

Алгоритм векторизации штриховых изображений отрезками прямых

Максим Сержанов
Кафедра информатики

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь
accept@bk.ru

Аннотация

В статье описывается гибридная методика векторизации штриховых бинарных изображений отрезками прямых, основанная на представлении объектов изображения в виде планарного нагруженного ориентированного псевдографа. Предлагается алгоритм построения графовой модели изображения, кодированного в виде концов серий. Метод является дальнейшим развитием идей Ди Зензо, Монагана, Павлидиса.

Ключевые слова: Векторизация, RLE, графовая модель.

1. ВВЕДЕНИЕ

При сканировании широкоформатных чертежей получается растровое изображение большого размера, что накладывает определенные ограничения на применяемые алгоритмы обработки. В частности, необходима структура данных, которая будет обеспечивать компактное хранение изображения, сохраняя его топологию. Рассмотрим сильные и слабые стороны некоторых методов представления растровой информации. Операция утоньшения позволяет представить объекты на растре линиями единичной ширины. Скелетизированное изображение сохраняет топологию, однако оно чувствительно к шуму, места соединений обрабатываются не всегда корректно. Недостатком контурного препарата является то, что по нему трудно построить топологию исходного изображения. Граф смежности строк является удобным способом представления изображения, состоящего из большого числа горизонтальных или вертикальных отрезков. Однако данная структура не хранит информацию о местах соединения, что, безусловно, является серьезным недостатком.

В данной работе предлагается представление каждого объекта изображения в виде планарного нагруженного ориентированного псевдографа, в котором все ребра суть прямолинейные отрезки или дуги плоских кривых, а вершины – точки на плоскости, являющиеся концами отрезков или точками сочленения нескольких отрезков.

2. ИСПОЛЬЗУЕМАЯ ТЕРМИНОЛОГИЯ

Под серией будем понимать последовательность отсчетов, имеющих одинаковое значение[1]. Серия однозначно определяется с помощью четырех значений:

d – направление (вертикальное или горизонтальное);

pos – номер столбца (строки) матрицы изображения, которому принадлежит серия;

beg – номер строки (столбца) матрицы изображения, которому принадлежит первый пиксель серии;

end – номер строки (столбца) матрицы изображения, которому принадлежит последний пиксель серии.

Две серии A и B называются смежными, если выполняются условия (1)-(4):

$$A.d = B.d \quad (1)$$

$$|A.pos - B.pos| = 1 \quad (2)$$

$$A.beg \leq B.end + 1 \quad (3)$$

$$A.end \geq B.beg - 1 \quad (4)$$

Под путем из серии A к серии B будем понимать последовательность серий $A=A_1, A_2, \dots, A_n=B$, таких, что A_i является смежной с A_{i+1} для $1 \leq i \leq n-1$.

Рассмотрим две смежные серии. Они находятся в отношении «родитель-потомок». Серию с меньшим значением pos будем называть родительской. Серию с большим значением pos будем считать дочерней.

Серия будет называться нормальной, если она имеет ровно одного родителя и ровно одного потомка. В противном случае серия является особой.

Под начальной будем понимать серию, не имеющую родителей. Под конечной будем понимать серию, не имеющую потомков. Под серией слияния будем понимать серию, имеющую более одного родителя. Под серией ветвления будем понимать серию, имеющую более одного потомка.

Под полосой будем понимать связное множество нормальных серий. Полной полосой будем называть полосу, которая не является подмножеством другой полосы. Полоса представляет отдельную «ветвь» изображения. Полоса может содержать строго одну серию из столбца изображения, т.е. в полосе отсутствуют случаи ветвления и слияния серий. Под длиной полосы будем понимать количество серий, которые образуют полосу. Под весом полосы будем понимать суммарное число отсчетов ее серий. Если квадрат длины полосы больше ее веса, то полоса закрывается.

Листинг первым ввел понятие линейного скелета[2], который образуется в результате континуального сжатия области (без изменения топологии) с выделением подмножества пикселей единичной толщины. Средняя ось формируется центрами дисков максимального радиуса, помещенных внутрь области[3].

Скелетной кривой (СКР) в непрерывном пространстве будет являться либо линейный скелет либо средняя ось, сохраняющие топологические или геометрические признаки[4]. Мы задаем СКР множеством из N целочисленных точек $pnt_0, pnt_1, \dots, pnt_{N-1}$. СКР имеет

характеристику ширины. На атрибуты СКР задаются следующие ограничения:

$$N \geq 3 \quad (5)$$

$$|pnt.x_{i+1} - pnt.x_i| \leq 1, i = (0, 1, \dots, N - 2) \quad (6)$$

$$|pnt.y_{i+2} - pnt.y_i| \leq 4, i = (0, 1, \dots, N - 3) \quad (7)$$

Заметим, что условия (6)-(7) являются симметричными относительно координат x и y.

