

ВЫДЕЛЕНИЕ ИНФОРМАТИВНЫХ ПРИЗНАКОВ НА ОСНОВЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ПОЛИНОМОВ ЦЕРНИКЕ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ПАТОЛОГИЯХ РОГОВИЦЫ ЧЕЛОВЕЧЕСКОГО ГЛАЗА*П.А. Хорин¹, Н.Ю. Ильясова^{1,2}, Р.А. Парингер^{1,2}*¹ Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара, Россия,² Институт систем обработки изображений РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Самара, Россия**Аннотация**

Исследование посвящено анализу аберрации волнового фронта при изменении кривизны поверхности роговицы человеческого глаза. Анализ выполнен на основе представления аберраций передней и задней поверхности роговицы в виде суперпозиции функций Цернике. Объектом исследования являются весовые коэффициенты полиномов Цернике. Данные были получены в ряде клинических испытаний в глазной клинике Бранчевского. Был проведен анализ наиболее информативных весовых коэффициентов с точки зрения классификации пациентов по определенным диагнозам. Было произведено сравнение результатов классификации по тридцати признакам как на передней, так и на задней поверхности роговицы, а также по наиболее информативным признакам. Ранжирование признаков осуществлялось по критерию информативности для решения конкретной задачи классификации. При проведении исследований информативность оценивалась на основе значений критерия делимости. Дополнительная оценка информативности проводилась путём вычисления ошибки классификации методом К-средних. В результате анализа выделены базисные функции Цернике, наиболее информативные для определённых патологий глаза.

Ключевые слова: аберрации роговицы, функции Цернике, миопия человеческого глаза, классификация, признаковое пространство, анализ информативности признаков.

Цитирование: Хорин, П.А. Выделение информативных признаков на основе коэффициентов полиномов Цернике при различных патологиях роговицы человеческого глаза / П.А. Хорин, Н.Ю. Ильясова, Р.А. Парингер // Компьютерная оптика. – 2018. – Т. 42, № 1. – С. 159-166. – DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-1-159-166.

Введение

Исследования связаны с областью дифференцированной диагностики оптических структур глаза на основе анализа аберраций высокого порядка фокусирующей системы. Данная работа, согласно стратегии научно-технологического развития Российской Федерации, относится к приоритетным направлениям, а именно к «Переходу к персонализированной медицине, высокотехнологичному здравоохранению и технологиям здоровьесбережения».

Известно, что большую часть информации человек получает с помощью глаз [1]. Качество жизни снижается с падением уровня зрения. Наука накопила огромный опыт в борьбе с глазными болезнями, который показал, что основной проблемой являются возрастные изменения в оптической системе глаза, которые можно оценить через волновые аберрации.

Анализ волнового фронта на основе разложения по базису Цернике [2] облегчает диагностику в клинической офтальмологии. Он позволяет создавать наиболее совершенные линзы, обеспечивающие самое высокое на сегодняшний день качество зрения.

Существующие клинические аберрометры обеспечивают достаточно точные измерения отклонения волнового фронта глаза [3–6]. При этом измеряются аберрации высокого порядка, позволяющие оценить индивидуальные отклонения волнового фронта, в том числе связанные с профессиональной деятельностью или возрастными изменениями, с целью оптимизации оптической (контактными или внутриглазными линзами) или хирургической коррекции человеческого глаза.

Расширение методов зондирования волнового фронта привело к новому взгляду на значение рефракционных ошибок в клинической офтальмологии. Клинические аберрометры обеспечивают детальные измерения аберраций волнового фронта глаза. Распределение и вклад каждой аберрации высшего порядка к общей аберрации волнового фронта теперь может быть точно определён и предсказуем в индивидуальном порядке.

Измерение аберраций оптических структур глаза имеет важное значение и для хирургии. Возможность диагностирования аберраций оптических структур во время рутинного приёма позволит проводить правильную интерпретацию клинических данных и снизит количество ошибок в выборе тактики лечения [7].

В данной работе особое внимание уделяется именно передней и задней поверхностям роговицы, так как их аберрации поверхностей очень важны при формировании изображения оптической системой глаза [8]. Кроме того, коррекцию именно этих поверхностей удобно осуществлять при оперативных вмешательствах [9–10].

