

УДК 519.65

А.С. Смелякова

Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков

ЭЛЛИПТИЧЕСКАЯ АППРОКСИМАЦИЯ С ПОВЫШЕННОЙ ТОЧНОСТЬЮ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРОВ

Рассматривается задача аппроксимации полигонального контура эллипсом, которая возникает при идентификации объектов эллиптической конфигурации в системах технического зрения, иридодиагностике и иных областях. Предлагается эффективный вычислительный метод решения этой задачи, который может использоваться для приближения в среднем и по Чебышеву. Особенностью метода является то, что он обеспечивает повышенную точность идентификации осей u , при наличии иных элементов внутри контура, имеющих радиальную ориентацию, центра эллипса. Приводятся оценки трудоемкости метода как функции точности аппроксимации

эллипс, аппроксимация, точность, идентификация параметров, контурная аппроксимация

Введение

При создании систем технического зрения (СТЗ) и идентификации объектов различной природы возникают задачи контурной аппроксимации (КА), которые связаны с поиском наилучшего приближения для границ объектов, заданных с некоторой избыточностью. Например, после сегментации аэрокосмических снимков в целях мониторинга [1], прогнозирования и оценки обстановки [2, 3], отображения данных об анализируемом регионе. При этом минимизация сложности описания границ важна как для уменьшения затрат памяти для обеспечения передачи данных в реальном масштабе времени, так и для снижения трудоемкости анализа объектов сложного вида.

Вместе с тем, наряду с широко используемыми векторными моделями контуров [4, 5] для многих прикладных задач актуальна эллиптическая аппроксимация [6], где заданную область требуется описать эллипсом. Подобные задачи возникают в иридодиагностике [7], в СТЗ (системы слежения, наблюдения, идентификации и др.), которые связаны с сегментацией и анализом изображений в реальном масштабе времени [6].

Основные методы решения задач этого типа ориентированы на приближение границы в среднем, хотя во многих случаях точность требуется оценивать по Чебышеву, или соотносить ее с иными параметрами, например – с ориентацией оси эллипса [7]. Поэтому возникает проблема построения эффективного метода эллиптической аппроксимации, обеспечивающего поиск наилучшего приближения для различных критериев.

Решению этой задачи и посвящена данная работа. Для наглядности изложения ее решение дается на примере комплекса задач КА, возникающих при идентификации радужки глаза, где эллиптическая аппроксимация столь же важна, как и полигональная.

1. Концептуальная постановка задачи

При решении задач идентификации и прогнозирования на основе анализа изображений объектов различной природы возникает необходимость решения цепочки задач: сегментации, контурной аппроксимации, нормализации и идентификации. В данной работе первый и последний этапы, как представляющие специальные вопросы, не рассматриваются. В этом отношении достаточно считать, что подлежащий аппроксимации контур задан последовательностью точек γ , расстояния между которыми не превышают Δ , а для идентификации полученных объектов достаточно воспользоваться методами вычислительной геометрии [8]. Тогда на содержательном уровне задача аппроксимации граничной полосы эллипсом ставится так: с заданной точностью аппроксимировать границу области Ω , заданную множеством γ , эллипсом Θ . При этом с учетом требований к программным системам для задач рассматриваемого типа, эффективность моделей и методов требуется оценивать по трудоемкости, затратам памяти и точности.

В этой задаче критерии и ограничения могут задаваться в различных комбинациях. Так, если для фильтрации предпочтительна аппроксимация в среднем, то для сохранения локальных особенностей границ – использование метрики Чебышева. Использование же аппроксимантов, получаемых в ε -полосе, по сути, не представляет ни одну из них. Эту ситуацию иллюстрирует актуальная задача анализа выступов "игольчатой" формы, рассматриваемых в картографии, иридодиагностике и др. При использовании критериев типа СКО они срезаются, а построение аппроксиманта в ε -полосе ведет к неоправданному росту трудоемкости. В этом случае адекватным является анализ отклонений по Чебышеву. Однако, из-за сложности задач чебышевской

аппроксимации разработка эффективных численных методов решения задач этого класса не получила эффективного развития.