Закрытием полосы является формирование СКР по центральным точкам серий полосы (рис. 1). Серии, образовавшие СКР, удаляются из полосы. СКР представляются только те серии полосы, чьи центральные точки соответствуют условиям (5)-(7).

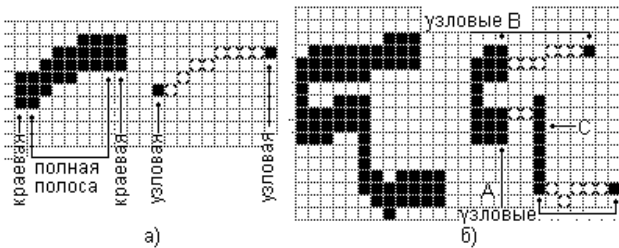


Рисунок 1: Пример закрытия полосы: а) узловые серии являются краевыми; б) узловые серии А, В, С отличаются от краевых.

Рассмотрим полную полосу S. Серии, являющиеся родительской и дочерней по отношению к первой и последней сериям S соответственно, назовем краевыми. Обозначим краевые серии через E_1 и E_2 . Узловыми будем называть серии, к которым прикрепляются СКР при закрытии полосы. Если краевая серия является начальной или конечной, то она является узловой. В этом случае узловая серия «сужается» до центральной точки. Пусть краевая серия E_1 будет серией слияния или ветвления. Рассмотрим путь $E_1 E_2$. Тогда узловой будет серия E_{1+n} . В данном случае размеры серии не изменяются. Такой выбор узловых серий сохраняет топологию соединения.

Пусть имеется полная полоса S, состоящая из n серий R. Общее число отсчетов серий полосы S равняется m. После закрытия она представляется кривой C. Вычисляются следующие морфологические свойства. Площадь рассчитывается просто как количество пикселей, соответствующих полосе. Длина вычисляется как евклидово расстояние между центрами узловых серий. Ширина W рассчитывается по формуле:

$$W = \frac{m}{\sum_{i=1}^n \sqrt{1 + \left(\frac{R_i.beg + R_i.end - (R_{i-1}.beg + R_{i-1}.end)}{2} \right)^2}} \quad (8)$$

3. ПОСТРОЕНИЕ ГРАФОВОЙ МОДЕЛИ БИНАРНОГО РАСТРА

Каждый столбец матрицы изображения представляется упорядоченным по возрастанию координат списком серий. Изображение хранится в виде массива списков серий (МСС). Выделим связанные компоненты (СК) изображения. Благодаря RLE-кодированию возможно использование эффективного алгоритма[5]. Его основная идея заключается в том, что

метка СК ассоциируется не с отдельным пикселем, а с серией. Однако для больших изображений размер таблицы эквивалентности является фактором, снижающим производительность. Мы применяем методику «разделяй и властвуй» для нахождения СК изображений большого размера. Основываясь на работе[6], разделим изображение на NxN частей. Для каждой части применим алгоритм[5], затем выполним процедуру слияния. Каждая СК соответствует объекту на изображении и будет представлена графом.

Нами предлагается использование быстрого алгоритма частичной скелетизации, основной задачей которого является нахождение осевых линий частей объектов простой формы. Более сложные фрагменты будут обработаны отдельно в дальнейшем. Скан-проход алгоритма заключается в следующем: изображение сканируется по вертикали, анализируется связность смежных серий и выделяются полосы. Найденные полосы закрываются.

После вертикального сканирования изображение поворачивается на 90°, снова выполняется скан-проход, затем изображение поворачивается в исходное положение (рис. 2).

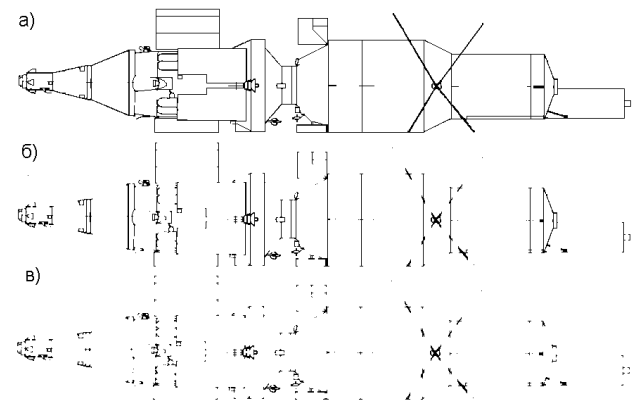


Рисунок 2: Пример работы алгоритма частичной скелетизации: а) исходная СК; б) вертикальный проход; в) горизонтальный проход.

