

УДК 519.687

Непомнящий П.В., Хельвас А.В., Юрин Д.В.
Московский физико-технический институт
(государственный университет)

ОБНАРУЖЕНИЕ УГОЛКОВЫХ СТРУКТУР НА КОНТУРНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЯХ ПОЛУЧЕННЫХ СЕГМЕНТАЦИЕЙ РАСТРА

Предложен алгоритм для обнаружения уголковых структур на векторных изображениях, основанный на статистическом анализе гипотез и пороговых ограничениях, пригодный для анализа сильно зашумленных линий.

Существует широкий спектр задач в области обработки изображений, в которых требуется совместить несколько изображений или изображение и эталон (возможно векторный). Ввиду того, что изображения могут быть не только смещенными на произвольное расстояние, но и повернутыми друг относительно друга, иметь разные масштабы и содержать перспективные или другие искажения, применение корреляционного метода не всегда целесообразно из-за большого количества возможных вариантов совмещения и неоднозначностей. Существенного упрощения таких задач можно добиться путем нахождения на изображениях характерных особенностей между которыми может быть установлено взаимно-однозначное соответствие. Одним из видов таких особенностей на изображении являются уголковые структуры.

Существуют два основных пути нахождения углов на изображениях. В первом из них поиск уголковых структур производится по растровому изображению [1]. Такие алгоритмы дают хорошие результаты на качественных изображениях, но высокая чувствительность этих алгоритмов к шуму приводит к детектированию большого количества случайных углов на зашумленных изображениях. Второй путь заключается в работе с векторными кривыми, полученными в результате работы либо детекторов границ, либо после сегментации [2,3]. Существует ряд алгоритмов, использующих этот подход, однако недостатком некоторых из них является то, что они разрабатывались с высокими требованиями к скорости в ущерб проблеме шумов, в результате качество детектирования на зашумленных кривых довольно низкое [2]. Другие алгоритмы рассчитаны на нахождение углов только некоторого, заданного, масштаба мелкости [3].

Задачей данной работы являлась разработка алгоритма детектирования углов по векторным кривым, который показывал бы хорошие результаты при работе с зашумленными кривыми и углами разного масштаба мелкости и имел бы интуитивно понятные параметры, характеризующие представления пользователя о параметрах тех углов, которые требуется найти.

Аппроксимация участка кривой

Чтобы описать процесс детектирования угла на кривой, надо определить понятия угла и кривой. За кривую в данной работе принимается набор упорядоченных равноотстоящих друг от друга точек, аппроксимируемых между собой прямыми (рис. 1а).

За угол принимаются два отрезка, соединенных на конце (рис. 1б). У угла существует две характеристики – величина угла и длина плеча. Длина плеча – это характеристика, отве-

чающая за масштаб мелкости угла. Она выражается через число точек кривой, которые попадают в область, накрываемую стороной угла (рис. 1с).

Для того, чтобы определить, является ли данный участок кривой углом, производится его аппроксимация. Для этого предполагаемые стороны угла аппроксимируются отрезками по методу наименьших квадратов (рис. 1с), минимизируя сумму:

$$S_c = \sum_{i=1}^d (y_i - a_1 x_i - a_2)^2 + \sum_{i=d}^N (y_i - a_3 x_i - a_4)^2 \quad (1)$$