Исследование, представленное в работе, посвящено анализу аберрации волнового фронта при изменении кривизны поверхности роговицы человеческого глаза, основной задачей которого является выделение наиболее информативных признаков при проведении классификации пациентов с различными патологиями роговицы глаза на основе коэффициентов полиномов Цернике. Полученные данные рекомендуются учитывать при корректировке кривизны

поверхности роговицы глаза для улучшения качества зрения пациента [11].

Модель формирования изображения

Полиномы Цернике выражаются следующей формулой [2]:

- чётный полином: $Z_n^m(\rho, \varphi) = R_n^m(\rho) \cos(m\varphi)$,
- нечётный полином: $Z_n^{-m}(\rho, \varphi) = R_n^m(\rho) \sin(m\varphi)$,

где

$$R_n^m(\rho) = \sum_{k=0}^{\frac{n-m}{2}} \frac{(-1)^k (n-k)!}{k! \left(\frac{n+m}{2} - k\right)! \left(\frac{n-m}{2} - k\right)!} \rho^{n-2k} \quad (1)$$

Аберрации волнового фронта могут быть представлены с помощью полиномов Цернике [12]. Так:

- дефокусировка: $Z_2^0(\rho, \varphi) = (2\rho^2 - 1)$,
- сферическая аберрация 3-го порядка: $Z_4^0(\rho, \varphi) = (6\rho^4 - 6\rho^2 + 1)$,
- дисторсия: $Z_1^1(\rho, \varphi) = \rho \cos \varphi$,
- кома: $Z_3^1(\rho, \varphi) = (3\rho^3 - 2\rho) \cos \varphi$,
- астигматизм $Z_2^2(\rho, \varphi) = \rho^2 \cos 2\varphi$.

Изображение на выходе дифракционного анализатора аберраций представляет собой набор корреляционных пиков, интенсивность которых пропорциональна вкладу соответствующего полинома Цернике

(и связанной с ним аберрацией) в исследуемый волновой фронт [13 – 18]. Угловая зависимость полиномов Цернике может быть представлена либо через косинусно-синусные, либо экспоненциальные функции [17]. В последнем случае обеспечивается не зависящее от углового поворота детектирование волновых аберраций.

Аберрации волнового фронта, встречающиеся в оптических системах, обычно описываются в терминах функций Цернике следующим образом [12]:

$$W(\rho, \varphi) = \exp[i\psi(\rho, \varphi)], \quad (2)$$

$$\psi(\rho, \varphi) = \sum_{n=0}^N \sum_{m=-n}^n c_{nm} Z_{nm}(\rho, \varphi). \quad (3)$$

Для получения данных по аберрациям оптической системы был использовался аберрометр глазной клиники Бранчевского WaveLight Oculyzer II [19].

WaveLight Oculyzer II – это диагностический прибор, разработанный для определения характеристик и исследования глаза. Он разработан для визуализации передней части глаза, которая включает: роговицу, зрачок, переднюю камеру и хрусталик глаза. Это устройство измеряет форму роговой оболочки и разработано специально для офтальмологов. Главным преимуществом для данной исследовательской работы является то, что WaveLight Oculyzer II выполняет анализ передней и задней поверхностей роговицы и позволяет получить разложение по функциям Цернике (рис. 1).