В результате двух скан-проходов прямолинейные отрезки СК заменяются скелетными кривыми (СКР). Группы серий, которые не были заменены СКР на процедуре частичной скелетизации, представляют собой области соединений (например, X, T, Y -типа). Из области соединения (ОС) исходят СКР, аппроксимирующие относительно прямолинейные участки. Для каждой СКР, исходящей из ОС, получим вектор направления, построенный по ее начальным точкам. Найдём точку пересечения векторов направлений ОС и соединим ее отрезками с начальными точками СКР. Пометим точки растра, через которые проходят эти отрезки. Затем применим параллельный алгоритм утоньшения для ОС, который не будет удалять помеченные пиксели (рис. 3).

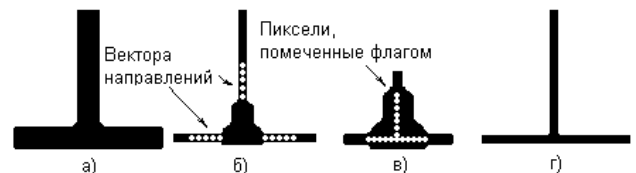


Рисунок 3. Обработка соединений. а) СК б) результат частичной скелетизации в) ОС, белым показаны точки соединения г) результат скелетизации

Таким способом, с помощью аналитической реконструкции обеспечивается корректная обработка соединений.

На следующем шаге анализом последовательности серий единичной ширины выделим группы серий, удовлетворяющие условиям (5-7). Заменяем эти серии с помощью СКР. В данном случае СКР будет являться альтернативным способом представления последовательности пикселей единичной толщины. Перейдем к построению графовой модели. По координатам узловых серий (т.е. серий, которые указывают на СКР) сформируем множество вершин V . По точкам СКР построим ребра. Каждая СКР была прикреплена к двум сериям, которые преобразовались в вершины, следовательно, можно найти вершины, из которых исходят ребра. Рассмотрим два смежных ребра. Если они являются коллинеарными (допускается погрешность в 5°), то они могут быть заменены одним ребром.

В результате вышеописанных действий каждая СК изображения представляется нагруженным ориентированным планарным псевдографом, вершинам которого соответствуют концевые и узловые точки отрезков СК, а ребрам – сами отрезки СК, представленные в форме СКР. Независимые подходы к описанию и построению графовых моделей были предложены в [1, 7-8].

Псевдограф G задается парой $G = (V, E)$, где:

V – множество вершин;

E – мультимножество ребер, каждое из которых соединяет две вершины из V , причем изображения ребер из E на плоскости не пересекаются, поэтому (V, E) представляет собой планарный граф. Каждое ребро имеет важные характеристики (длина, ширина, элонгация), которые могут быть использованы при последующем создании векторной модели.

Графовая модель является компактной формой представления СК изображения, которую значительно проще анализировать, чем исходную матрицу изображения. Она описывает топологию СК, связи между отрезками СК (ОСК) и позволяет осуществлять эффективное нахождение графических примитивов.

Под мультиточкой будем понимать точку пересечения как минимум трех отрезков [7]. Нахождение мультиточек является важной задачей при распознавании образов. Вершины графа, из которых исходит более трех ребер, являются мультиточками.

По графовой модели могут быть получены следующие характеристики:

а) отдельной СК: выделение петли на изображении СК; количество ОСК; длина каждого ОСК; общая длина всех ОСК; средняя длина всех ОСК; максимальная и минимальная длина ОСК; средняя элонгация всех ОСК; максимальная и минимальная элонгация ОСК; средняя ширина всех ОСК; максимальная и минимальная ширина ОСК.

б) изображения: количество объектов; количество ОСК всех объектов; суммарное, среднее, максимальное и минимальное значение параметров СК.

Граф может быть преобразован в более компактную форму гиперграфа [9], гиперребра которого состоят из ребер,

соединяющих вершины степени 1 и 2 исходного графа (см. рис. 4).