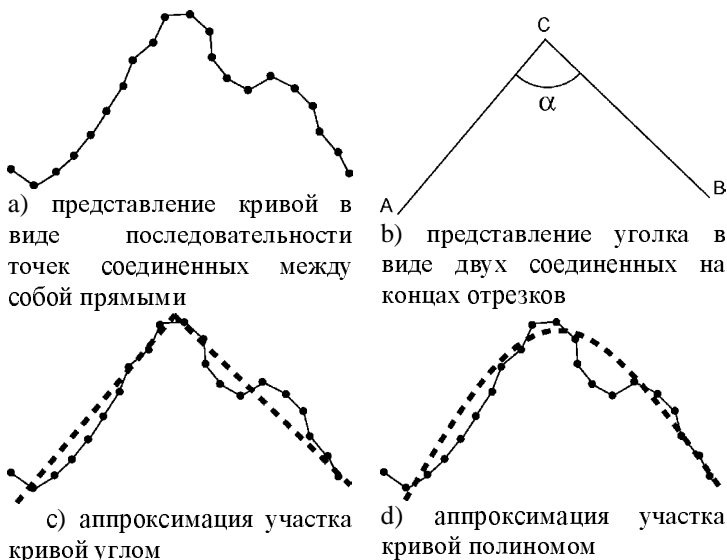


Рис. 1. Аппроксимация участка кривой

Где (x_i, y_i) - координаты i -ой точки на участке кривой, d - длина плеча, а N - длина аппроксимируемого участка (число точек). Минимизация происходит по коэффициен-

там a_1 , a_2 , a_3 и a_4 . Полученная минимизированная сумма является квадратичной ошибкой аппроксимации углом E_c :

$$E_c = \min_{a_1, a_2, a_3, a_4} (S_c) \quad (2)$$

По полученным после минимизации коэффициентам a_1 , a_2 , a_3 , a_4 можно получить величину угла α .

Используя найденную ошибку аппроксимации и предполагая дисперсию точек кривой постоянной, можно посчитать критерий χ^2 :

$$\chi_c^2 = \frac{E_c}{\sigma_{pt}^2} \quad (3)$$

Дисперсия точек кривой σ_{pt} оценивалась как $\sigma_{pt} = c_\sigma L$, где c_σ - задаваемый коэффициент, а L - ширина рамки, которой проводилась сегментация [4]. Из критерия χ^2 можно оценить вероятность гипотезы о том, что данный участок кривой является углом:

$$P_c = \Gamma\left(\frac{1}{2}v_c, \frac{1}{2}\chi_c^2\right), \quad \text{где } \Gamma() \text{ - гамма-функция.} \quad (4)$$

$v_c = N - 2$ в этой формуле это количество степеней свободы при аппроксимации - число точек минус число свободных параметров (два для аппроксимации прямой).

После того, как оценена вероятность гипотезы о том, что данный участок является углом, оценивается противоположная гипотеза, о том, что данный участок является плавно изменяющейся кривой. Для этого производится аппроксимация методом наименьших квадратов этого же участка полиномом 3-ей степени (рис. 1d), минимизирующая по коэффициентам b_1 , b_2 , b_3 , b_4 сумму:

$$S_p = \sum_{i=1}^N (y_i - b_1 x^3 - b_2 x^2 - b_3 x - b_4)^2 \quad (5)$$

Выбор третьей степени полинома обуславливается тем обстоятельством, что увеличение степени аппроксимирующего полинома часто приводит к осцилляциям, а третья степень соответствует физической модели изогнутого упругого стержня и хорошо себя зарекомендовала в области сплайн интерполяции [5].

После минимизации, аналогично (2-4) считается ошибка аппроксимации, критерий χ^2 и вероятность гипотезы P_p , с поправкой на то, что для полинома 3-ей степени $\nu_p = N - 4$.

После этого, сравнением полученных величин P_c и P_p устанавливается, которая из гипотез наиболее правдоподобна.

Окончательная вероятность того, является ли данный участок углом вычисляется следующим образом:

$$P = \begin{cases} P_c, P_c > c_p P_p \\ 0, P_c > c_p P_p \end{cases}, P = \begin{cases} P_c, \alpha < \alpha_{\max} \\ 0, \alpha > \alpha_{\max} \end{cases} \quad (6)$$

c_p - задаваемый коэффициент для изменения веса плавно изменяющихся кривых. Также понятно, что углы близкие к 180° - это почти прямые и не представляют практического интереса. α_{\max} - максимально допустимый угол.