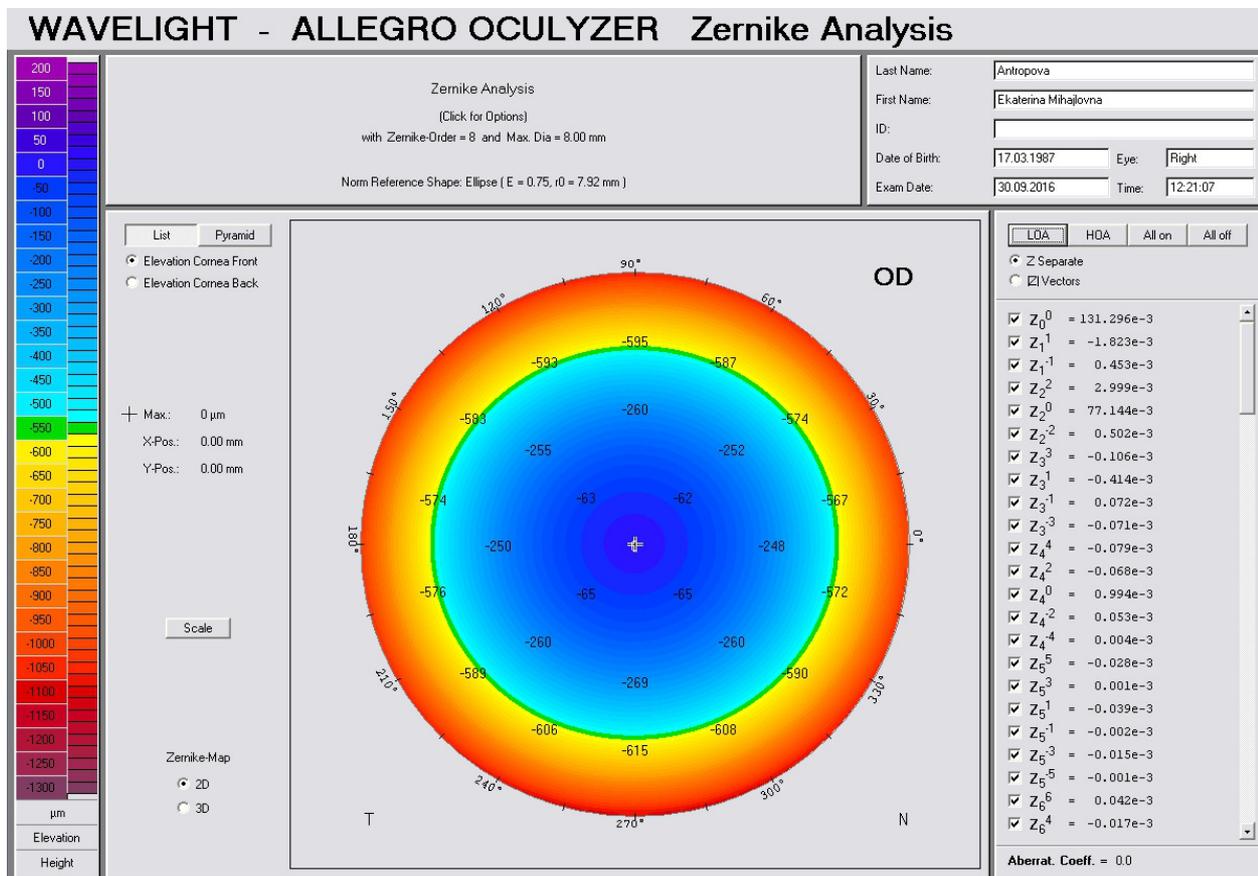


Рис. 1. Пример анализа передней поверхности роговицы

Анализ информативности весовых коэффициентов

В исследовании использовались данные, полученные в глазной клинике Бранчевского, как для условно здоровых людей (без выраженных патологий как на зрачке, так и на хрусталике), так и с определёнными патологиями, в частности, с миопией слабой и средней степени. В работе [20] был произведён статистический анализ на основе выборки из 150 измерений. Были выделены базисные функции Цернике, наиболее характерные для некоторых патологий глаза. Из представленного набора необходимо выделить наиболее информативные весовые коэффициенты с целью понижения вероятности ошибочной классификации.

Для реализации поставленной задачи был выбран язык R , предназначенный для интеллектуального анализа данных. Для проведения исследований были использованы встроенные функции математических пакетов языка. Входные данные для анализа: n объектов, каждый из которых характеризуется 30 признаками, а также классами, которые определяются следующими бинарными отношениями:

- миопия слабой степени/миопия средней степени (I),
- миопия слабой степени/миопия слабой степени + астигматизм (II),
- миопия средней степени/миопия средней степени + астигматизм (III),
- миопия слабой степени/миопия средней степени + астигматизм (IV),
- миопия средней степени/миопия слабой степени + астигматизм (V).

При исследовании качества классификации была сформирована обучающая выборка, с использованием которой был настроен классификатор, основанный на методе опорных векторов [21]. Для синтеза классификатора используются только объекты обучающей выборки, которые не содержатся в тестовой выборке. Этот подход называют U -методом [22]. Объекты из истинного распределения могут быть заменены объектами, которые не были использованы для синтеза классификатора и независимы от объектов, по которым классификатор был синтезирован. Для реализации U -метода существует много возможностей, для оценивания вероятности ошибки классификации использовался метод исключения одного объекта.

