УДК 528.854.2

ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ КРИВЫХ ЛИНИЙ НА ОСНОВЕ АППРОКСИМАЦИИ ОКРУЖНОСТЯМИ

Д.И. КИРИЛЮК, Ю.И. КУЛАЖЕНКО

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

Поступила в редакцию 30 мая 2016

Приведены методы геометрической параметризации линий. Проведен теоретический анализ этих методов в рамках задачи мобильных систем наблюдения.

Ключевые слова: параметризация линий, кривые на изображении.

Введение

В настоящее время в связи с развитием мобильных систем наблюдения специального назначения стоит актуальная задача – обработка изображений в реальном масштабе времени. Для ее решения широко используются методы, которые основаны на распределении градиента яркости в окрестностях реперных точек. Однако в условиях проекционных искажений и шумовых помех эффективность градиентного подхода снижается. Устранение данного недостатка возможно за счет применения геометрического подхода. Геометрические методы ранее широко применялись в задачах для обработки изображений, имеющих синтетический характе (например, печатные платы, детали конструкций, САПР). Поэтому актуальной задачей в настоящее время является модернизация существующих геометрических методов и создание новых методов для обработки изображений, имеющих естественный характер (например, спутниковые, ландшафтные). Целью настоящей работы является анализ методов геометрической параметризации линий на изображениях.

Методы параметризации кривых линий

В рамках таких задач к дескрипторам линий предъявляются следующие требования: устойчивость к проективным преобразованиям, устойчивость к шуму, высокая скорость формирования, произвольность формы кривой.

Известны следующие способы параметризации произвольных кривых линий.

1. Диаметр.
2. Эксцентриситет.
3. Форм-фактор.
4. Статистические характеристики.
5. Кривизна.
6. Аппроксимация аналитическими кривыми.
7. Аппроксимация ломаными.
8. Аппроксимация сплайнами.
9. Кодирование цепными кодами.
10. Сигнатуры.
11. Фурье-параметризация.
12. Преобразование Хафа.
13. Меры симметрий.

Кратко приведем описание этих методов.

Простейшим случаем произвольной линии является прямая. Примером исследований прямых линий посвящены работы [1, 2]. Важным численным показателем кривой *C* является диаметр, который определяется формулой

$$Diam(C) = \max_{i,j}\left[D(p_i, p_j)\right],$$

где D – мера расстояния, p_i и p_j – точки, принадлежащие кривой.
Этот параметр является важным в случаях, когда кривая образует замкнутый контур или близкий к замкнутому контуру, т.е. когда значение диаметра меньше расстояния от точки начала кривой до точки конца. Развитием этого численного показателя может служить дескриптор, состоящий из значения самого диаметра и направление отрезка, соединяющего две экстремальные точки, которые и определяют диаметр (этот отрезок называют большой осью). Аналогично определяется малая ось, как отрезок перпендикулярный большой оси и имеющий такую минимальную длину, что проведенный через концы обеих осей прямоугольник полностью содержит в себе всю границу (рис. 1).

Рис. 1. Диаметр, большая и малая оси

Еще одним численным параметром, характеризующим кривую, является эксцентриситет, т.е. отношение большой оси к малой [3].

Для параметризации формы кривой используют численный параметр – форм-фактор, который определяется формулой

$$f(n) = r(n)/s(n),$$

где $r(n)$ – расстояние между концевыми точками линии, $s(n)$ – некоторая мера расстояния, характеризующая длину линии [4]. Форм-фактор в совокупности с направлением отрезка, соединяющего начало и конец кривой линии, может являться полезным дескриптором.

Форму кривых линий можно количественно описывать с помощью статистических характеристик, таких как математическое ожидание, дисперсия, моменты более высокого порядка и другие [5].

Дескрипторы, являющие численными характеристиками формы линии, т.е. диаметра, эксцентриситета, форм-фактора, некоторые статистические характеристики являются вычислительно простыми, но слабо характеризующими форму линии, поэтому их использование целесообразно для предварительного сбора информации. После предварительного вычисления таких параметров следует принимать решение о необходимости дальнейшего вычисления более сложных дескрипторов.

Для построения дескриптора произвольной линии можно использовать кривизну кривой, т.е. скорость изменения угла наклона. Однако в данном способе имеются сложности вычисления в дискретном случае из-за возникновения локальных зазубрин, хотя разность углов наклона соседних сегментов линии может быть полезна.

Использование аналитических кривых не является целесообразным, т.к. подобрать математическое представление (коэффициенты) кривой линии удается лишь в сравнительно простых случаях, и как правило, эти случаи связаны с какими-то искусственными линиями.

Существуют подходы к построению дескриптора через аппроксимацию кривой ломаными линиями [6] (рис. 2). Такое описание является вычислительно простым, но неустойчивым.

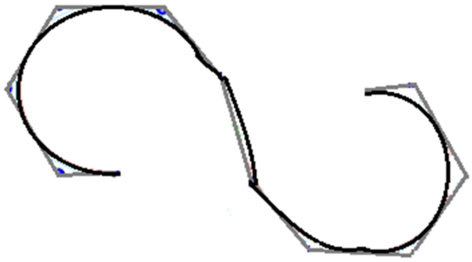

Рис. 2. Аппроксимация с помощью ломаной

Методы аппроксимации кривой линии с помощью ломаной сильно зависят от начальной и конечной точек, от выбора шага дискретизации, поэтому являются крайне неустойчивыми.

Для параметризации кривой применяют кодирование цепными кодами [7]. В этом случае линия представляется в виде последовательности соединенных отрезков, для которых указаны длина и направление. Направление каждого отрезка кодируется в соответствии со схемой нумерации. В общем случае такой метод имеет два недостатка: получаемая цепочка кодов оказывается слишком длинной, и любые малые возмущения приводят к изменениям кодовой последовательности, которые не связаны с общей формой кривой.

