

Морфологическая сегментация изображений земной поверхности с использованием стековых деревьев

Юрий Визильтер, Владимир Горбацевич

ФГУП "ГосНИИАС"

{viz,gvs}@gosniias.ru

Аннотация

В данной статье рассматривается техника морфологической сегментации с использованием критериальных морфологических фильтров. При этом предлагается нетривиальный способ представления данных позволяющий использовать при решении этой задачи метод динамического программирования.¹

Keywords: Морфология, сегментация, динамическое программирование, деревья.

1. Введение

Типовой задачей технического зрения, возникающей при реализации функций наведения и навигации летательных аппаратов, является задача взаимной привязки разномоментных и разномасштабных изображений земной поверхности. Для решения этой задачи традиционно используются корреляционные алгоритмы сравнения изображений. Однако на практике такие алгоритмы обладают рядом известных недостатков, наиболее очевидными из которых являются малая устойчивость к изменениям условий регистрации, а также необходимость хранения в бортовых системах больших объемов видеоданных. В связи с этим современный подход к решению данной задачи предполагает осуществление предварительного компактного кодирования изображений с последующим сравнением уже не изображений, в их описаний. Таким образом, необходимым элементом решения задачи привязки изображений оказывается их сегментация с последующей возможностью более или менее точной реконструкции по описанию.

В данной статье рассматривается техника морфологической сегментации изображений с использованием стековых деревьев. При этом в центре внимания оказывается проблема эффективной алгоритмической реализации описанных в [1] проективных критериальных морфологических фильтров вида:

$$\psi_{\alpha}A = \operatorname{argmin}_{B \in \Omega} F_{\alpha}(A, B) \quad (1)$$

При этом минимизируется критерий морфологического риска

$$F_{\alpha}(A, B) = J(A, B) + \alpha \times Q(B), \quad (2)$$

где $A, B \subseteq \Omega$ - дискретные одномерные или двумерные функции (изображения), имеющие конечные области определения и значения, обобщенно называемые также образцами; $J(A, B) \in [0, +\infty)$ - функционал (критерий) соответствия морфологической реконструкции B наблюдаемому образу A ; $Q(B) \in [0, +\infty)$ - функционал (критерий) качества морфологической реконструкции B ; $\alpha \geq 0$ - действительное число, называемое моделирующим параметром.

В работе [2] для проективных морфологических фильтров на базе критериев типа (1)-(2) была описана эффективная алгоритмическая реализация на основе метода динамического программирования. При этом рассматривались как процедуры аппроксимации, так и процедуры интерполяции одномерных функций и двумерных кривых. К сожалению, строгое обобщение метода динамического программирования на случай оптимизации функционалов от функций, имеющих более одного аргумента, сталкивается с серьезными проблемами, поскольку уже координаты точек из R^2 , в отличие от точек R^1 , не являются полностью упорядоченными. По этой причине граф структурных связей между элементами (пикселями) изображения, в отличие от аналогичного графа для элементов одномерных функций, имеет вид не цепи, а решетки, то есть включает множество циклов. Между тем, как известно из теории динамического программирования, этот метод работает только для таких структур, граф структурных связей между элементами которых имеет вид ациклического графа (ACG) или дерева [3]. Таким образом, растровое изображение (прямоугольная решетка пикселей) оказывается неподходящей структурой данных для непосредственного строгого применения методов динамического программирования. Следовательно, необходимо определить такое представление данных в алгоритмах решения задачи (1) методом динамического программирования, которое обеспечивало бы непосредственное и естественное обобщение на двумерный случай.

В данной работе в качестве такого унифицированного представления функций предлагается использовать т.н. стековое представление, идея которого восходит, с одной стороны, к идее бинарных морфологических остовов [4], а с другой - к стековому представлению (threshold decomposition) полутоновых изображений [5].

