

УДК 681.3.07

В.Г. Калиманов

**ПОИСК ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗОБРАЖЕНИЙ
ГЛАЗА В ПОЛЯРИЗОВАННОМ СВЕТЕ****Введение**

Ежегодно в Украине специалисты выявляют косоглазие в среднем у 50 тысяч детей. Это не только косметический недостаток, но и серьезное заболевание, которое, в конечном счете, ведет к нарушению зрительного восприятия. Косоглазие встречается сегодня по различным данным от 0,5% до 2% детей. В настоящее время практически единственным объективным методом диагностики структурных и структурно-функциональных нарушений глазодвигательных мышц является поляризационно-оптический метод, основанный на исследовании оптической анизотропии роговицы глаза в поляризованном свете [1,2]. Роговица живого глаза оптически анизотропна, что обусловлено ее составом, строением и приложенными к ней усилиями со стороны глазодвигательных мышц и внутриглазного давления.

Форма интерференционной картины, наблюдаемой на роговице живого глаза в поляризованном свете, во многом зависит от силы действия и места прикрепления прямых глазодвигательных мышц к склере. Исследуя геометрические параметры интерференционной картины, можно определить какая из мышц вызывает косоглазие и разработать тактику хирургического лечения. Однако неадекватность и недостоверность извлекаемой из изображений информации, ее избыточность, и в то же время дефицит применительно к проблемно-ориентированной области, неоднозначность трактовок результатов, а главное – недостаточное развитие на современном этапе методов цифровой обработки изображений приводят к необходимости синтеза метода высокоточного измерения подобных геометрических характеристик объектов (в частности, изохром первого порядка) на изображениях, регистрируемых в поляризованном свете. Цель работы – синтез технологии автоматизации диагностики патологии глазодвигательных мышц. Для этого необходимо определить

© Калиманов В.Г., 2009

геометрический центр роговицы глаза и геометрические параметры интерференционной картины (отрезки диагоналей интерференционного ромба, углы между ними), которые являются основными информативными признаками.

Постановка задачи и анализ путей решения

Пусть изображение $B(x, y)$, заданное функцией распределения яркостей (цветов), определено в поле зрения $D \subset \mathbb{R}^2$. Рассмотрим множество всех непустых подмножеств поля зрения $\mathcal{P}(D)$. Выделим на нем систему подмножеств $\{S_\alpha\}$, $\alpha = 1, 2, \dots$ такую, что каждое семейство областей однородности (в широком смысле этого слова) S_α

состоит из конечного числа элементов $\mathcal{P}(D)$ и $S_\alpha = \bigcup_{\beta=1}^{\gamma_\alpha} s_\beta^\alpha = D$, где γ_α – количество элементов α -го разбиения или покрытия. Если $\forall \beta' \neq \beta'' \in \{1, 2, \dots, \alpha_\gamma\} s_{\beta'}^\alpha \cap s_{\beta''}^\alpha = \emptyset$, то речь идет о строгой сегментации, в

противном случае, когда возможны пересечения областей, т.е. нет возможности отнесения некоторых пикселей лишь к одной области, речь идет о нечеткой сегментации. В первом случае в качестве основы группообразования пикселей берется некоторое отношение эквивалентности, экспликацией которого является понятие «обобщенного равенства», а во втором – толерантности, т.е. «обобщенного сходства». Ясно, что учет априорной информации, специфики предметно-ориентированной области должны обеспечивать переход от покрытий к разбиениям. Таким образом, сегментация изображения – это реализация отображения $\mathcal{F} : B(x, y) \rightarrow S_\alpha$, где среди

элементов семейства разбиений $\{S_\alpha\}$ необходимо выбирать те, которые в некотором смысле наилучшим образом семантически соответствуют прикладной интерпретации изображения. При этом очевидно, что необходимым условием строгой сегментации изображений является условие

$$\forall (x', y') \in s_{\beta'}^\alpha, \forall (x'', y'') \in s_{\beta''}^\alpha : \beta' \neq \beta'' \Rightarrow \mathcal{F}(B(x', y')) \neq \mathcal{F}(B(x'', y''))$$

Итак, основной задачей является поиск разумного компромисса между недостаточной (в один класс эквивалентности кроме интересующего объекта попадают фоновые объекты или их части) и

чрезмерной (части интересующего объекта принадлежат различным элементам разбиения) сегментацией.

Ретроспективный анализ известных методов [3-5] применительно к задаче сегментации изображений глаз в поляризованном свете позволяет заключить: ни один из них при непосредственном использовании не может обеспечить ни валидности сегментации, ни требуемой точности. Иначе говоря, необходимо осуществить разумное комплексирование известных алгоритмов или их фрагментов на основе учета специфики решаемой задачи. Укажем основные отправные моменты.