Помимо актуальности задачи автоматизации распознавания радужки для медицинской диагностики [7] и идентификации личности, она представляет интерес как модельная задача, поскольку на радужке (рис.1) требуется выделять систему объектов, определяемых многоугольными областями (автономное кольцо – 4, пятна и др.) и эллипсами (корень радужки – 6, границу зрачка – 2 и др.). При этом особо точная идентификация эллиптического аппроксиманта (по оси, помимо границы) в иридодиагностике имеет принципиальное значение, поскольку после аппроксимации всех элементов радужки необходимо произвести ее нормализацию, то есть отобразить радужку, с учетом радиальной ориентации ее элементов, на круговую схему проекционных зон (ПЗ) [7].

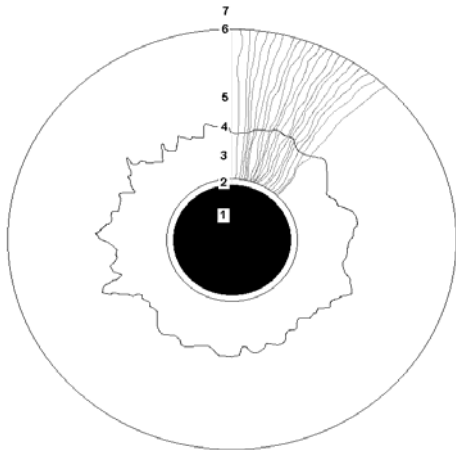


Рис. 1. Структура видимой оболочки глаза.
1 – зрачок; 2 – зрачковая кайма; 3 – зрачковый пояс;
4 – автономное кольцо; 5 – цилиарный пояс;
6 – корень радужки; 7 – белок

В общем случае задачи эллиптической аппроксимации ставятся как задачи среднеквадратного приближения [6]. Для их решения предлагаются различные варианты МНК; также используются преобразования Хафа и генетические алгоритмы [9] с целью минимизации влияния помех. В ряде случаев имеется возможность эффективного выделения эллипсов с фиксированной ориентацией и эксцентриситетом [10]. Однако, для рассматриваемых задач эти модели неприемлемы как вследствие отсутствия данных о сегментации, так и использования иных критериев точности аппроксимации (по метрике и параметрам).

2. Базовые задачи ЭА

Исходная граница (корня) радужки задается ломаной $\gamma = \{g_1, g_2, \dots, g_n\}$. С достаточной точностью ее можно представить эллипсом Θ , большая ось которого L_x может иметь малый наклон α к оси Ox . Этот угол является единственным параметром,

позволяющим идентифицировать горизонтальную ось радужки для нормализации ее изображения в смысле его привязки к осям схемы проекционных зон (ПЗ). Менее критичны в этом отношении центр и длины осей, используемые для сжатия изображения к кругу. Поэтому в отличие от традиционных задач аппроксимации эллипсом в среднем, выдвигаются дополнительные требования к точности идентификации угла α и осей. Хотя для приближения границы корня радужки, как и зрачка, более адекватным является критерий уклонения в среднем, для ряда иных задач целесообразно использовать приближение по Чебышеву. Поэтому в предлагаемом ниже методе допускается использование обоих критериев.

Эллипсы также являются достаточно точными аппроксимантами для лакун и лучей. Эти объекты имеют достаточно большой эксцентриситет, а их угол наклона α , как правило, имеет радиальную ориентацию. К их аппроксимации не предъявляются столь высокие требования, как к границе γ .

Итак, пусть γ – заданная последовательность точек, Θ – эллипс с параметрами $\theta = (C_x, C_y, \alpha, a, b)$, где a, b – его полуоси, $a > b$, а C_x, C_y – координаты центра. В этих условиях задача эллиптической аппроксимации (ЭА) сводится к следующему.

Задача 1. Найти $\theta^* = \arg \min_{\Theta} f(\gamma, \theta)$ при ограни-

чениях Q .