Критерии достоверности угла

Чтобы угол представлял собой практическую ценность, он должен иметь достаточно большую длину плеча, быть устойчивым по отношению к изменению длины плеча и вероятность гипотезы должна быть достаточно высокая.

Чтобы иметь возможность оценивать угол по изложенным критериям, строится зависимость $P(d)$ в некотором диапазоне длин плеч $d_{\min} \leq d \leq d_{\max}$.

Достаточно большая длины плеча означает, что средняя длина плеча должна быть больше некоторого порогового значения M_T . Средняя длина плеча вычисляется как:

$$M = \sum_{d=d_{\min}}^{d_{\max}} \rho_d d \quad (8)$$

Критерий устойчивости угла относительно изменения длины плеча выражается через то, что дисперсия длины плеча, должна быть больше порогового значения $D_T = (c_D M_T)^2$, где c_D – параметр алгоритма.

$$D = \sum_{d=d_{\min}}^{d_{\max}} \rho_d (d - M)^2, \quad (9)$$

Условие, что вероятность гипотезы должна быть довольно высокой, выражается в том, что средняя вероятность \bar{P} в диапазоне $\pm\sqrt{D}$ от средней длины плеча M должна быть больше порогового значения D_T .

$$\bar{P} = \frac{1}{2D+1} \sum_{d=M-D}^{M+D} P_d \quad (10)$$

Здесь ρ_d - это плотность вероятности которая находится нормированием обычной вероятности на единицу.

Таким образом, участок кривой, который удовлетворяет всем трем критериям принимается как кандидат в угол.

Фильтрация близкостоящих углов

Как правило, после выбора кандидатов, вокруг хорошо выраженных углов возникает несколько кандидатов в углы, прошедших по всем критериям и необходимо выбрать из этих кандидатов только один наиболее подходящий угол.

Первый из предлагаемых способов фильтрации заключается в фильтрации по максимуму средней вероятности \bar{P} . В этом случае для каждого кандидата рассматривается некая окрестность $\pm \Delta = \max(d_{\min}, Mc_a)$ точек, где c_a – задаваемый коэффициент, и если в этой окрестности существует кандидат в угол с параметром \bar{P} выше, чем у рассматриваемого кандидата, то рассматриваемый кандидат отбрасывается.

Еще один предлагаемый способ фильтрации использует в своей основе принцип центра масс. Если рассматривать позицию угла на кривой как координату, а его среднюю вероятность \bar{P} как вес, то можно найти позицию для угла центра масс для некоторой окрестности $\pm \Delta$:

$$n_{ц.м.} = \frac{\sum_{i=n_{-\Delta}}^{n_{\Delta}} \bar{P}_i n_i}{\sum_{i=n_{-\Delta}}^{n_{\Delta}} \bar{P}_i} \quad (11)$$

где $n_{-\Delta}$ - позиция первого кандидата в угол, который попадает в окрестность $\pm \Delta$ от рассматриваемого, а n_{Δ} - последний. Вероятность такого угла центра масс соответственно равна:

$$P_{ц.м.} = \frac{1}{N_{\pm\Delta}} \sum_{i=-\Delta}^{n_{\Delta}} \bar{P}_i \quad (12)$$

где $N_{\pm\Delta}$ - число кандидатов, попадающих в окрестность $\pm \Delta$.

Имя	Диапазон	Значение по умолчанию
d_{\min}	$d_{\min} \geq 8$	8
d_{\max}	$d_{\max} > d_{\min}$	64
L	$8 \leq L \leq 32$	8
c_{σ}	$0 < c_{\sigma} \leq 1$	0.16
c_p	$0 < c_p \leq 1$	0.75
α_{\max}	$0^\circ < \alpha_{\max} < 180^\circ$	120°
M_T	$d_{\min} \leq M_T \leq d_{\max}$	16
c_D	$0 < c_D \leq 1$	0.3
P_T	$0 \leq P_T \leq 1$	0.4
c_a	$0 < c_a \leq 1$	0.25

После того, как для окрестности каждого из кандидатов найден новый результирующий угол, получается новый набор кандидатов в углы, который фильтруется аналогично первому способу, по максимуму вероятности.

