

**ПОКАЗАТЕЛИ АДЕКВАТНОСТИ СЕГМЕНТАЦИИ ГРАНИЦ**

д.ф.-м.н., проф. С.В. Смеляков, С.В. Серов, К.С. Смеляков

*Рассматриваются показатели точности, адекватности и полноты сегментации граничных узлов для некорректно поставленных задач сегментации изображений, которые используются для регуляризации методов сегментации изображений нерегулярного вида по контрастности.*

**Введение.** Задача автоматизации распознавания объектов по их цифровым изображениям актуальна для широкого спектра приложений, простирающихся от поиска месторождений полезных ископаемых и экологического анализа регионов [1, 2] по аэрофотоснимкам до анализа микробиологических объектов: эмбрионов [3], хромосом [4] и др. При этом наиболее эффективный подход к сегментации изображений основан на выделении их границ [5 – 7].

В настоящее время качество сегментации определяется, как правило, уровнем частичной сегментации, т.е. числом несегментированных узлов; например, длиной отрезка между фрагментами границы [8]. Однако, ввиду априорной неопределенности образа объекта, использование подобных характеристик для оценивания эффективности сегментации некорректно. Тем более в условиях использования для этих целей эвристических методов, применение которых не обеспечивает согласованности моделей и методов сегментации, аппроксимации и идентификации по точности и иным дифференциальным и интегральным параметрам.

Основная причина возникновения этих проблем определяется тем, что задачи сегментации изображений по своей природе являются некорректно поставленными [9], что чаще всего игнорируется при разработке методов их решения. В результате не обеспечивается не только устойчивость результатов сегментации, но и оценка качества результатов. Поэтому для регуляризации алгоритмов сегментации актуальной задачей является разработка критериев точности, полноты и адекватности сегментации границ изображений и методов их оценивания, решению которой и посвящена данная работа.

**Показатель адекватности сегментации.** Входное изображение задается множеством узлов  $D$  на плоской решетке  $R$  [10]. Пусть  $L$  – кривая на плоскости, определяющая границу некоторого объекта, а ее

образ на  $R$  задается 8-связной [11] последовательностью узлов  $\{\ell_i\}_{i=1,n}$ , определяющей линию  $\ell$ . Пусть  $\varepsilon \geq 1$  – достаточно малая величина по отношению к радиусу кривизны линии  $L$ , определяющая точность сегментации; тогда  $\varepsilon$ -окрестность линии  $\ell$  в  $D$ , т.е. область  $V_\varepsilon$ , которую назовем *границей  $\varepsilon$ -полосой*, образует кольцо, т.е. может быть представлена разностью двух дисков с границами  $\alpha$  и  $\beta$  (рис. 1, а).

Пусть при сегментации границы  $\ell$  получено  $n_s$  узлов; разобьем их на два множества  $\{f_\eta\}_{\eta=1,n_f}$  и  $t^* = \{t_\xi\}_{\xi=1,n_\varepsilon}$ , где  $f_\eta \notin V_\varepsilon$ ,  $t_\xi \in V_\varepsilon$ ; назовем входящие в них узлы *ложно* и *адекватно сегментированными*, (рис. 1, б).

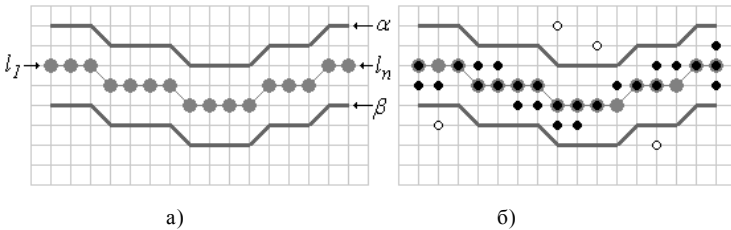


Рис. 1. Распределение сегментированных узлов относительно полосы  $V_\varepsilon$ :

- – узлы границы  $\ell$ ;
- – границы области  $V_\varepsilon$ ;
- – адекватно сегментированные узлы;
- – ложно сегментированные узлы.

Тогда показатель *ложной сегментации* определяется коэффициентом

$$k_F = (n_s - n_\varepsilon) / n_s, \quad k_F \in [0, 1]. \quad (1)$$

Поскольку при  $k_F = 0$  ( $k_F = 1$ ) ложно (адекватно, т.е. в полосе  $V_\varepsilon$ ) сегментированные узлы отсутствуют, при достаточно больших значениях  $n_s$  величину (1) можно рассматривать как *вероятность ложной сегментации*. Соответственно, в качестве показателя *адекватности сегментации* рассмотрим коэффициент

$$k_T = n_\varepsilon / n_s, \quad k_T \in [0, 1], \quad (2)$$

который определяет вероятность дополнительного к (1) события.