2. Описание одномерных и двумерных данных при помощи деревьев срезовых сегментов

Пусть дана одномерная дискретная функция $f(x) \in \{0, 1, \dots, z-1\} \subseteq Z$, $x \in R$. Определим срез функции на уровне $t \in \{0, \dots, z\} \subseteq Z$ как бинарную функцию (Рис.1)

$$f_t(x) = \{1: f(x) \geq t; 0: f(x) < t\}.$$

Полным срезовым стеком функции $f(x)$ является упорядоченный набор ее срезов

$$f = \{f_0(x), \dots, f_z(x)\},$$

на основе которых можно определить оператор реконструкции срезового стека δ :

$$f(x) = \delta f = \sum_{t=0}^{z-1} \{f_t(x)\} = \max_{t=0, \dots, z} \{t \times f_t(x)\}.$$

При этом между любыми срезами $f_t(x)$ и $f_r(x)$ выполняется т.н. стековое свойство (Рис.1):

$$r > t \Rightarrow f_r(x) \geq f_t(x). \quad (3)$$

¹ Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект 09-07-13551-офи ц.

Легко заметить, что $f_0(x) \equiv 1$ и $f_2(x) \equiv 0$, то есть стек начинается наибольшим (единичным) и заканчивается наименьшим (нулевым) бинарным образом.

Представим теперь срез функции $f(x)$ на уровне t как комбинацию бинарных функций $f_{t,k}(x)$, соответствующих всем его $n(t)$ непрерывным ненулевым срезovým сегментам

$$f(x) = \sum_{k=1, \dots, n(t)+1} \{f_{t,k}(x)\} = \max_{k=1, \dots, n(t)+1} \{f_{t,k}(x)\}$$

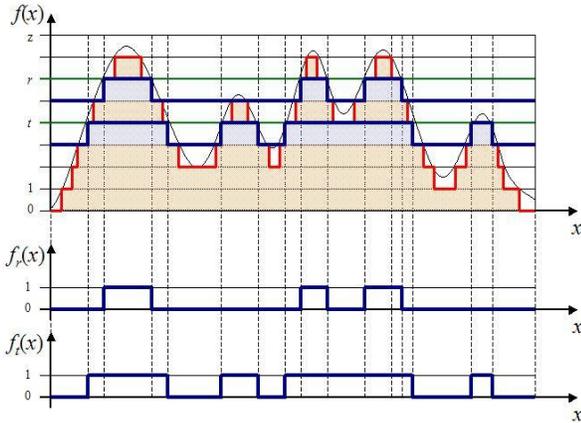


Рис.1. Стековое свойство элементов срезовой цепи.

С точки зрения возможных преобразований разница между срезovým стеком и набором сегментов заключается в том, что между любыми двумя срезами $f(x)$ и $f_t(x)$ всегда выполняется *стековое свойство* (3), в то время как в наборе сегментов это соотношение выполняется лишь для некоторых сегментов. Таким образом можно построить граф G_f , каждому узлу которого соответствует срезовой сегмент из f , а наличие ребра между двумя узлами отражает выполнение между ними стекового свойства. Такой граф всегда является ациклическим графом типа “дерево” и позволяет полностью описать исходную функцию. Будем называть такое дерево G_f (рис.2) деревом стековых сегментов или просто стековым деревом функции $f(x)$. Оператор реконструкции по стековому дереву

$$f(x) = \delta G_f$$

вводится аналогично введенному ранее оператору реконструкции по срезовой стеку.

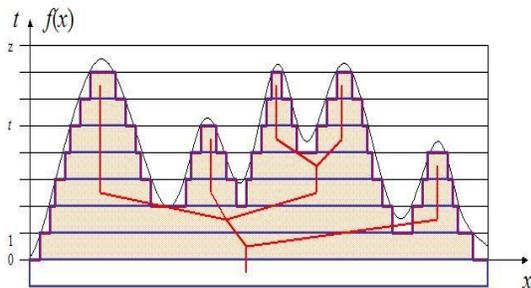


Рис.2. Стековое дерево одномерной функции.