Во-первых, необходимо учитывать вариации получения изображений. Прежде всего, следует подчеркнуть потенциальные различия в положении радужки в поле зрения. Высокоточное позиционирование (центрирование) можно осуществить на базе выделения изображения радужки с последующей аппроксимацией контура. При этом необходимо учесть, что достоверную информацию может давать только некоторый фрагмент границы радужки, т.е. алгоритм аппроксимации должен обеспечивать высокоточную аппроксимацию окружности на базе обработки лишь множества точек сегмента.

Во-вторых, отсутствие требований по обработке изображения в реальном времени создает предпосылки для последовательного уточнения вычислений и принятых решений. Другими словами, после очередного шага сегментации можно возвращаться к анализу исходного изображения, точнее говоря, – его фрагменту (например, зрачку), не включающему в себя отбрасываемые фоновые компоненты. Более того, реобработку можно выполнять с учетом различного шага дискретизации.

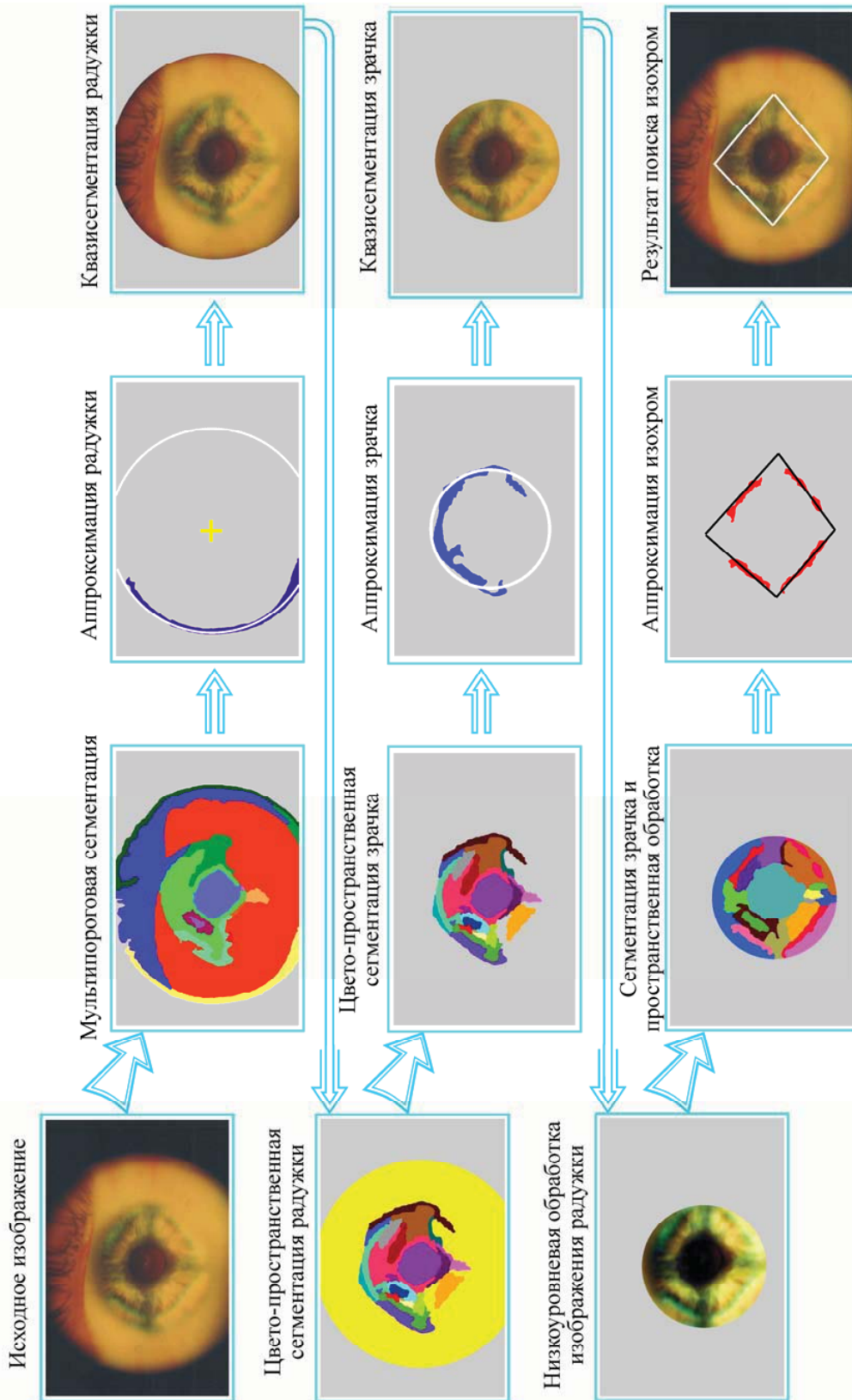
Поиск изохром первого порядка

Схема обработки представлена на рис. 1, где каждое изображение иллюстрирует результат текущего этапа обработки.