Здесь $f(\gamma, \theta)$ – критерий точности аппроксимации, а ограничения Q определяют условия, накладываемые на параметры эллипса. Пусть u_i – уклонение точки g_i от эллипса Θ , а C^* – оценка его центра. Тогда, соответственно выбору критерия $f(\gamma, \theta)$ приходим к следующим основным классам задачи 1.

$$\text{ЭА в среднем: } f_E(\gamma, \Theta) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n u_i^2. \quad (1)$$

$$\text{ЭА по Чебышеву: } f_{Ch}(\gamma, \Theta) = \max_{i=1, n} u_i. \quad (2)$$

ЭА Для радиальной структуры эллипса:

$$f_C(\gamma, \theta) = \varphi_1 \times \rho(C^*, C) + \varphi_2 \times f(\gamma, \theta);$$

$$\varphi_1, \varphi_2 \geq 0, \varphi_1 + \varphi_2 = 1. \quad (3)$$

Критерий (3) может быть лексикографическим:

$$f_{Lf}(\gamma, \theta): f(\gamma, \theta) \succ \rho(C^*, C); \quad (4)$$

$$f_{L\rho}(\gamma, \theta): \rho(C^*, C) \succ f(\gamma, \theta). \quad (5)$$

Выбор критерия в задаче 1 определяется значимостью параметров аппроксиманта. Например, при аппроксимации корня радужки требования к точности идентификации ее центра и угла наклона осей выше, чем к их линейным размерам, поскольку малые вариации этого параметра могут приводить к

качественным изменениям в расположении элементов радужки относительно схемы ПЗ. При этом в критериях (3) – (5) предполагается, что оценки центра эллипса могут быть получены из иных соображений (по оценке центра пересечения осей лакун и др.) и, для обеспечения адекватности нормализации, они должны быть согласованы с решением задачи 1.

Для решения задачи 1 в случае (1) применение МНК в прямой постановке в вычислительном отношении неэффективно [10], а в случаях (2) и (3) – невозможно, поскольку он ориентирован на аппроксимацию границы в среднем и не предусматривает приоритета в точности идентификации угла α . Отметим также, что для нахождения уклонов ломаной γ от аппроксиманта, необходимо задавать все параметры эллипса.

Поэтому для построения эффективного по трудоемкости и устойчивого по параметрам α и C метода решения задачи эллиптической аппроксимации в общей постановке (1) – (5) предлагается итерационный подход, состоящий из этапов коррекции параметров θ аппроксиманта и эффективного вычисления критерия $f(\gamma, \theta)$ на основе минимизации затрат на расчет уклонов u_i .

3. Вычисление уклонов до эллипса

Пусть эллипс Θ задан уравнением

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1.$$

Прямой метод вычисления уклонов. Расстояние u от точки g до эллипса равно длине отрезка gM_0 , лежащего на нормали к эллипсу в точке M_0 , проходящей через точку g , координаты которой определяются из системы

$$\begin{cases} \frac{x_0^2}{a^2} + \frac{y_0^2}{b^2} = 1; \\ x_0 y_0 \left(\frac{1}{b^2} - \frac{1}{a^2} \right) = \frac{y_0}{b^2} \xi - \frac{x_0}{a^2} \eta. \end{cases} \quad (6)$$

Нахождение по (6) точки $M_{0,i}$ для каждой вершины g_i ломаной γ дает искомые уклоны

$$u_i = \sqrt{(\xi_i - x_{0,i})^2 + (\eta_i - y_{0,i})^2}. \quad (7)$$

Однако, учитывая, что расстояние между соседними точками $g_i, g_{i+1} \in \gamma$ в среднем равно Δ , можно получить существенно более эффективный метод определения этих уклонов.