Была произведена классификация объектов контрольной выборки с помощью алгоритма классификации по ближайшему соседу. При этом использовались данные о классах объектов из обучающей выборки. В ходе экспериментальных исследований была определена средняя ошибка классификации 0,319 при использовании всего набора признаков. Для уменьшения ошибки проведён анализ информативности признаков. Для проведения анализа весовых коэффициентов необходимо рассмотреть вектор, состоящий из средних значений каждого признака. Такой вектор был построен для всех диагнозов.

Для удобства была предложена сквозная нумерация базисных функций Цернике, где $N=1:15$ – базисные функции, описывающие искривление передней поверхности роговицы, а $N=16:30$ – базисные функции, описывающие искривление задней поверхности роговицы (связь порядкового номера N и базисной функции Z_{nm} показан на оси абсцисс графиков (рис. 2–6)).

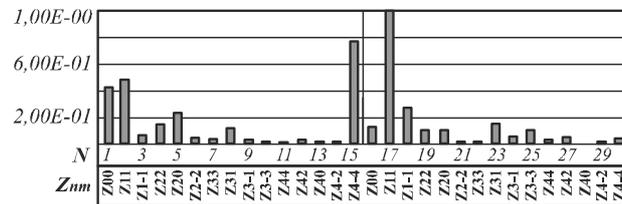


Рис. 2. Наиболее информативные весовые коэффициенты Цернике при бинарном отношении – миопия слабой степени / миопия средней степени

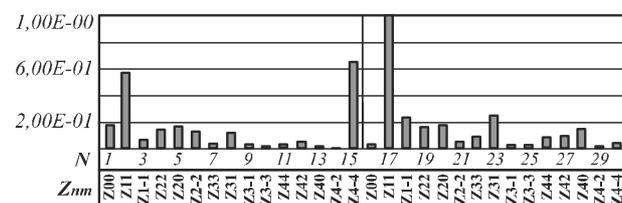


Рис. 3. Наиболее информативные весовые коэффициенты Цернике при бинарном отношении – миопия слабой степени / миопия слабой степени + астигматизм

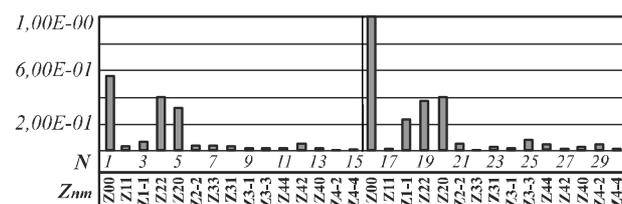


Рис. 4. Наиболее информативные весовые коэффициенты Цернике при бинарном отношении – миопия средней степени / миопия средней степени + астигматизм

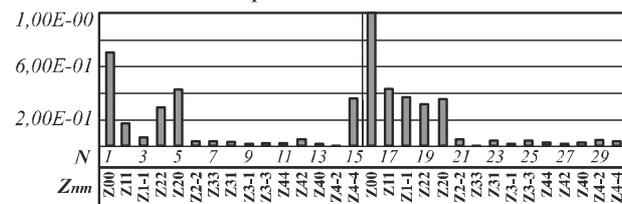


Рис. 5. Наиболее информативные весовые коэффициенты Цернике при бинарном отношении – миопия слабой степени / миопия средней степени + астигматизм

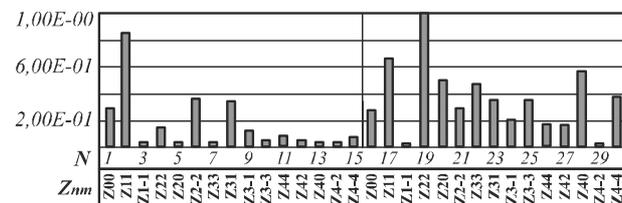


Рис. 6. Наиболее информативные весовые коэффициенты Цернике при бинарном отношении – миопия средней степени / миопия слабой степени + астигматизм

Пусть вектор $\mathbf{a}_{avg}(x_1, x_2, \dots, x_{30})$ – центр класса a тридцатимерного пространства признаков, а вектор

$\mathbf{b}_{avg}(x_1, x_2, \dots, x_{30})$ – центр класса b . Тогда наиболее информативные признаки с точки зрения классификации двух классов можно определить на основе покомпонентной разности этих двух векторов $\mathbf{c} = |\mathbf{a}_{avg} - \mathbf{b}_{avg}|$, для выявления близости каждого весового коэффициента независимо при различных патологиях. Результат для бинарного отношения I представлен на рис. 2.