На первом этапе, на базе соотношений

$$B_c(i, j) = \begin{cases} 1, B(i, j) \in V_1; \\ 2, B(i, j) \in V_2; \\ \dots\dots\dots \\ p, B(i, j) \in V_p; \\ 0, B(i, j) \notin V_1 \times V_2 \times \dots \times V_p, \end{cases}$$

СХЕМА ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПРИ ПОИСКЕ ИЗОХРОМ



где декартово произведение $V_1 \times V_2 \times \dots \times V_p$ определяет уровни яркостной (цветовой) однородности по гистограммам, выполняется мультипороговая сегментация при низком пространственном разрешении и огрубленных перекувантованных яркостных (цветовых) функциях.

После мультипороговой первичной сегментации выполняется традиционная разметка областей, которая обеспечивает входные данные для дальнейшего анализа. Предположим, поле зрения D разбито на K кластеров s_β , $\beta = \overline{1, K}$ с количеством элементов в каждом n_β . Иначе говоря, $D = \bigcup_{\beta} s_\beta$, и как уже отмечалось, $\forall \beta', \beta'' \in \{1, 2, \dots, K\}: \beta' \neq \beta'' \Rightarrow s_{\beta'} \cap s_{\beta''} = \emptyset$. Пользуясь положениями двухфакторного дисперсионного анализа, полагая $z \in \mathbb{R}^2$, рассмотрим средние в каждой области

$$m_\beta = \frac{1}{n_\beta} \sum_{z \in s_\beta} z$$

и общее среднее

$$m = \frac{1}{n} \sum_{z \in D} z,$$

где $n = \text{card } D = \sum_{\beta} n_\beta$.

Тогда, определяя «внутрикластерную» и «межкластерную» дисперсии соответственно

$$d' = \sum_{\beta=1}^K \sum_{z \in s_\beta} \|z - m_\beta\|^2, \quad d'' = \sum_{z \in D} \|z - m\|^2,$$

где $\|\circ\|^2$ – евклидова норма, получаем критерий

$$C = (d'' - d') / d'.$$

Очевидно, что чем больше значение C , тем лучше области разделены, а внутренние элементы более «концентрированы» и наоборот. Таким образом, пересчитывая C по каждый сегментированной области и вводя обозначения

$$C^* = \frac{1}{n} \sum_{\beta=1}^K J_\beta \text{card } s_\beta,$$

получаем критерий: необходимо минимизировать C^* по всем возможным разбиениям для фиксированного числа областей. Действительно, если сегментация удачна (области однородны),

значения C для каждой области малы, а следовательно, и C^* стремится к нулю.

На втором этапе путем анализа признаков последовательно объединенных областей, выбирая наилучшие по критериям Ваделла, Гортон, Пентланда, Пирарда, Вентворса [3], с учетом ограничений по площади выбираются области, которые могут адекватно аппроксимироваться окружностями. При этом аппроксимация выполняется либо по границе области, либо по ее скелетону, а каждая область подвергается морфологической фильтрации.

Третий этап фактически соответствует квазипороговой сегментации

$$V_c(i, j) = \begin{cases} B(i, j), & (i, j) \in O; \\ 0, & (i, j) \notin O, \end{cases}$$

после которой (с учетом предварительной обработки полученного фрагмента) фактически повторяются все описанные процедуры, продуцирующие в результате выделенное изображение зрачка. Низкоуровневая обработка (эквализация гистограмм, контрастирование, медианная фильтрация) позволяет получить достаточно детальную сегментацию зрачка. После морфологической обработки ищутся области, являющиеся частями изохром, скелетоны которых аппроксимируются отрезками прямых. В итоге получаем ромбовидную фигуру – изохрому первого порядка.

Рассмотрим теперь особенности аппроксимации окружностей. Дополнительно к трем очевидным параметрам a, b, R Спас [6] предложил оценивать n параметров $\varphi_1, \dots, \varphi_n$. Тогда целевая функция принимает вид

$$f = \sum_{i=1}^n (x_i - x'_i)^2 + (y_i - y'_i)^2 = \sum_{i=1}^n (x_i - a - R \cos \varphi_i)^2 + (y_i - b - R \sin \varphi_i)^2, \quad (1)$$

которая, тем самым, зависит от $n+3$ параметров $(a, b, R, \varphi_1, \dots, \varphi_n)$. Расширение параметрического пространства дает возможность проводить двухэтапную минимизацию (1): отдельно по параметрам окружности (a, b, R) и по углам $(\varphi_1, \dots, \varphi_n)$. Такой подход обеспечивает монотонную сходимость при итерационной минимизации функции f .