Пусть $A(\xi, \eta) = g_i, B(p, q) = g_{i+1}$ и $M_0(u, v)$ – известная точка на эллипсе Θ , нормаль из которой проходит через A , а $M_*(s^*, t^*)$ – искомая точка на эллипсе, нормаль из которой проходит через B . Положим, что M_0, M_* лежат в I квадранте. Тогда касательная l_τ к эллипсу в точке M_0 имеет уравнение

$$l_\tau(x, y) \equiv \frac{u}{a^2}x + \frac{v}{b^2}y - 1 = 0. \text{ Обозначим} \\ \alpha = u/a^2, \quad \beta = v/b^2. \quad (8)$$

Поскольку расстояние между точками A, B достаточно мало, оценим положение точки M_1 , принимаемую за M_* , заменяя дифференциал длины дуги эллипса конечной разностью для точек M_0, M_1 с одной стороны, и длиной отрезка касательной Δl между соответствующей парой точек $M_0 W$, где вектор \overline{BW} ортогонален к касательной l_τ . Тогда точка $M_1^0(s, t)$

$$s = u + \frac{\beta}{\alpha^2 + \beta^2} [(\xi - p)\beta + (q - \eta)\alpha]; \quad (9)$$

$$t = b\sqrt{1 - s^2/a^2} \quad (10)$$

дает первое приближение для $M_*(s^*, t^*)$.

По построению уклонение $\delta_0 = \rho(M_1^0, M_*)$ по порядку величины меньше длины дуги Δl , сопоставимой со значением Δ ; иными словами $\delta_0 \sim \Delta/k$, где $k > 5 \div 10$. Этой точности, в целом, достаточно для оценки расстояния от точки B до эллипса.

Однако, если имеют место разрывы границы или требуется большая точность аппроксимации, эту оценку можно уточнить, получая аналогичную оценку M_1^1 по M_1^0 . Тогда, поскольку процедура получения оценки M_1^i сходится и на каждом шаге уменьшает невязку $\delta_i(B)$ по уклонению точки B на порядок (пусть, для определенности, также в k раз), погрешность оценки M_1^i составляет $\delta_i(B) \sim \Delta/k^{i+1}; i = 0, 1, \dots; k \sim 5 \div 10$.

Выраженная числом арифметических операций, трудоемкость расчета координат точки M_i на каждой итерации, соответственно (8) – (10), составляет

$$\kappa_0 \sim 18(\text{оп.}), \quad (11)$$

а вычисление уклонов (7) требует порядка

$$\kappa_p \sim 6(\text{оп.}). \quad (12)$$

Оценим теперь относительную эффективность предложенного метода нахождения точки M_* . При использовании прямого подхода нахождение точки $M(s, t)$ по точке $B(p, q)$ требует решения системы (6) с трудоемкостью одной итерации порядка

$$\kappa_d \sim 25(\text{оп.}) \quad (13)$$

Однако, ввиду отсутствия достаточно точного начального приближения реализация итерационной схемы потребует от 5 до 15 итераций для достижения требуемой точности Δ/k . Той же трудоемкостью будет обладать и метод Ньютона, поскольку

при лучшей сходимости он обладает большей трудоемкостью. Поэтому уже на первой итерации метод (9) – (10) обеспечивает получение оценки точки M_* с требуемой точностью и трудоемкостью (11), на порядок меньшей, чем для прямого подхода; кроме того, он позволяет априорно оценивать трудоемкость по требуемой точности исходных данных Δ .

Поскольку граница корня радужки описывается числом пикселей от 3000 до 5000, или $\bar{N}=4000$ в среднем, трудоемкость получения оценок всех уклонов с точностью Δ составляет

$$\bar{\kappa} = \bar{N} \cdot \kappa_M \approx 70000 \text{ (оп)}. \quad (14)$$

При использовании процессора с частотой 3 ГГц (выполняющего порядка $\kappa_0 = 1,5$ млрд. оп/с) это позволяет за 1 с рассчитать значение любого из критериев (1) – (3) для числа эллипсов порядка

$$V = \frac{\kappa_0}{\bar{\kappa}} \approx 20\,000. \quad (15)$$

4. Базовые оценки параметров эллипса

Рассмотрим метод решения задачи 1 в предположении, что расстояние между соседними точками g_i, g_{i+1} , как и их уклонения от аппроксиманта Θ , в среднем не превышают Δ .