Аналогичным образом можно провести анализ информативности коэффициентов для бинарных отношений II-V (рис. 4–6).

На основе полученных диаграмм (рис. 2–6) можно сделать выводы, какие признаки наиболее информативны. Чем больше абсолютная разность каждого признака c_i , тем более он информативен.

Далее была произведена классификация по наиболее информативным признакам из векторов \mathbf{a}_{avg} и \mathbf{b}_{avg} , ошибки которой представлены в табл. 1.

Табл. 1. Информативные весовые коэффициенты при бинарных отношениях (I-V)

Бинарные отношения	I	II	III	IV	V
Номера весовых коэффициентов Цернике (N)	1	-	1	1	1
	2	2	-	-	2
	-	-	4	4	-
	5	-	5	5	-
	-	-	-	-	6
	-	-	-	-	8
	15	15	-	15	-
	-	-	16	16	16
	17	17	-	17	17
	18	18	18	18	-
	-	-	19	19	19
	-	-	20	20	20
	-	-	-	-	21
	-	-	-	-	22
	-	-	23	-	23
	-	-	-	-	24
	-	-	-	-	25
	-	-	-	-	26
	-	-	-	-	27
	-	-	-	-	28
-	-	-	-	30	
Ошибка	0,233	0,160	0,241	0,142	0,239

На основе табл. 1 можно сделать вывод о том, что наиболее информативные признаки, которые встречаются в трёх и более бинарных отношениях (I–V) – это полиномы с индексами (N): 1, 5, 15, 16, 17, 18, 19, 20. Они соответствуют aberrациям вида Constant (\mathbf{Z}_{00}), дефокусировка (\mathbf{Z}_{20}), Quadrofall ($\mathbf{Z}_{4.4}$) на передней поверхности роговицы, Constant (\mathbf{Z}_{00}), дисторсия (\mathbf{Z}_{11} , \mathbf{Z}_{1-1}), астигматизм (\mathbf{Z}_{22}) и дефокусировка (\mathbf{Z}_{20}) на задней поверхности. В табл. 1 использовались только те признаки, которые показали себя информативными для различения хотя бы одной из пары классов.

Из табл. 1 видно, что полученные ошибки классификации превышают допустимое значение в процедуре постановки диагноза [1], поэтому было принято решение использовать более сложную процедуру отбора признаков, эффективных для диагностики забо-

левания [23–25]. Она основана на методах статистического анализа для формирования информативного признакового пространства. В работах [24, 25] представлены аналогичные подходы отбора информативных признаков для анализа медико-биологических объектов в других прикладных задачах диагностики.

Таким образом, выбор признаков осуществлялся по критерию информативности для решения конкретной задачи классификации. При проведении исследований информативность оценивалась как значение критерия разделимости [22, 23] $J_1 = \text{tr}((\mathbf{T})^{-1}\mathbf{B})$, где $\mathbf{T} = \mathbf{B} + \mathbf{W}$, \mathbf{B} – матрица межгруппового рассеяния, элементы которой рассчитываются по формуле:

$$b_{ij} = \sum_{k=1}^g n_k (\bar{x}_{ik} - \bar{x}_i)(\bar{x}_{jk} - \bar{x}_j), i, j = \overline{1, p},$$

где n – количество элементов выборки, содержащей p признаков разделённых на g классов; \mathbf{W} – матрица внутригруппового рассеяния, элементы которой рассчитываются по формуле:

$$w_{ij} = \sum_{k=1}^g (x_{ikm} - \bar{x}_{ik})(x_{jkm} - \bar{x}_{jk}), i, j = \overline{1, p},$$

где x_{ikm} – значение i -го признака для m -го элемента в классе k , $\bar{x}_{ik} = 1/n_k \sum_{m=1}^{n_k} \bar{x}_{ikm}$ – среднее значение i -го признака в классе k , $\bar{x}_i = (1/n) \sum_{k=1}^g n_k \bar{x}_{ik}$ – среднее значение i -го признака по всем классам, n_k – число элементов в классе k . Чем больше значение критерия, тем больше разделимость классов.