Из изложенных способов

наиболее предпочтителен второй, так как он более устойчив и учитывает всех кандидатов в углы в рассматриваемой окрестности.

Результаты

Разработанный алгоритм детектирования углов тестировался на векторных изображениях полученных после сегментации [4]. Результат векторизации представляет из себя набор довольно зашумленных границ между найденными сегментами.

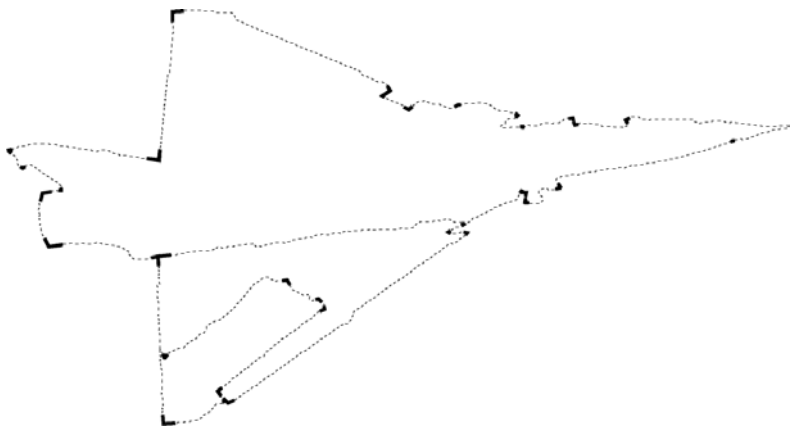
На рисунке 2 показан результат детектирования углов на изображении самолета на фоне неба (рис. 2a). После проведения сегментации ее результат был переведен в векторную форму и выбраны наиболее контрастные границы (рис. 2b).



а) исходное изображение самолета



б) наиболее сильные границы выделенные сегментацией



с) результат детектирования углов на границах (жирными линиями показаны углы)

Рис. 2. Детектирование углов на изображении “Самолет”

После этого было проведено детектирование углов по описанному алгоритму (рис. 2с). В целом, как можно видеть, алгоритм показывает хорошее качество детектирования углов, с малым процентом обнаружения ложных углов и малым процентом пропуска углов и имеет набор параметров, практически не нуждающийся в подстройке под конкретное изображение. В таблице приведен список параметров алгоритма с допустимыми диапазонами и значениями по умолчанию.

Данный алгоритм предполагается использовать в задаче восстановления трехмерных сцен [6] роботом, оснащенным

видеокамерой, в процессе его движения, а также в задаче совмещения нескольких изображений полученных с разных углов зрения видеокамеры в одно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *S.M. Smith, J.M.Brady.* SUSAN - New approach to low-level image processing. Int. journal of computer vision. Volume 23 No.1 P. 45-78, May 1997.
2. *Chetverikov D., Zsolt Szabo.* A Simple and Efficient Algorithm for Detection of High Curvature Points in Planar Curves // Proc. 23rd Workshop of the Austrian Pattern Recognition Group — 1999. — P.175-184.
3. *Bedekar A.S., Haralick R.M., Ramesh V. and Zhang X.* A Bayesian Corner Detector: Theory and Performance Evaluation // ARPA94 — 1994. — P. 703-715.
4. *Минченков М.В., Хельвас А.В., Юрин Д.В.* Алгоритм автоматической сегментации изображений для систем технического зрения // (В этом же сборнике).
5. *Дж.Форсайт., М.Малькольм., К.Моулер.* Машинные методы математических вычислений. — Пер с англ. — М.:Мир,1980. — 280 с.
6. *Conrad I. Poelman, Takeo Kanade.* A Paraperspective Factorization Method for Shape and Motion Recovery: Technical Report CMU-CS-92-208 / CMU Robotics Institute. — 1993.

Получено 29.05.2002