Пусть $G_a = (g, g')$ – пара вершин из γ , расстояние ρ_a между которыми максимально. С учетом погрешности Δ рассмотрим множество пар вершин G'_a , расстояние между которыми удовлетворяет условию

$$\rho \geq \rho_a^* - 2\Delta. \quad (16)$$

Максимальный угол между прямыми, определяемыми парами точек из G'_a , обозначим $2\Delta_\alpha$. Из гладкости Θ и условия (16) получаем, что ось эллипса Θ лежит в Δ_α -окрестности прямой l^* , проходящей через точки g, g' . Пусть эта прямая образует угол α^* с осью исходной системы координат Σ_0 . Примем его за начальное приближение параметра α с интервальной оценкой

$$\alpha \in [\alpha^* - \Delta_\alpha, \alpha^* + \Delta_\alpha]. \quad (17)$$

Пусть оценка угла β для угла наклона малой полуоси по аналогичным множествам G_b, G'_b , имеет вид

$$\beta \in [\beta^* - \Delta_\beta, \beta^* + \Delta_\beta]. \quad (18)$$

Тогда в качестве точечной оценки C_E центра эллипса примем точку пересечения прямых, определяемых множествами G_a, G_b , а в качестве интервальной оценки – минимальный прямоугольник Δ_E со сторонами, параллельными осям координат, содержащий точки пересечения прямых из множеств G'_a, G'_b :

$$C_I(C_x, C_y) \in \Delta_E. \quad (19)$$

Аналогично, по G_a, G_b получим оценки для полуосей

$$a \in [a^* - \Delta_a, a^* + \Delta_a], \quad (\Delta_a = 2\Delta, a^* = \rho_a^*); \quad (20)$$

$$b \in [b^* - \Delta_b, b^* + \Delta_b], \quad (\Delta_b = 2\Delta, b^* = \rho_b^*).$$

5. Лакунарная оценка центра радужки

В типовой ситуации имеет место радиальная ориентация лакун, что позволяет оценить положение центра радужки с большей точностью, чем по контуру γ . Это обусловлено тем, что учет радиальной структуры радужки позволяет исключить влияние искажений на ее периферии, обусловленных не контрастностью физиологической границы радужки.

Лакуны являются симметричными образованиями с осями, в идеальном случае проходящими через центр радужки. Они описываются эллипсами с достаточно большим эксцентриситетом. При этом сохранение радиальной ориентации их осей важно и для задачи нормализации, предусматривающей адекватное отображение лакун на схему ПЗ.

Таким образом, как до нормализации, так и после нее оси лакун должны проходить через центр радужки.

Однако, в силу физиологических причин наличие и точность этой радиальной ориентации для каждой отдельной лакуны ниже, чем для радужки. Воспользуемся этим положением для построения критерия (3).

Пусть $Z = \{L_i\}_{i=1,m}, L_i = (C_{ix}, C_{iy}, \alpha_i)$ – множество лакун, для которых, по (16) – (21) в исходной системе координат $\Sigma_0 \{O, x, y\}$ получены оценки центров C_i и углов наклона $\alpha_i \in [0, \pi)$ больших осей к оси Ox .

Пусть $\Xi_* \{O_*, x_*, \rho, \phi\}$ – полярная система координат с центром O_* и полярной осью O_*x_* , параллельной оси Ox . Тогда необходимое и достаточное условие радиальной ориентации лакуны L_i с полярным углом ϕ_i центра C_i имеет вид

$$\alpha_i = \phi_i. \quad (22)$$

С учетом того, что угол α_i задан с некоторой погрешностью Δ_α , условие (22) примет вид

$$l_i(O_*) \leq \rho(C_i, O_*) \cdot \text{tg}\Delta_\alpha, \quad (23)$$

где $l_i(O_*)$ – уклонение точки O_* от прямой l_i , определяющей ось лакуны.

Однако, некоторые лакуны могут не иметь радиальной ориентации, а условие (23) может быть использовано, только если известно положение точки O_* .