**Построение с-инъекции для замкнутой кривой  $\ell$ .** Сегментация приводит к получению полосы узлов  $V_\varepsilon$ , а не линии, что порождает избыточность сегментированных узлов по отношению к числу узлов, определяющих границу  $\ell$ . При этом действие шумов может приводить к деформации положения границы и нарушению ее связности. Поскольку установление биекции между адекватно сегментированными узлами полосы  $V_\varepsilon$  и границей  $\ell$  в общем случае невозможно, задача состоит в построении устойчивой инъекции

$t^{**} = \text{in}(\ell \rightarrow t^*)$ , т.е. отображения узлов  $\{\ell_i\}_{i=1,n}$  в  $\{t_\xi\}_{\xi=1,n_\varepsilon}$ , где различным узлам границы соответствуют различные адекватно сегментированные узлы. При этом устойчивость инъекции означает сохранение связности образа  $t^{**}$  при малых вариациях множества  $t^*$ , которая является аналогом непрерывности прообраза – объекта  $L$  и его образа  $\ell$ ; для краткости, назовем ее  $s$ -инъекцией. Для ее построения предлагается следующий алгоритм.

**Алгоритм 1. Шаг 1.** Задаем начальные значения параметров:  $i := 1$  – номер узла границы  $\ell$ , для которого ищем отображение в  $t^*$ ;  $I := 0$  – число отображенных узлов границы;  $r := 0$  – номер фрагмента;  $T^* = \emptyset$  – искомое множество узлов;  $s := 0$  – индекс для узлов, вносимых во фрагмент  $T^{(r)}$ .

**Шаг 2.** Последовательный просмотр узлов, составляющих линию  $\ell$ .

Если  $s = 0$ , ищем в  $\varepsilon$ -окрестности узла  $\ell_i$  узел  $t_\xi \in t^*$ , ближайший к  $\ell_i$  и не совпадающий с  $\ell_{i+1}$ . Если такой узел существует, полагаем  $r := r + 1$ ,  $t^* := t^* \setminus t_\xi$ ,  $s := s + 1$ , заносим  $t_\xi$  в  $T^{(r)}$  с номером  $s$  и полагаем  $I := I + 1$ , т.е. считаем узел  $\ell_i$  отображенным. Переходим к шагу 3.

Если  $s > 0$ , ищем в  $\varepsilon$ -окрестности узла  $\ell_i$  узел  $t_\xi \in t^*$ , ближайший к  $\ell_i$ , не совпадающий с  $\ell_{i+1}$  и 8-связный с узлом  $t_s$ . Если такой узел существует, полагаем  $t^* := t^* \setminus t_\xi$ ,  $s := s + 1$ , заносим узел  $t_\xi$  в  $T^{(r)}$  с номером  $s$  и полагаем  $I := I + 1$ , т.е. считаем узел  $\ell_i$  отображенным; иначе полагаем  $n_j := s$  (конец фрагмента),  $s := 0$ .

**Шаг 3.** Полагаем  $i := i + 1$ . Если  $i < n$ , переход на 2, иначе – к шагу 4.

**Шаг 4.** При  $i = n$  выполняем шаг 2, где в качестве узла  $\ell_{i+1}$  рассматривается  $\ell_1$  и требуется, чтобы узел  $t_\xi$  был 8-связен с  $t_1 \in T^{(1)}$ ; по завершению, переход к шагу 5.

**Шаг 5.** Конец.

В случае  $I = n$ , инъекция  $t^{**}$  построена и определяется узлами, входящими в последовательность 8-связных фрагментов  $\{T^{(j)}\}_{j=1,\Gamma}$ , каждый из которых состоит из  $n_j$  узлов,  $n_c = \sum_j n_j$ . В оптимальном случае, при  $\Gamma = 1$ ,  $T^{(1)}$  определяет искомую  $s$ -инъекцию – 8-связную линию, принимаемую за образ границы. При  $\Gamma > 1$  разбиение образа на фрагменты вызвано отсутствием 8-связности; например, конечного узла  $t_j$  фрагмента

$T^{(j)}$  и начального узла  $t_{j+1}$  фрагмента  $T^{(j+1)}$ .