Дополнительная оценка информативности проводилась путём вычисления ошибки классификации методом K -средних. При классификации K равняется числу рассматриваемых классов, а значение ошибки определяется как доля неверно классифицированных векторов выборки.

Оценка информативности на основании значений индивидуального критерия разделимости в данной задаче является неэффективной из-за низкого значения критерия. При одновременном различении всех четырёх рассматриваемых классов значение критерия менее 0,1, а при рассмотрении каждой пары классов отдельно не превышает 0,2.

В связи с этим при проведении исследований оценка информативности осуществлялась на основании значения величины вклада каждого признака в разделяющую способность всего рассматриваемого признакового пространства при решении задачи различения каждой пары классов. Таким образом, из набора признаков, используемых для различения двух определённых классов (бинарные отношения: I, II, III, IV, V), исключались те признаки, вклад которых в общую информативность был наименьшим. Признаки исключались до тех пор, пока значение общегруппового критерия разделимости снизилось не более чем на 0,05. В итоге, было получено пять наборов признаков, информативных для различения каждой пары классов. Значения группового критерия разделимости и ошибки классификации при использовании всех 30 исходных признаков и полученных наборов информативных признаков представлены ниже (табл. 2).

Табл. 2. Значения групповых критериев разделимости для каждой пары классов

Бинарное отношение	Значение критериев разделимости	
	Все признаки	Информативные признаки
I	0,909	0,891
II	0,880	0,840
III	0,765	0,728
IV	0,810	0,762
V	0,820	0,778

Проанализировав данные таблиц, можно сделать вывод о том, что выбранные признаки являются информативными для различения классов патологий. При этом размерность признакового пространства была существенно снижена.

В ходе экспериментальных исследований было подсчитано, для какого числа сравнений признаки являются информативными и на основании полученных значений была проведена оценка эффективности для задачи различения приведённых классов изображений. Признаки были поделены следующим образом: рекомендованные – используются минимум в 5 парах сравнений; не рекомендуемые к сравнению – используются не более чем в 2 парах сравнений; оставшиеся признаки были отнесены к обычным.

На основе полученных признаков была произведена классификация, ошибки которой представлены в табл. 3. Будем считать признак zN наиболее информативным в случае, если он встречается не менее чем в трёх бинарных отношениях в табл. 3. К примеру, признак $z3$, который описывает аберрацию типа «наклон», является информативным для бинарных отношений I–IV и считается наиболее информативным. На основе этого допущения можно сделать вывод о том, что наиболее информативные признаки, которые встречаются во всех исследованных бинарных отношениях (I–V), – это полиномы с индексами (N): 1, 3, 7, 8, 13, 20, 21, 22, 23, 26, 28. Они соответствуют аберрациям вида Constant (Z_{00}), дисторсия (Z_{1-1}), Trefoil (Z_{33}), кома (Z_{31}), сферическая аберрация (Z_{40}) на передней поверхности роговицы и дефокусировка (Z_{20}), астигматизм (Z_{2-2}), Trefoil (Z_{33}), кома (Z_{31}), Quadrofall (Z_{44}), сферическая аберрация (Z_{40}) на задней поверхности.

В результате можно сделать вывод, что для различения исследуемых классов рекомендуется использовать следующие признаки (табл. 4):

- **передняя поверхность роговицы:** дисторсия (Z_{1-1}), кома (Z_{31});
- **задняя поверхность роговицы:** дефокусировка (Z_{20}), астигматизм (Z_{2-2}), Trefoil (Z_{33}), Quadrofall (Z_{44}), сферическая аберрация (Z_{40}).

Заключение

Исследование, представленное в работе, посвящено анализу аберрации волнового фронта при изменении кривизны поверхности роговицы человеческого глаза.