Поэтому для выявления радиально ориентированных лакун и определяемой ими оценки центра радужки предлагается

Метод лакунарного оценивания центра радужки C_L ($m > 2$).

Шаг 0. Начальная установка. Полагаем $q = m$, $J_q = \{1, \dots, m\}$. Находим $M_q = C_q^2$ точек пересечения G_{ij} прямых l_i, l_j ; $i, j \in J, i \neq j$.

Шаг 1. Оценивание лакунарного центра радужки.

Оцениваем центр радужки C_q для множества J_q

$$C_{q,x} = \frac{1}{M_q} \sum_{i,j \in J_q} G_{ij,x}, \quad C_{q,y} = \frac{1}{M_q} \sum_{i,j \in J_q} G_{ij,y}, \quad (24)$$

находим его уклонения $\rho_{q,j} = l_j(C_q)$ от осей лакун и упорядочиваем их: $\rho_{q,j_1} \geq \rho_{q,j_2} \geq \dots \geq \rho_{q,j_k}$.

Шаг 2. Проверка радиальной ориентации лакун. В порядке убывания значений уклонений ρ_{q,j_k} проверяем выполнение условия (23):

– если для всех $j \in J_q$ условие выполнено, полагаем $C_L = C_q$. Переход к шагу 3;

– если j_k – первый индекс, для которого условие (23) не выполнено, исключаем его из рассмотрения $J_q := J_q \setminus j_k$ и полагаем $q := q - 1$. При этом:

– если $q > 2$ – переход к шагу 1;

– иначе радиально-ориентированная система лакун отсутствует; переход к шагу 3.

Шаг 3. Конеч.

Если применение этого метода привело к получению системы лакун J_q ($q > 2$), то каждая из них удовлетворяет условию (23) относительно точки C_q , которую, по этой причине, и принимаем за лакунарную оценку центра радужки C_L , погрешность которой можно оценить выпуклой оболочкой W_L множества точек G_{ij} ($i, j \in J_q$). При существовании радиально ориентированной системы лакун J^* сходимость этого метода обусловлена малой вариаций углов наклона лакун из J^* относительно радиуса, последовательным уточнением положения их центра за счет выведения из рассмотрения экстремально ориентированных лакун и использования статистически устойчивой оценки по среднему (24).

Оценки C_L, C_E центра радужки могут совпасть лишь в идеальном случае. Вместе с тем, каждая из них имеет свои модельные преимущества: C_L отражает геометрический центр радиальной структуры радужки, а C_E – ее форму. Поэтому если обе оценки состоятельны, целесообразно использовать каждую из них. Для этого предлагается рассматривать свертку следующего вида, которая учитывает значимость оценок пропорционально их точности

$$C_{*\xi} = \frac{C_{E\xi}/d_1 + C_{L\xi}/d_2}{1/d_1 + 1/d_2}, \quad \xi \in \{x, y\}, \quad (25)$$

где d_1, d_2 – диаметры окрестностей Δ_E, W_L . Соответственно, в качестве интервальной оценки центра радужки рассмотрим прямоугольную оболочку Δ^* для d^* -окрестности точки C^* , где

$$d^* = \max \{d_1, d_2, \rho(C^*, C_E), \rho(C^*, C_L)\}. \quad (26)$$

Полученные оценки для α, a, b и C^* принимаем за начальное приближение для решения задачи 1.

6. Метод решения задачи 1

С целью снижения трудоемкости решения задачи 1, будем искать решение методом последовательных приближений на дискретном подмножестве полученных интервальных оценок параметров с последующим их уточнением в континуальных окрестностях.