Если мы зафиксируем угловые параметры $\varphi_1, \dots, \varphi_n$, то f является квадратичной по отношению к a, b, R , т.е. ее минимум ищется приравниванием нулю частных производных

$\partial f/\partial a, \partial f/\partial b, \partial f/\partial R$ и решением полученной системы линейных уравнений. Обозначая $r_i = \cos \varphi_i, s_i = \sin \varphi_i$, после несложных преобразований получаем

$$\begin{cases} a + \bar{r}R = 0, \\ b + \bar{s}R = 0, \\ \bar{r}a + \bar{s}b + R = \bar{x}\bar{r} + \bar{y}\bar{s}, \end{cases} \quad (2)$$

где $\bar{r} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n r_i, \bar{s} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n s_i, \bar{x}\bar{r} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i r_i, \bar{y}\bar{s} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i s_i$.

Полагая $\bar{x} = 0, \bar{y} = 0$, иначе говоря, перенося центр системы координат в центр тяжести множества аппроксимируемых точек, получаем решение системы (2)

$$a = -\bar{r}R, b = -\bar{s}R, R = \frac{\bar{x}\bar{r} + \bar{y}\bar{s}}{1 - \bar{r}^2 - \bar{s}^2}. \quad (3)$$

Необходимо подчеркнуть, что на данном этапе параметры $\varphi_1, \dots, \varphi_n$ фиксированы, т.е. (3) обеспечивает глобальный минимум квадратичной функции f .

Если мы зафиксируем параметры a, b, R , то, принимая во внимание, что в (1) каждое i -ое слагаемое зависит лишь от одного угла φ_i , то минимизация f по параметрам $\varphi_1, \dots, \varphi_n$ сводится к поиску минимума расстояния между точкой данных (x_i, y_i) и точкой $(x_i - a - R \cos \varphi_i, y_i - b - R \cos \varphi_i)$, лежащей на окружности, т.е. требуется минимизировать

$$d_i^2 = (x_i - a - R \cos \varphi_i)^2 + (y_i - b - R \cos \varphi_i)^2.$$

Глобальный минимум в этом выражении достигается при выборе ближайшей точки на окружности, которая определяется углом φ_i . Нетрудно заметить, что

$$\cos \varphi_i = \frac{x_i - a}{\sqrt{(x_i - a)^2 + (y_i - b)^2}}, \quad \sin \varphi_i = \frac{y_i - b}{\sqrt{(x_i - a)^2 + (y_i - b)^2}}. \quad (4)$$

Таким образом, путем альтернатиции алгоритм Спаса осуществляет глобальную минимизацию функции f : первоначально находится глобальный минимум по $\varphi_1, \dots, \varphi_n$ при фиксированных значениях a, b, R , а затем ищется глобальный минимум по a, b, R при фиксированных $\varphi_1, \dots, \varphi_n$. Поскольку на каждом шаге ищется глобальный минимум, значение f должно все время убывать: это главное достоинство алгоритма.

Следует заметить, что на практике значения $\varphi_1, \dots, \varphi_n$ нас не интересуют – достаточно знать $r_i = \cos \varphi_i, s_i = \sin \varphi_i$, которые легко находятся при помощи выражений (4). Итак, окончательно алгоритм аппроксимации окружностей сводится к двум шагам:

- вычисление r_i, s_i по известным из предыдущего шага итерации a, b, R ;
- уточнение a, b, R по формулам (3).

Заключение

Вариации степени детализации цифровой формы представления изображений обеспечивают последовательный поиск областей интереса в поле зрения при разумном количестве элементов разбиения, индуцированного на каждом шаге алгоритмом сегментации. Признаки формы отдельных областей или их комбинаций представляют собой достаточный инструментарий для поиска некоторых «опорных» фрагментов изображений с целью последовательного уточнения результатов сегментации. В итоге можно получать валидные результаты интерпретации визуальной информации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пеньков М.А. Поляризационный метод исследования роговицы глаза /М.А. Пеньков, Р.М. Тамарова, М.Л. Кочина // Новости медицинской техники. – ВНИИМП. – М., 1982. – Вып.1. – С. 27-30.
2. Кочина М.Л. Поляризационно-оптические свойства роговой оболочки глаза /М.Л. Кочина // Актуальные вопросы офтальмологии. – Харьков, 1980. – С.45-47.
3. Jahne В. Digital image processing / В. Jahne. – Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag. – 2002. – 585 P.
4. Russ J.C. The image processing handbook / J.C. Russ. – N.Y.: CRC Press Taylor & Francis Group. – 2008. – 817 P.
5. Insight into images. Principles and practice for segmentation, registration and image analysis / T.S. Yoo, ed. – Wellesey: AK Peters Ltd. – 2004. – 393 P.
6. Spath H. Least-squares fitting by circles / H. Spath // Computing. – Vol. 57, No 9. – 1996. – P. 179–185.

Получено 20.02.2009г.