Разрыв между фрагментами  $T^{(j)}$  и  $T^{(j+1)}$  считаем допустимым, если расстояние между соответствующими узлами  $t_j, t_{j+1}$  мало, и рассматриваем его как локальный – в противном случае. Именно, считаем разрыв  $\varepsilon$ -устранимым, если в заданной метрике  $\rho$  длина  $\ell(\ell_\xi, \ell_\eta)$  фрагмента между узлами  $\ell_\xi, \ell_\eta$  и расстояние  $\rho(t_j, t_{j+1})$  между их образами  $t_j, t_{j+1}$  удовлетворяют неравенству

$$\max \{ \ell(\ell_\xi, \ell_\eta), \rho(t_j, t_{j+1}) \} \leq \varepsilon. \quad (3)$$

При этом для построения  $\varepsilon$ -полосы и оценивания  $\varepsilon$ -устранимых разрывов (3) удобно воспользоваться следующей метрикой [12], адекватно отражающей свойства 8-связности в целых числах

$$\rho_0(d_{ij}, d_{\xi\eta}) = \max \{ |i - \xi|, |j - \eta| \}. \quad (4)$$

В случае  $I < n$  инъекция отсутствует, поскольку имеются узлы границы,  $\varepsilon$ -окрестность которых не содержит соответствующих им сегментированных узлов. Эти разрывы назовем региональными.

Причина возникновения локальных и региональных разрывов различна. Первые вызваны вариациями контрастности и шумами в малой окрестности узлов, а вторые – функциональными особенностями подобластей изображения. Поэтому и для устранения разрывов различных типов предлагается рассматривать различные подходы. Так, если региональный разрыв возникает в  $\varepsilon$ -окрестности граничного узла  $\ell_i$ , ситуацию можно уподобить  $\varepsilon$ -устранимому разрыву, относя узел  $\ell_i$  к числу отображенных; с целью исключения таких разрывов предлагается следующий алгоритм.

**Алгоритм 2.** Перебираем концы  $t_j, t_{j+1}$  фрагментов  $T^{(j)}, T^{(j+1)}$ ,  $j=1, \dots, r$ . Если для них выполняется условие (3), объединяем фрагменты в один, дополняя их узлами, лежащими на отрезке  $t_j, t_{j+1}$ .

При наличии устраняемых разрывов применение алгоритма 2 приводит к сокращению числа фрагментов до  $r'$  и увеличению числа граничных узлов, для которых построена инъекция, с  $n_c$  до  $\ell'_c$ . Однако, пополнение фрагментов несегментированными узлами может привести к тому, что число узлов  $n'_c$ , составляющих образы  $r'$  фрагментов границы, отличается от  $\ell'_c$ . Тогда  $n - \ell'_c$  определяет число узлов границы, для которых не получена сегментация, а  $(n - \ell'_c)/r'$  – среднюю длину несегментированных фрагментов.

**Показатели полноты, устойчивости и избыточности.** В случае

высокой устойчивости сегментации (7), при значимом покрытии границы (6) отличим  $\ell'_c$  от  $n'_c$  можно пренебречь, полагая  $n_c = n'_c = \ell'_c$ . В результате применения алгоритмов 1, 2, величина  $I$  характеризует *полноту* сегментации в смысле *наличия инъекции*. В случае отсутствия инъекции ( $I < n$ ), в качестве показателя неполноты сегментации рассмотрим число региональных разрывов  $r_{\text{reg}} \leq r'$ .

В качестве интегральных показателей адекватности сегментации введем коэффициенты *полноты сегментации в смысле числа компонент связности и меры покрытия границы*:

$$k_r = 1/r, \quad k_r \in (0, 1]; \quad (5)$$

$$k_p = n_c/n, \quad k_p \in (0, 1]. \quad (6)$$

При выделении всей границы по алгоритму 1, показатель  $k_r$  обращается в 1 и имеет достаточно малое значение, когда число выделенных по этому алгоритму компонент велико; в этом смысле и этот коэффициент (5) можно интерпретировать как вероятность *полноты сегментации границы*. Аналогично, показатель  $k_p$  (6), при  $r=1$ , обращается в 1 для цепочек, полученных по алгоритму 1, и близок к 1 в случае применения алгоритма 2. Если число несегментированных узлов растет, коэффициент  $k_p$  может уменьшаться до 0; этот показатель можно рассматривать как вероятность *сегментации узла границы*.