В качестве развития этого подхода можно предложить метод, который каждой последовательности из трех пикселей ставит в соответствие номер фазовой ориентации. Всего для трех пикселей возможно 12 фазовых ориентаций. Анализ стабильности этого метода при повороте проводился следующим образом. Исходное изображение, содержащее кривую линию, поворачивалось на 360° с шагом 5°. В итоге было получено 72 дескриптора, между которыми установлено покоординатное соответствие. По каждому элементу дескрипторов вычислено значение дисперсии. Среднее значение дисперсии равно 3,46.

Сигнатуры – одномерные функции, взаимно-однозначно определяющие кривую линию. В данном способе важен выбор некоторой фиксированной точки (центра), относительно которого будет строится функция [8]. Например, вычисляются углы между отрезками от выбранной центральной точки до точек кривой. Последовательность таких углов может служить дескриптором.

Фурье-дескриптор кривой линии позволяет свести задачу с двумерного случая к одномерному. Для этого последовательность координат соседних пикселей кривой представляется в виде последовательности комплексных чисел (одна координата будет действительной частью, а другая мнимой частью комплексного числа.) Задается последовательность $s(k) = x(k) + iy(k)$, где $x(k)$ – координата x k-й точки линии, $y(k)$ – координата y k-й точки линии. Дискретное преобразование Фурье конечной последовательности $s(k)$ задается уравнением

$$a(u) = \frac{1}{K}\sum_{k=0}^{K-1} s(k) e^{-2\pi iuk/K},$$

где K – количество пикселей, из которых состоит линия; $u = 0,\ 1,\ 2, \ldots, K-1$.

Комплексные коэффициенты $a(u)$ и будут являться дескриптором. Обратное преобразование Фурье позволяет по этим коэффициентам восстановить исходную линию. Фурье-дескриптор устойчив к повороту и параллельному переносу с некоторой модернизацией [9]. Недостатком является то, что некоторые детали кривой при преобразованиях могут теряться.

Определяющим шагом в методах, использующих цепные коды и Фурье-дескрипторы, является выбор начальной точки, т.е. стабильность этих методов в первую очередь зависит от выбора точки отсчета. Если удастся повысить эффективность выбора такой точки, то использование таких методов будет целесообразным. Применение сигнатур для требуемых в работе условий предполагает согласованный выбор фиксированной точки и выбор способа задания меры относительно этой точки.

Если существуют замкнутые многоугольники, то для их характеристики можно использовать вычисления меры симметрий [10].

Аппроксимации кривых линий сплайнами посвящено много работ [11, 12], т.к. сплайны обладают хорошими апроксимационными свойствами. Для реализации этого подхода кривая линия должна обладать условием существования функции, что на практике не всегда случается. Использование сплайнов и мер симметрий в рамках поставленной задачи не имеет смысла, т.к. такие методы не обладают необходимой вычислительной сложностью, и как следствие, не позволяют обрабатывать данные в реальном времени.

Методы Хафа для параметризации произвольных кривых линий неприменимы ввиду высокой вычислительной сложности.

Сравнительная характеристика методов геометрической параметризации линий

Дескрипторы линий	Вычислительная сложность	Произвольность формы линии	Устойчивость к аффинным преобразованиям
диаметр	низкая	–	–
эксцентриситет	низкая	–	–
форм-фактор	низкая	+	–
статистические характеристики	низкая	+	–
кривизна	средняя	+	–
аппроксимация аналитическими кривыми	высокая	–	+
аппроксимация ломаными	низкая	+	–
аппроксимация сплайнами	высокая	–	+
кодирование цепными кодами	средняя	+	+
сигнатуры	средняя	+	+
Фурье-параметризация	средняя	+	+
преобразование Хафа	высокая	+	+

Заключение

Теоретический анализ показал, что для решения поставленной задачи, с учетом вышеуказанных требований, наиболее эффективны методы на основе Фурье-дескрипторов, сигнатур или цепных кодов.

PARAMETRIZATION OF CURVES LINES ON IMAGES

D.I. KIRYLUK, Yu.I. KULAZHENKO

Abstract

Methods of geometrical parametrization of lines are given. The theoretical analysis of these methods within a problem of mobile systems of supervision is carried out.

Keywords: parametrization of lines, curves on the image.

Список литературы

1. *Журавлёв А.А., Цветков В.Ю* // Информатика. 2014. С. 85-96.
2. *Запрягаев С.А., Сорокин А.И.* // Прикладная информатика. 2009. №4(22). С. 76-81.
3. *Freeman H., Shapira. R.* // Comm ACM. 1975. №18. P. 409-413.
4. *Бородина О.Г., Цветков В.Ю.* // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2015. №1. С. 41-45.
5. *Papoulis A.* Probability, random variables, and stochastic processes. New York, 1991.
6. *Loncaric J.* // Progress in Systems and Control Theory. 1998. Vol. 24. P. 303-322.
7. *Bribiesca E.* Pattern Recognition. 1999. №32. P. 235-251.
8. *Ballard D.H., Brown C.M.* Computer Vision. New Jersey, 1982.
9. *Reddy B.S., Chatterj B.N.* // IEEE Transactions on Image Processing. 1996. Vol. 5. P. 1266-1271.
10. *Тузиков А.В.* Анализ симметричности и сравнение объектов на основе сложения Минковского. Минск, 1998.
11. *Абламейко С.В., Васильев В.П.* // Теория и методы автоматизации проектирования: научно-технический сборник. 1979. Вып. 2. С. 35-40.
12. *Абламейко С.В., Васильев В.П.* // Автоматизация проектирования технологических процессов: научно-технический сборник. 1980. Вып. 1. С. 25-31.