

Автоматический выбор порога при выделении контуров на полутоновых изображениях

Д. В. Парфенов (Московский технологический университет)

Сформулирована и экспериментально подтверждена гипотеза о характере зависимости суммарной длины контуров на полутоновом изображении от порога метода выделения контуров. На основе этой модели предложен оригинальный эвристический метод выбора порога, обеспечивающий высокое качество выделения контуров согласно множественным экспертным оценкам.

Ключевые слова: полутоновые изображения, выделение контуров, метод Кэнни, метод Собеля, L-кривая, оценка кривизны, адаптивный порог, устойчивость к шумам.

В задаче распознавания образов естественных объектов на полутоновых изображениях сцен важное место отводится методам выделения контуров [1]. Таких методов к настоящему времени разработано немало, одними из лучших считаются алгоритмы Дж. Кэнни [2] и И. Собеля — Г. Фельдмана [3].

Особенностью задачи является отсутствие строгой математической постановки и общепринятой меры качества, что следует из неформального понятия контура. При выделении контуров, подобно многим другим задачам распознавания образов, возникают ошибки первого и второго рода. За контуры могут быть приняты элементы изображений, ими не являющиеся («ложные» контуры), и в то же время могут быть пропущены части «истинных» контуров. Понятие контура дано человеку интуитивно, пока плохо формализовано математически, и нет оправданной функции стоимости, к минимизации которой можно свести задачу. Одни и те же элементы изображений различные эксперты относят к контурам или нет, при этом обоснованно аргументируя свой выбор. Автором совместно с М. С. Погодиным были проведены множественные эксперименты с участием около двадцати человек, хорошо знакомых с понятием

контура и основами компьютерного зрения. Им давалось задание разметить контуры вручную, а затем результаты сравнивались между собой и с автоматизированным выделением. Разница в большинстве случаев была достаточно заметной. Поэтому в качестве цели настоящей работы ставилась автоматическая «подгонка» поведения алгоритмов машинного выделения контуров под усреднённые экспертные результаты.

Наиболее действенным средством такого приближения является выбор основного параметра методов выделения контуров — порога чувствительности θ . Его занижение влечёт появление множества ложных контуров, не соответствующих морфологической структуре объектов, а завышение ведёт к потере важных элементов «истинных» контуров, разделяющих различные объекты. Метод Оцу [4] считается лучшим известным способом нахождения приемлемого значения θ . Однако, по мнениям экспертов, данной оценке свойственны частые промахи. Таким образом, задача отыскания θ остаётся актуальной.

Описываемый ниже подход основывается на том, что выделение контуров на полутоновых изображениях относится к классу некорректно поставленных задач в смысле А. Н. Тихонова. Действительно, даже малые вариации исходного изображения, например, под влиянием аддитивного шума, в состоянии значительно изменить вид выделяемых контуров. В этом смысле параметр θ выступает в качестве параметра регуляризации, устанавливающего баланс между ошибками первого и второго рода. К сожалению, нахождение оптимального значения параметра регуляризации — крайне сложная задача, в подавляющем большинстве практически важных случаев аналитически не решённая. Принимая во внимание неформализованность задачи выделения контуров, оправдано применение эвристических подходов, получивших широкое распространение и признание в последние годы в других областях. Среди них низкой вычислительной сложностью, простотой построения и устойчивостью отличается метод L-кривых [5].

В общем случае в нём строится зависимость некоторого выходного параметра от значения параметра регуляризации. Удивительно часто график такой кривой имеет форму, похожую на букву L или её зеркальное отражение, что и дало название подходу. Близкая к вертикальной часть графика соответствует явному доминированию в ошибке нерегуляризованной части, а пологая часть — регуляризующей поправки. Применительно к выделению контуров в качестве выходного параметра предлагается использовать легко вычисляемую суммарную длину контуров, выделенных на изображении, а в качестве параметра регуляризации —

порог θ . Субоптимальному значению θ , соответствующему соизмеримым вкладам в результирующую ошибку этих двух факторов, отвечает точка максимальной кривизны на сгибе L-кривой.

Для практических алгоритмов выделения контуров L-кривая строится эмпирически, при этом длина выделенных контуров подвержена значительному влиянию шумов, по крайней мере, в левой части кривой. Таким образом, связанная с дифференцированием прямая оценка значения порога по такой гистограмме может оказаться недостоверной и неустойчивой, что подтверждается моделированием.