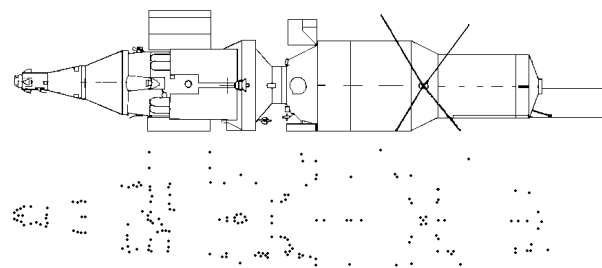


Рисунок 4: Исходное изображение и вершины гиперграфа.

4. ВЕКТОРИЗАЦИЯ

4.1 Нахождение путей векторизации

Для последующей постобработки поместим узловые и концевые точки в отдельные массивы (МУТ, МКТ). Следующим шагом является построение векторной модели на основании имеющегося графа. Из имеющегося псевдографа G получим гиперграф GG . На первом шаге процедуры построения выделим гиперребра графа GG , состоящие из ребер графа G , соединяющих вершины графа G степени один и два. Каждое гиперребро имеет две концевые вершины. Из каждой такой вершины гиперребра GE исходит ноль или более одно ребра E , не принадлежащих гиперребру GE . Рассмотрим 2 ребра $E1$ и $E2$, исходящих из вершины степени 3 графа G . Пусть ребра $E1$ и $E2$ принадлежат гиперребрам $GE1$ и $GE2$ соответственно. Если ребра $E1$ и $E2$ являются коллинеарными с некоторой погрешностью (например, 5°), то гиперребра $GE1$ и $GE2$ объединяются.

Введем понятие пути векторизации. Под путем векторизации (ПВ) будем понимать последовательность точек $p_i = (x_i, y_i)$, лежащих на средней линии СК. $ПВ = \{p_0, p_1, \dots, p_n\}$. Если $p_0 = p_n$, то путь является закрытым. Точки ПВ описывают набор отрезков и дуг окружностей. Каждое гиперребро описывает ПВ (рис. 5).

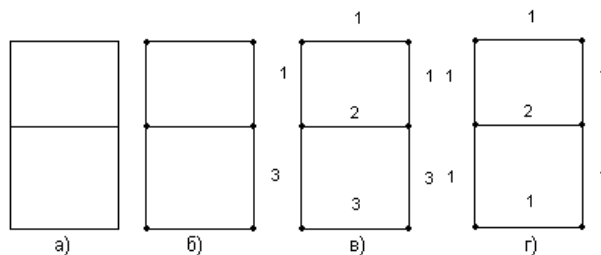


Рисунок 5: а) исходная связная компонента б) полученный граф в) цифрами показаны гиперребра GE на первом шаге построения г) цифрами показаны ПВ.

4.2 Векторизация

Для выделения отрезков применяется метод генерализации Дугласа-Пекера [10]. Пусть имеется путь векторизации $ПВ = \{p_0, p_1, \dots, p_n\}$. Рассмотрим процедуру аппроксимации. Построим отрезок p_0p_n . Пусть p_k – самая удалённая от отрезка p_0p_n вершина. Если расстояние от p_k до отрезка p_0p_n меньше заданного порога, то p_0p_n аппроксимирует последовательность. В противном случае разобьем ПВ на 2

части: $P1 = \{p_0, \dots, p_k\}$ и $P2 = \{p_{k+1}, \dots, p_n\}$. Для каждой части рекурсивно применяется процедура аппроксимации. Введем понятия сегмента. Под сегментом будем понимать прямолинейный отрезок, полученный путем полигональной аппроксимации точек пути векторизации. Сегменты используются для нахождения дуг окружностей. Пусть имеется путь векторизации, представленный сегментами S_1, S_2, \dots, S_n . Рассмотрим пару смежных сегментов S_i, S_{i+1} . Из геометрии известно, что три неколлинеарные точки X, Y, Z на плоскости однозначно определяют окружность. Центр окружности C будет находиться на пересечении перпендикуляров, опущенных на середины отрезков XY и YZ . Затем итеративно тестируются смежные сегменты на принадлежность дуге.

Полученные из сегментов отрезки и дуги окружностей получают характеристику ширины ребра графа G , из анализа которого они были получены.

В качестве постобработки предлагается стыковка отрезков в местах соединений. Это осуществляется анализом МУТ и МКТ. На рис.6 приведен пример работы алгоритма.