Пусть теперь имеется двумерная функция $f(x,y)$. Представим ее срез $f_t(x,y)$ на уровне t как комбинацию бинарных функций $f_{t,k}(x,y)$, соответствующих всем ее $n(t)$ непрерывным ненулевым срезovým областям.

$$f_t(x,y) = \sum_{k=1, \dots, n(t)+1} \{f_{t,k}(x,y)\} = \max_{k=1, \dots, n(t)+1} \{f_{t,k}(x,y)\}.$$

Введем новую индексацию i , сохраняющую порядок записи областей, определяемый парами индексов (t,k) :

$$(t,k) \rightarrow i: i(t,k) > i(u,m) \Rightarrow \{(t > u) \text{ или } \{(t = u) \text{ и } (k > m)\}\}.$$

Полным набором областей функции $f(x,y)$ назовем упорядоченный набор пар

$$f = \langle (f(x,y), t_i) \rangle_n = \langle (f_0(x,y), t_0), \dots, (f_n(x,y), t_n) \rangle,$$

на основе которого функция может быть восстановлена при помощи оператора реконструкции δ , записываемого в форме аддитивного накопления

$$f(x,y) = \delta f = \sum_{i=1, \dots, n} \{f_i(x,y)\}.$$

или в форме монотонного накопления

$$f(x,y) = \delta f = \max_{i=1, \dots, n} \{t_i \times f_i(x,y)\}.$$

Здесь также можно построить стековое дерево G_f и определить оператор реконструкции по стековому дереву

$$f(x,y) = \delta G_f.$$

3. Морфологическая сегментация с использованием стековых деревьев

Опишем в общем виде задачу морфологической сегментации функций с использованием стековых деревьев.

Поскольку между функциями и стековыми деревьями существует взаимно-однозначное соответствие, для любого оператора φ результат h его применения к функции f всегда может быть представлен в виде стекового дерева G_h с набором областей h . Значит, всегда существует такой оператор преобразования стековых деревьев θ , который соответствует оператору преобразования функций φ :

$$h = \varphi f \Leftrightarrow G_h = \theta G_f.$$

При этом

$$\varphi^2 = \varphi \Leftrightarrow \theta^2 = \theta,$$

то есть любому морфологическому проектору функций φ должен соответствовать морфологический проектор стековых деревьев θ .

Пусть теперь оператор θ является переменным. Тогда задача морфологической сегментации (1) может быть следующим образом обобщена с использованием стековых деревьев:

$$\psi_\alpha f = \operatorname{argmin}_\theta F_\alpha(\delta G_f, \delta \theta G_f), \quad (4)$$

Поскольку стековое дерево – ациклический граф, задача оптимизации (4) может решаться методом динамического программирования для таких критериев (1)-(2), которые представимы в рекурсивной форме на монотонной последовательности поддеревьев дерева G_f [3]. Морфологический фильтр ψ_α (4), реализуемый методом динамического программирования, будем называть ДП-фильтром на базе стекового дерева. Сложность решения задач динамического программирования по «дереву» определяется числом узлов и количеством возможных значений, соответствующих каждому узлу. Поэтому эффективную программную реализацию допускают такие задачи сегментации, в которых на способы изменения значений сегментов накладываются жесткие ограничения.

Рассмотрим в качестве примера типовой задачи морфологической сегментации задачу кусочно-постоянной монотонной интерполяции по стековому дереву.

Задача интерполяции полутоновой функции по срезовой дереву заключается в том, что среди n срезových сегментов выбирается $l < n$ опорных, которые сохраняются без изменений, после чего остальные срезových сегменты заменяются их интерполяцией (реконструкцией) по выбранным опорным

сегментам. Пусть при этом кусочно-постоянная интерполяция возможна между любыми двумя вершинами стекового графа, одна из которых находится по дереву выше другой вне зависимости от наличия между ними точек ветвления. При этом возникает возможность изменения структуры дерева. Проиллюстрируем такие структурные преобразования двумя простыми примерами уменьшающей интерполяции без сохранения топологии графа.

Первый пример (рис.3) демонстрирует возможность перемещения и «поглощения» (склеивания) узлов графа при монотонной интерполяции одномерной функции, сохраняющей стековые отношения между сегментами. В данном примере три различных узла исходного дерева (красный граф), расположенные на разных уровнях структуры, «сползают» вниз по дереву и объединяются в один узел выходного дерева (синий граф) с большим количеством дочерних ветвей. Второй пример (рис.4) заключается в отсечении концевой ветви графа, то есть «выступа» исходной функции, в результате которого узел исходного графа перестает быть узлом.