Пусть $\text{ceil}(x)$ – наименьшее целое, большее или равное x ; s_x, s_y – стороны прямоугольника Δ^* для C^* , а Δ_α – достаточно малый угол, определяющий допустимые отклонения оси эллипса в (17). Обозначим $k_a = k_b = 2$ и положим

$$k_x = \text{ceil}(s_x / \Delta), \quad k_y = \text{ceil}(s_y / \Delta); \quad (27)$$

$$k_\alpha = \text{ceil}\left(\frac{a^* \cdot \sin \Delta_\alpha}{\Delta}\right), \quad \Delta_{k_\alpha} = \frac{\Delta_\alpha}{k_\alpha}. \quad (28)$$

Тогда с учетом оценок (17) – (21) получим, что с точностью до погрешности исходных данных решение задач (1) – (3) лежит на сетке S с центрами в средних:

$$\begin{cases} \alpha \in \alpha^* \pm \Delta_{k_\alpha} \cdot i_\alpha, & i_\alpha = 0, 1, \dots, k_\alpha; \\ C_x \in C_x^* \pm \Delta \cdot i_x, & i_x = 0, 1, \dots, k_x; \\ C_y \in C_y^* \pm \Delta \cdot i_y, & i_y = 0, 1, \dots, k_y; \\ a \in a^* \pm \Delta \cdot i_a, & i_a = 0, 1, \dots, k_a; \\ b \in b^* \pm \Delta \cdot i_b, & i_b = 0, 1, \dots, k_b. \end{cases} \quad (29)$$

С учетом заданной точности представления ломаной γ , число узлов сетки S можно оценить величиной

$$k_S \sim 5^5 \approx 3000. \quad (30)$$

Пусть $f(i_\alpha, i_x, i_y, i_a, i_b)$ – значение функции $f(\gamma, \theta)$ соответственно рассматриваемой задаче (1) – (5), f^* – ее значение для некоторого набора параметров θ^* , а $Q_{k\Delta}$ – критерий останова (по точности, трудоемкости).

Процедура 1 (перебор параметров по сетке S).

Шаг 1. Полагаем $i_\alpha = i_x = i_y = i_a = i_b = 0$; $f^* := f(i_\alpha, i_x, i_y, i_a, i_b)$, $\theta^* := (i_\alpha, i_x, i_y, i_a, i_b)$.

Шаг 2. Изменяя параметры $(i_\alpha, i_x, i_y, i_a, i_b)$ в (29) как во вложенных циклах, для каждого набора:

– рассчитываем значение функции $f = f(\gamma, \theta)$.

Если выполняется условие $f(i_\alpha, i_x, i_y, i_a, i_b) < f^*$ и

удовлетворяются ограничения Q , полагаем $f^* := f(i_\alpha, i_x, i_y, i_a, i_b)$, $\theta^* := (i_\alpha, i_x, i_y, i_a, i_b)$;

– проверяем выполнение критерия $Q_{k\Delta}$; в случае выполнения – переходим к шагу 3.

Шаг 3. Принимаем набор параметров θ^* в качестве решения рассматриваемой задачи.

Если точность решения θ^* , полученного с помощью процедуры 1, недостаточна, предлагается уточнять его с помощью случайного поиска с адаптацией на рекорд $\theta^* = (\alpha^*, C_x^*, C_y^*, a^*, b^*)$ посредством варьирования параметров по закону Симпсона $h(t; m, l)$ со средним m и размахом $2l$. С учетом полученных интервальных оценок параметров аппроксиманта получим следующую схему генерации параметров искомого эллипса

$$\begin{cases} \alpha = h(\alpha; \alpha^*, \Delta_{k\alpha}); \\ C_x = h(C_x; C_x^*, \Delta); \\ C_y = h(C_y; C_y^*, \Delta); \\ a = h(a; a^*, \Delta); \\ b = h(b; b^*, \Delta). \end{cases} \quad (31)$$

Процедура 2 (стохастическая оптимизация).

Шаг 1. Полагаем $\theta^{**} = \theta^*$; $f^{**} := f(\gamma, \theta^{**})$.

Шаг 2. Генерируем вектор $\theta = (\alpha, C_x, C_y, a, b)$ по (31) и вычисляем значение функции $f(\gamma, \theta)$.

Если $f(\gamma, \theta) < f^{**}$ и выполнены ограничения Q , полагаем $f^{**} := f(\gamma, \theta)$, $\theta^{**} := \theta$.