Табл. 3. Сводная таблица, демонстрирующая наиболее информативные признаки на передней и задней поверхностях роговицы

Бинарные отношения	I	II	III	IV	V
1	1	1	1	–	1
–	2	2	2	2	–
3	3	3	3	3	–
–	–	4	4	4	4
5	5	–	–	–	–
–	6	6	–	–	6
7	7	7	7	7	–
8	8	8	8	8	–
9	9	–	–	–	9
10	–	–	–	–	–
11	11	–	–	11	–
–	12	–	–	–	12
13	–	–	13	13	13
14	14	–	–	–	–
15	–	–	–	–	–
–	16	16	–	–	–
17	–	–	–	17	–
18	18	–	–	–	18
–	19	–	–	–	–
20	20	20	20	20	20
21	21	21	21	21	21
22	22	–	–	22	22
23	23	23	–	–	23
24	24	–	–	–	24
25	–	–	–	25	–
26	26	26	26	26	–
27	27	–	–	27	–
–	28	28	28	28	28
29	–	–	–	–	29
30	–	–	30	–	30
Ошибка	0,030	0,024	0,049	0,047	0,026

Табл. 4. Рекомендованные признаки на передней и задней поверхностях роговицы

Рекомендованные признаки	
Передняя поверхность роговицы	Задняя поверхность роговицы
Z_{1-1}, Z_{31}	$Z_{20}, Z_{2-2}, Z_{33}, Z_{44}, Z_{40}$

Анализ выполнен на основе представления аберраций передней и задней поверхностей роговицы в виде суперпозиции функций Цернике. Объектом исследования являются весовые коэффициенты полиномов Цернике. Данные были получены в ряде клинических испытаний в глазной клинике Бранчевского.

В рамках данной работы был проведён анализ наиболее информативных весовых коэффициентов с точки зрения классификации пациентов по определённым диагнозам. Мы предложили два способа выявления информативных коэффициентов. Исследования показали, что способ выделения признаков на основе критериев разделимости оказался наиболее эффективным для решения конкретной задачи классификации.

Интересным фактом является, что среди высокоинформативных признаков присутствуют полиномы

высоких порядков Z_{31} , Z_{33} , Z_{40} , Z_{44} (выше второго порядка). В классической офтальмологии специалисты обращают внимание только на полиномы первой и второй степени, которые отвечают за так называемые «цилиндр» и «сферу». Однако проведенное исследование показывает, что учёт аббераций высокого порядка (абберации вида кома 3-го порядка, Trefoil, Quadrofall и сферическая абберация 4-го порядка) позволил значительно уменьшить ошибку классификации, а именно в 3 раза, что приведёт к повышению достоверности постановки диагноза при автоматизации процесса диагностики. Поэтому необходимо использовать данные признаки при корректировке кривизны поверхности роговицы глаза для улучшения качества зрения пациента.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Федерального агентства научных организаций (соглашение № 007-ГЗ/43363/26) в параграфе «Модель формирования изображения» и Российского научного фонда (гранты № 15-29-03823, № 16-41-630761, № 17-01-00972), а также при частичной поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках реализации мероприятий Программы повышения конкурентоспособности Самарского университета среди ведущих мировых научно-образовательных центров на 2013–2020 годы.

