [et al.] – M.: "Sovetskoye Radio" Publisher, 1977. – (In Russian).
3. Ognev, I.V., Image processing by using the methods of mathematical morphology in oscillatory associative environment / I.V. Ognev, N.A. Sidorova // Proceedings of the Higher Educational Institutions. Volga region. Engineering. – 2007. – N 4. – P. 87-97. – (In Russian).
4. Methods for computer image processing / M.V. Gashnikov, N.I. Glumov, N.Yu. Ilyasova, V.V. Myasnikov, S.B. Popov, V.V. Sergeev, V.A. Soifer, A.G. Khramov, A.V. Chernov,

- V.M. Chernov, M.A. Chicheva, V.A. Fursov; ed. by V.A. Soifer. – 2nd ed., revised. – Moscow: "Fizmatlit" Publisher, 2003. – 784 p. – (In Russian).
5. Contour analysis introduction and its image and signal processing application / ed. by Ya.A. Furman. – Moscow: "Fizmatlit" Publisher, 2002. – 592 p. – (In Russian).
6. **Fedotov, N.G.** Provisional image processing of ultrasound research for medical diagnostics / N.G. Fedotov, L.A. Shulga, O.A. Smolkin [et al.] // Proceedings of International Symposium "Reliability & Quality", 2006. – URL: <http://cyberleninka.ru/article/n/predvaritelnaya-obrabotka-izobrazheniy-ultrazvukovyh-issledovaniy-v-sistemah-meditsinskoj-diagnostiki>. – (In Russian).

A HOLE-FILLING ALGORITHM WITH PARAMETER ESTIMATION FOR MORPHOLOGICAL RECONSTRUCTION OF BINARY IMAGES

K.O. Ivanov

Volga State University of Technology

Abstract

A new hole-filling method for morphological image reconstruction is proposed in this article. The approach is based on a combination of methods of contour analysis and morphological image processing. For the hole parameters to be estimated, they are described analytically as contours. Then, parameters of the contours, namely the area or the length, are estimated, followed by the decision as to the filling of the contour-bounded hole.

Keywords: tracing of contours, filling, hole-filling, morphological reconstruction, image processing.

Сведения об авторе

Иванов Константин Олегович, 1989 года рождения, в 2012 году окончил Поволжский государственный технологический университет по специальности 200402 «Инженерное дело в медико-биологической практике». Является аспирантом Поволжского государственного технологического университета по специальности 05.11.17 «Приборы, системы и изделия медицинского назначения». Область научных интересов: цифровая обработка сигналов и изображений, распознавание образов.

E-mail: konstantin4002000@gmail.com.

Konstantin Olegovich Ivanov (b. 1989) graduated from Volga State University of Technology in 2012, majoring in Engineering in Biomedical Practice, postgraduate of Devices, Systems and Medical Products. Research interests are digital image processing, signal processing, and pattern recognition.

*Поступила в редакцию 27 мая 2014 г.
Окончательный вариант – 26 марта 2015 г.*