Шаг 3. При удовлетворении критерия $Q_{k\Delta}$ переходим к шагу 4, иначе – к шагу 2.

Шаг 4. Конец. Принимаем набор параметров θ^{**} в качестве решения задачи 1.

Предложенный подход к решению задачи 1 для критериев (1) – (5), состоящий в применении процедур 1 и 2 назовем **методом адаптивной эллиптической аппроксимации**.

Трудоемкость полного перебора вариантов аппроксимантов по порядку величины определяется трудоемкостью (14) расчета значений функционала на каждой итерации. Поскольку для типового варианта (30) рассматривается порядка k_S итераций, с учетом (15) получаем, что для решения задачи 1 требуется порядка

$$T \approx \frac{k_S}{V} = \frac{3000}{20000} \sim 0,15 \text{ (с)}. \quad (32)$$

Поэтому, даже если для применения процедуры 2 использовать в 5 раз больше итераций, чем для полного перебора (по порядку величины это соответствует полному перебору при двукратном уменьшении шага дискретизации для трех параметров), общее время решения задачи 1 составит величину порядка 1 – 2 с, что является необходимой предпосылкой для подбора весовых коэффициентов,

когда специалист имеет возможность настроить алгоритм обработки на яркостно-контрастные и текстурные особенности конкретного изображения.

Следовательно, все задачи эллиптической аппроксимации с функционалами вида (1) – (5) и с настройкой на радиальную структуру радужки могут быть с требуемой точностью решены за секунды, то есть – в реальном масштабе времени.

Выводы

Предложенные в работе модель и метод эллиптической аппроксимации допускают рассмотрение различных мер уклонения и возможность повышения точности приближения в отношении отдельных параметров аппроксиманта, обеспечивая при этом решение практических задач в реальном масштабе времени.

В свою очередь, обеспечение повышенной точности эллиптической аппроксимации создает предпосылки для более точного решения задач нормализации и идентификации объектов, расположенных в области аппроксиманта.

Список литературы

1. Моніторинг надзвичайних ситуацій / Ю.О. Абрамов, Є.М. Грінченко, О.Ю. Кірючкін, П.А. Коротинський и др. – Х.: АЦЗУ, 2005. – 530 с.
2. Ходаков В.Е., Граб М.В. Моделирование системы управления природными пожарами // Вестник ХГТУ. – 2001. – № 1 (10). – С. 261-265.
3. Коба К.Н. Модели и методы решения задач оценки распределения агрессивной среды при техногенных авариях // АСУ и приборы автоматики. – 2003. – № 123. – С. 72-80.
4. Есилевский В.С., Кузнецов В.Н., Каменюк Н.Л. Проблемы создания картографической информационной системы // Радиоэлектроника и информатика. – 2004. – № 2. – С. 155-159.
5. Лесная Н.С., Смелякова А.С. Полигональная аппроксимация границ невыпуклых областей // Радиоэлектроника и информатика. – 2005. – № 3. – С. 73-82.
6. Cui Y., Weng J., Reynolds H. Optimal parameter estimation of ellipses // Image Analysis and Processing, Springer Berlin / Heidelberg. – V. 974/1995. – P. 471-476.
7. Вельховер Е.С., Ананин В.Ф. Иридология: теория и методы. – М.: РУДН и Биомединформ, 1992. – 296 с.
8. Препарата Ф., Шеймос М. Вычислительная геометрия. – М.: Мир, 1989. – 480 с.
9. Kanatani K. Ellipse Fitting with Hyperaccuracy // Computer Vision (ECCV 2006), Springer Berlin/Heidelberg. – 2006. – V. 3951. – P. 484-495.
10. Maybank S. J. Application of the Fisher-Rao Metric to Ellipse Detection // International Journal of Computer Vision. – 2007. – V. 72. – № 3. – P. 287-307.

Поступила в редколлегию 4.07.2007

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.П. Пугятин, Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства им. П. Василенко, Харьков.