Для оценивания чувствительности результатов к вариациям контрастности, введем коэффициент *устойчивости сегментации*

$$K_r = r'/r, \quad K_r \in (0, 1], \quad (7)$$

который равен единице, если устранимые разрывы отсутствуют.

Наконец, *избыточность сегментации* оценим коэффициентом

$$k_{\text{ex}} = (n_\varepsilon - n_c)/n_\varepsilon, \quad k_{\text{ex}} \in [0, 1), \quad (8)$$

который определяет долю адекватно сегментированных узлов, не включенных в образ инъекции границы  $\ell$ . Поскольку в общем случае  $k_{\text{ex}} > 0$ , более наглядным показателем является определяемая им *степень избыточности* (или *кратность*) *сегментации*

$$K_{\text{ex}} = 1/k_{\text{ex}} - 1, \quad K_{\text{ex}} \in [0, 1, 2, \dots], \quad (9)$$

которая определяет, во сколько раз число узлов, незадействованных для описания границы  $\ell$ , превышает число задействованных.

**Заключение.** Использование предложенных показателей адекватности сегментации границ позволяет исключить использование эвристи-

ческих критериев при решении некорректных задач сегментации. На основе их использования предложен базовый алгоритм построения инъекции в условиях использования в качестве регуляризирующего оператора алгоритма 2. При этом единственность решения определяется тем, что все решения считаются эквивалентными в рамках  $\varepsilon$ -полосы  $V_\varepsilon$ , а устойчивость – подбором значений параметров моделей сегментации, на которых максимизируется интегральный показатель  $K_T$ .

## ЛИТЕРАТУРА

1. Rudel T.K., Bates D., Machinguiashi R. *A Tropical Forest Transition* // *Annals of the Association of American geographers*. – 2002. – № 92. – N.1. – P. 87 – 102.
2. Мороженко О.В. *Стан навколосемного простору, екологія Землі, її зв'язок з проблемами озоносфери і зміни клімату* // *Вісник НКАУ*. – 2001. – № 1. – С. 50 – 59.
3. Верескун О.В., Мегель Ю.Е., Путятин В.П. *Моделирование эталонов эмбрионов* // *Проблемы бионики*. – 2002. – № 53. – С. 79 – 86.
4. Ту Дж., Гонсалес Р. *Принципы распознавания образов*. – М.: Мир, 1978. – 411 с.
5. Путятин Е.П., Аверин С.И. *Обработка изображений в робототехнике*. – М.: Машиностроение, 1990. – 320 с.
6. Бобков В.А., Казанский А.В., Морозов М.А. *Выделение размытых контуров на примере определения скорости течений по спутниковым изображениям* // *Автометрия*. – 2001. – № 2. – С. 3 – 12.
7. Бобков В.А., Казанский А.В. и др. *Релаксационно-контурный алгоритм определения векторов морских течений по спутниковым изображениям и его синоптическая верификация*. // *Автометрия*. – 2003. – № 1. – С. 73 – 81.
8. Sonka M., Hlavac V., Boyle R. *Image processing, analysis, and machine vision*. – London, Toronto, Boston: PWS Publ. An International Thomson Publishing Company. – 1990. – 770 p.
9. Бакушинский А.Б., Гончарский А.В. *Некорректные задачи*. – М.: Изд-во Моск. ун-та., 1989. – 199 с.
10. Смеляков К.С., Шубин И.Ю. *Адаптивная маска и условия устойчивости для сегментации граничных элементов изображения* // *Моделирование и информационные технологии*. – К.: ИПМЭ НАН Украины. – 2003. – Вып. 22. – С. 178 – 183.
11. Путятин Е.П., Аверин С.И. *Обработка изображений в робототехнике*. – М.: Машиностроение, 1990. – 320 с.
12. Колмогоров А.Н., Фомин С.В. *Элементы теории функций и функционального анализа*. – М.: Наука, 1972. – 496 с.

Поступила 6.02.2004

**СМЕЛЯКОВ Сергей Вячеславович**, доктор физико-математических наук, профессор, начальник кафедры Харьковского военного университета.

**СЕРОВ Сергей Вадимович**, начальник лаборатории кафедры ХВУ. Область научных интересов – автоматизация распознавания объектов.

**СМЕЛЯКОВ Кирилл Сергеевич**, аспирант кафедры информатики ХНУРЭ. Окончил

*ХНУРЭ в 2001 году. Область научных интересов – автоматизация распознавания объектов.*