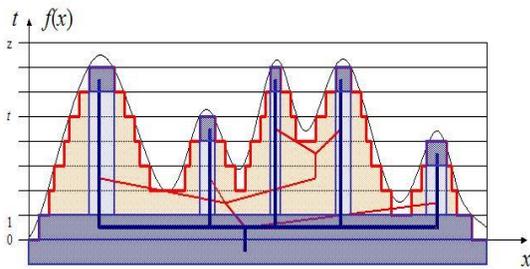


Рис.3. Пример преобразования стекового дерева. Изменение узлов.

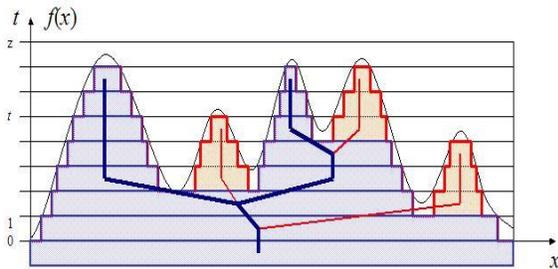


Рис.4. Пример преобразования стекового дерева. Удаление ветвей.

Определим оператор морфологического ДП-открытия как задачу нахождения такого *минимального набора опорных сегментов*, который обеспечивает *максимум нормы L^1* (площади под графиком) *интерполированной по этим сегментам кусочно-постоянной функции*, причем график функции-решения *целиком покрывается* графиком исходной функции, т.е. $h(x) \leq f(x)$ (рис.3,4).

Двойственный оператор ДП-закрытия на базе стекового дерева φ_α может быть определен через оператор ДП-открытия ψ_α и двойное инвертирование функции:

$$\varphi_\alpha f(x) = z - \psi_\alpha(z - f(x)).$$

4. Морфологическая сегментация изображений земной поверхности

Описанная выше техника морфологической сегментации обрабатывалась и тестировалась в задачах описания изображений земной поверхности, получаемых при съемке с космических и авиационных носителей. В качестве критериев J и Q использовались L^1 норма и количество опорных областей соответственно.

При этом оценивались компактность получаемого описания и точность реконструкции исходного изображения по этому описанию. В таблице приведены примеры ДП-открытия и ДП-закрытия для нескольких реальных изображений земной поверхности (Рис. 5-9).

Таблица 1. Зависимость количества срезовых сегментов от величины моделирующего параметра.

Параметр α	Im_1 (рис 5а) 548x408	Im_2 (рис 5б) 697x539	Im_1 548x408	Im_2 697x539
	ДП-открытие		ДП-закрытие	
0	2358	3352	2358	3352
10	1044	1487	1266	2102
100	520	719	588	902
1000	88	167	118	202
10000	21	35	28	46

Как видно из приведенных примеров даже при небольшом количестве опорных сегментов стековые деревья позволяют достаточно точно описать изображения земной поверхности исследуемого типа.

5. Заключение

Предложен эффективный алгоритм критериальной морфологической фильтрации для решения задач сегментации изображений. Особенностью алгоритма является представление изображения в виде стекового дерева, что позволило использовать метод динамического программирования для получения оптимального в некотором смысле описания изображения. Результаты тестирования подтвердили адекватность полученного описания.

Данный этап работы был посвящен решению задачи критериальной морфологической сегментации и последующей реконструкции типовых изображений земной поверхности. На следующих этапах исследования планируется разработать быстрые алгоритмы привязки фрагментов разномоментных

изображений фрагментов земной поверхности с использованием стековых древовидных описаний.

6. Литература

1. Визильтер Ю.В. Обобщенная проективная морфология. // Компьютерная оптика, Том 32, №4. 2008.
2. Визильтер Ю.В., Желтов С.Ю., Ларетина Н.А. Проективные морфологии на базе операторов фильтрации и сегментации изображений, вычисляемых методом динамического программирования // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2009. №6.
3. Werner T. A Linear Programming Approach to Max-sum problem: A Review. Research reports of CMP. Czech Technical University in Prague, No 25, 2005. 46p.
4. Serra J. Image Analysis and Mathematical Morphology, Academic Press, London, 1982.
5. Yeong-Chyang Shih F., Mitchell O.R. Threshold Decomposition of gray Scale Morphology into Binary Morphology. IEEE trans. on pattern analysis, machine intelligence, vol, II, No 1, January 1989.