По этой причине используется то или иное гладкое приближение L-кривой, к которому и применяется известная формула кривизны и нахождение её максимума. Применительно к задаче выделения контуров, точность приближения эмпирической L-кривой известными моделями [6, 7] в окрестности максимума кривизны оказывается недостаточной. Это связано с малым количеством узлов в данной области и недостаточностью степеней свободы аппроксимирующей модели. Поэтому в настоящей работе предложены и численно проверены новые способы приближения L-кривой, среди которых два показали наилучшие результаты: степенная модель со смещением

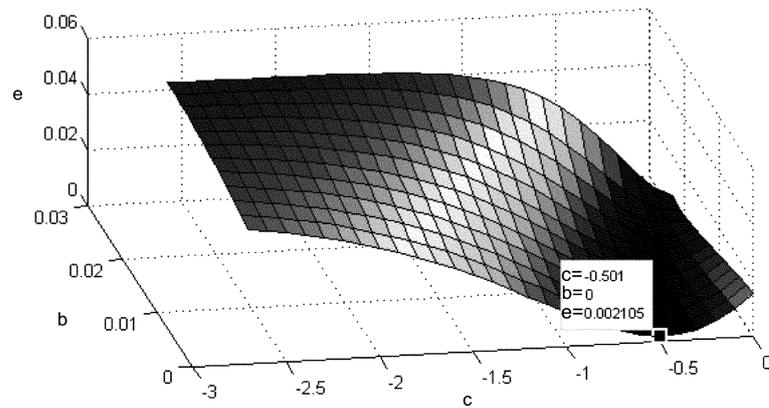
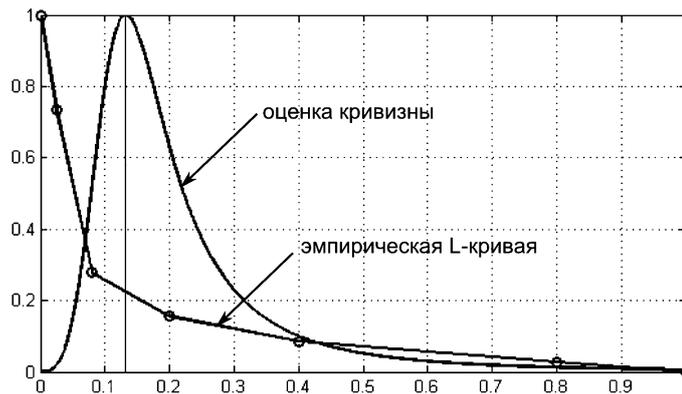
$$\tilde{L}(\theta) = a(\theta - b)^c + d \quad (1)$$

и кубический B-сплайн. Легко показать, что выражение для кривизны $\tilde{L}(\theta)$ имеет единственный экстремум в отношении θ — максимум, соответствующий значению параметра

$$\theta_{knee}(\theta) = \left(\frac{c - 2}{(2c - 1)(ac)^2} \right)^{1/(2(c-1))} + b. \quad (2)$$

Коэффициенты a, b, c, d рассчитываются методом наименьших квадратов, численная реализация которого упрощается линейным вхождением в модель коэффициентов a и d . Таким образом, удаётся ограничиться двумерной нелинейной минимизацией по параметрам b и c .

Типичный вид зависимости квадратической ошибки от b и c приведён на рис. 1, что свидетельствует о хорошем качестве и устойчивости предложенной модели L-кривой. Характерные графики L-кривой и кривизны, оцененной с помощью модели $\tilde{L}(\theta)$, представлены на рис. 2. Для отыскания коэффициентов модели с высокой точностью достаточно 5–7 вычислений суммарной длины контуров при различных θ . Экспериментально обнаружено, что для широкого класса фотографических изображений найденные с помощью L-кривой значения θ близки к средним

Рис. 1. Зависимость квадратического отклонения от b и c .Рис. 2. Типовые графики L-кривой и кривизны как функции θ .

экспертных оценок. Модель L-кривой в виде кубического B-сплайна в отношении качества оценки θ немного уступает степенной, что связано с локальностью сегментов сплайна и более значительным влиянием шума. Она может быть рекомендована при жёстких ограничениях вычислительной трудоёмкости.

Автор выражает признательность профессору Габриеле Штайдль (Gabriele Steidl) за знакомство с подходом L-кривых и благодарит М.С. Погодина за помощь в программной реализации описанного метода и результаты моделирования.

Список литературы

- [1] Pratt W. K. Digital Image Processing. Fourth Edition. — Wiley-Interscience, 2007.
- [2] Canny J. A Computational Approach to Edge Detection // IEEE Trans. on Pattern Anal. and Machine Intelligence. — Nov. 1986. — Vol. PAMI-8, No. 6. — P. 679–698.
- [3] Sobel I., Feldman G. A 3x3 Isotropic Gradient Operator for Image Processing. — 1968, presented at a talk at the Stanford Artificial Project. (неопубл.)
- [4] Otsu N. A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms // IEEE Trans. on Sys., Man, Cyber. — Jan. 1979. — Vol. SMC-9, No. 1. — P. 62–66.
- [5] Hansen P. C. Analysis of Discrete Ill-Posed Problems by Means of the L-curve // SIAM Rev. — 1992. — 34. — P. 561–580.
- [6] Johnston P. R., Gulrajan R. M. Selecting the Corner in the L-Curve Approach to Tikhonov Regularization // IEEE Trans. on Biomed. Eng. — Sept. 2000. — Vol. 47, No. 9. — P. 1293–1296.
- [7] Mc Carthy P. J. Direct Analytic Model of the L-Curve for Tikhonov Regularization Parameter Selection // Inverse Problems. — 2003. — No. 19. — P. 643–663.