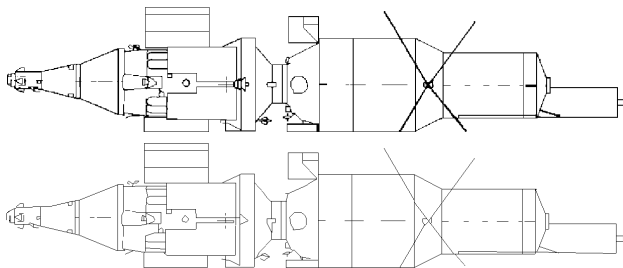


Рисунок 6: Исходное изображение и результат векторизации.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Эффективный метод представления растрового изображения должен обеспечивать достаточную степень сжатия информации и в то же время позволять обрабатывать изображение напрямую в кодированной форме. Например, векторизация часто осуществляется для изображений большого размера, и разбиение изображения на фрагменты с последующей «сшивкой» является источником ошибок.

Мы предлагаем использование графовой модели как компактного средства хранения и описания структуры раstra. Достоинством предлагаемого подхода является простота реализации и достаточно высокое быстродействие. Нами предлагается модификация алгоритма нахождения СК, созданная специально для обработки изображений большого размера. Благодаря кодированию концов серий построение скелета осуществляется быстрее, чем при использовании классических методов попиксельного анализа. Для САПР важна высокая точность нахождения линейных сегментов и точек их пересечения. Предлагается методика обработки соединений. Зоны соединений исключаются из процедуры скелетизации, и производится аналитическая реконструкция точек пересечения. Исходная СК может быть реконструирована анализом графа. Недостатком подхода является неполное описание площадных объектов. Полученная графовая модель успешно применяется при векторизации планов зданий, технических чертежей.

6. ЛИТЕРАТУРА

- [1] Monagan, G. Appropriate base representation using a run graph./G. Monagan., M. Roosli//Document Analysis and Recognition:Proc. Int. Conf., Japan-p.623-626.
- [2] Listing, J.1861, Dercensusraeumlicher complexe oder verallgemeinerungen des euler'schen satzes von den polyeadern., Abhandlungen der Mathematischen Classe der Koeniglichen Gesellschaft der Wissenschaften zu Goettingen.
- [3] H. Blum. A transformation for extracting new descriptors of shape, Models for the Perception of Speech and Visual Form (W.Wathen-Dunn, ed.), MIT Press, pp. 362-380, 1967.
- [4] G. Klette, "Topologic, Geometric, or Graph-Theoretic Properties of. Skeletal Curves,," PhD dissertation, Groningen Univ., 2007.
- [5] Linda G. Shapiro, Connected Component Labeling and Adjacency Graph Construction. – Topological algorithms for digital image processing – Elsevier Science B.V. - 1-31 - 1996.
- [6] Jung-Me P., Carl G. Looney, Hui-Chuan C., Fast Connected Component Labeling Algorithm Using a Divide and Conquer Technique, CATA 2000 Conference on Computers and Their Applications, pp. 373 – 376, Dec. 2000.
- [7] S. Di Zenzo, L. Cinque, S. Levialdi. Run-based algorithms for binary image analysis and processing// Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on PAMI, vol.18 NO.1 - January 1996 - pp. 83-89.
- [8] Костюк Ю.Л., Новиков Ю.Л. Графовые модели цветных растровых изображений высокого разрешения // Вестник ТГУ. 2002. № 275, апрель. С.153–160.
- [9] Berge, C., Ed. 1973. Graphs and Hypergraphs. American Elsevier, New York.
- [10] Douglas, David H. Algorithms for the reduction of the number of points required to represent a digitized line or its caricature./ David H. Douglas, Thomas K. Peucker - The Canadian Cartographer 10, 1973, № 2 - P. 112–122.

Благодарности

Автор выражает благодарность своим родителям, а также профессору Леониду Ивановичу Минченко и доценту Владимиру Яковлевичу Анисимову за ценные замечания и советы, и Борису Борисовичу Гребенщикову за неповторимую атмосферу, создаваемую его музыкой.

Об авторе

Максим Стержанов – аспирант БГУИР. email: accept@bk.ru.

Abstract

In this paper we introduce a hybrid vectorization methodology for line monochrome drawings. A graph model is utilised as an intermediate representation. This form of compression preserves the topology. We are extending further the work of Di Zenzo, Monagan and Pavlidis, amongst others. The algorithm is based on run-length encoding of the image. We examine the modification of extraction methods for connected components. Junctions are analysed separately using a specific procedure for analytical reconstruction.

Keywords: vectorization, RLE, graph model.