Информация об авторах

Визильтер Юрий Валентинович, доктор физико-математических наук, начальник лаборатории компьютерного машинного зрения ГосНИИАС.
Email: viz@gosniias.ru

Горбачевич Владимир Сергеевич, инженер лаборатории компьютерного машинного зрения ГосНИИАС.
Email: gvs@gosniias.ru

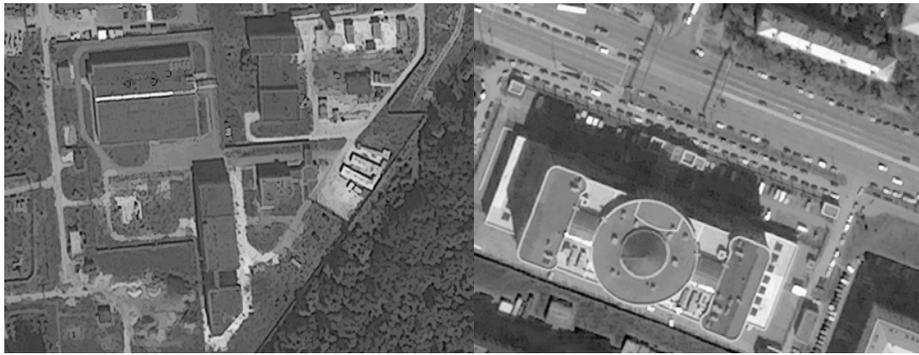


Рис.5. Исходные изображения: а) количество сегментов 2358 б) количество сегментов 3352.



Рис.6. ДП-открытие: а) $\alpha=1000$ (количество сегментов 88), б) $\alpha=10000$ (количество сегментов 21).

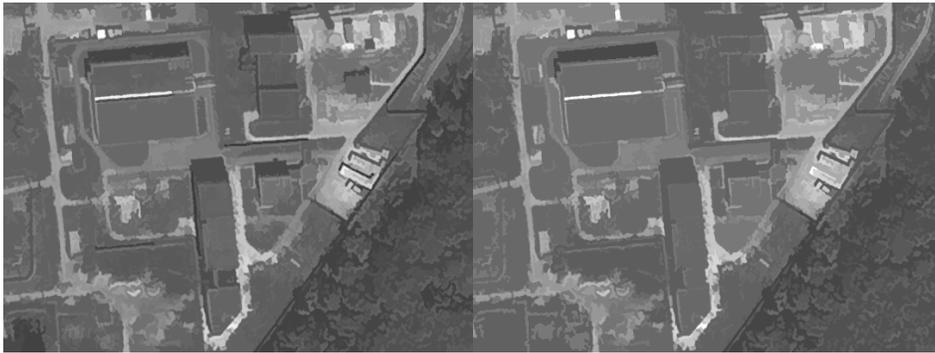


Рис.7. ДП-закрытие: а) $\alpha=1000$. (количество сегментов 118), б), $\alpha=10000$. (количество сегментов 28).



Рис.8. ДП-открытие: а) $\alpha=1000$. (количество сегментов 167), б), $\alpha=10000$. (количество сегментов 35).

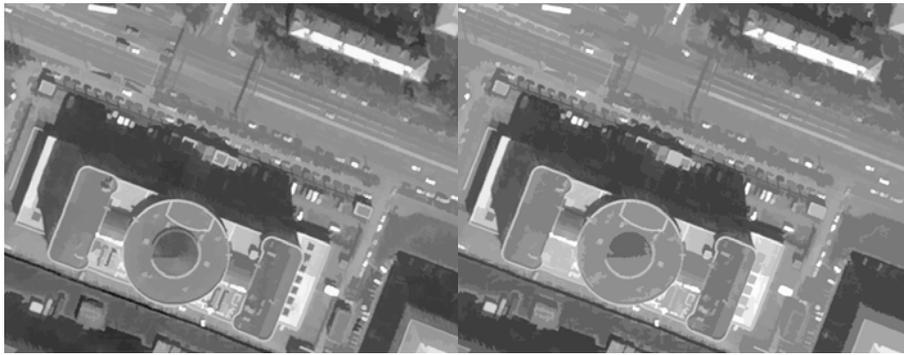


Рис.9.ДП-закрытие: а) $\alpha=1000$. (количество сегментов 202), б), $\alpha=10000$. (количество сегментов 46).