Литература

- Ильясова, Н.Ю. Методы цифрового анализа сосудистой системы человека. Обзор литературы / Н.Ю. Ильясова // Компьютерная оптика. – 2013. – Т. 37, № 4. – С. 511-535.
- Борн, М. Основы оптики / М. Борн, Э. Вольф. – М.: Наука, 1973. – 720 с.
- Atchison, D.A. Recent advances in measurement of monochromatic aberrations of human eyes / D.A. Atchison // Clinical and Experimental Optometry. – 2005. – Vol. 88. – P. 5-27. – DOI: 10.1111/j.1444-0938.2005.tb06659.x.
- Goncharov, A.S. Modal tomography of aberrations of the human eye / A.S. Goncharov, A.V. Larichev, N.G. Iroshnikov, V.Yu. Ivanov, S.A. Gorbunov // Laser Physics. – 2006. – Vol. 16, Issue 12. – P. 1689-1695. – DOI: 10.1134/S1054660X06120152.
- Lombardo, M. New methods and techniques for sensing the wave aberrations in human eyes / M. Lombardo, G. Lombardo // Clinical and Experimental Optometry. – 2009. – Vol. 92, Issue 3. – P. 176-186. – DOI: 10.1111/j.1444-0938.2009.00356.x.
- Artal, P. Optics of the eye and its impact in vision: A tutorial / P. Artal // Advances in Optics and Photonics. – 2014. – Vol. 6, Issue 3. – P. 340-367. – DOI: 10.1364/AOP.6.000340.
- Pyasova, N. Computer systems for geometrical analysis of blood vessels diagnostic images // Optical Memory and Neural Networks (Information Optics). – 2014. – Vol. 23, Issue 4. – P. 278-286. – DOI: 10.3103/S1060992X14040110.
- Pyasova, N.Yu. Evaluation of aberrations in the optical system of the human eye based on the spatial spectrum of a diagnostic image / N.Yu. Pyasova, D.A. Abulkhanov, A.V. Kupriyanov, A.V. Karsakov // CEUR Workshop Proceedings. – 2016. – Vol. 1638. – P. 39-48. – DOI: 10.18287/1613-0073-2016-1638-39-48.
- Farah, S.G. Laser in situ keratomileusis: Literature review of a developing technique / S.G. Farah, D.T. Azar, C. Gurdal, J. Wong // Journal of Cataract and Refractive Surgery. – 1998. – Vol. 24, Issue 7. – P. 989-1006. – DOI: 10.1016/S0886-3350(98)80056-4.
- Roberts, C. Biomechanics of the cornea and wavefront guided laser refractive surgery // Journal of Refractive Surgery. – 2002. – Vol. 18, Issue 5. – P. S589-S592. – DOI: 10.3928/1081-597X-20020901-18.
- O'Keefe, M. Corneal surgical approach in the treatment of presbyopia / M. O'Keefe, N. O'Keefe // Journal of Clinical and Experimental Ophthalmology. – 2016. – Vol. 7, Issue 1. – 1000512. – DOI: 10.4172/2155-9570.1000512.
- Бахолдин, А.В. Компьютерное моделирование оптической системы глаза человека / А.В. Бахолдин, Н.Ф. Коршикова, Д.Н. Черкасова // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2012. – Т. 55, № 4. – С. 68-73.
- Ha, Y. Diffractive optical element for Zernike decomposition / Y. Ha, D. Zhao, Y. Wang, V.V. Kotlyar, S.N. Khonina, V.A. Soifer // Proceedings of SPIE. – 1998. – Vol. 3557. – P. 191-197. – DOI: 10.1117/12.318300.
- Khonina, S.N. Diffractive optical element matched with Zernike basis / S.N. Khonina, V.V. Kotlyar, Y. Wang // Pattern Recognition and Image Analysis. – 2001. – Vol. 11, Issue 2. – P. 442-445.
- Khonina, S.N. Zernike phase spatial filter for measuring the aberrations of the optical structures of the eye / S.N. Khonina, V.V. Kotlyar, D.V. Kirsh // Journal of Biomedical Photonics and Engineering. – 2015. – Vol. 1, Issue 2. – P. 146-153. – DOI: 10.18287/jbpe-2015-1-2-146.
- Kirilenko, M.S. Wavefront analysis based on Zernike polynomials / M.S. Kirilenko, P.A. Khorin, A.P. Porfirev // CEUR Workshop Proceedings. – 2016. – Vol. 1638. – P. 66-75. – DOI: 10.18287/1613-0073-2016-1638-66-75.
- Porfirev, A.P. Experimental investigation of multi-order diffractive optical elements matched with two types of Zernike functions / A.P. Porfirev, S.N. Khonina // Proceedings of SPIE. – 2016. – Vol. 9807. – 98070E. – DOI: 10.1117/12.2231378.
- Khorin, P.A. Wavefront aberration analysis with a multi-order diffractive optical element / P.A. Khorin, S.A. Degtyarev // CEUR Workshop Proceedings. – 2017. – Vol. 1900. – P. 28-33. – DOI: 10.18287/1613-0073-2017-1900-28-33.
- WaveLight® Oculyzer User's Manual. Visiometrics, 2012.
- Хорин, П.А. Анализ аббераций роговицы человеческого глаза / П.А. Хорин, С.Н. Хонина, А.В. Карсаков, С.Л. Бранчевский // Компьютерная оптика. – 2016. – Т. 40, № 6. – С. 810-817. – DOI: 10.18287/0134-2452-2016-40-6-810-817.
- Vapnik, V.N. The nature of statistical learning theory / V.N. Vapnik. – 2nd ed. – New York: Springer-Verlag, 2000. – 314 p. – ISBN: 978-0-387-98780-4.
- Fukunaga, K. Introduction to statistical pattern recognition / K. Fukunaga. – San Diego: Academic Press, 1990. – 592 p. – ISBN: 0-12-269851-7.
- Pyasova, N. Regions of interest in a fundus image selection technique using the discriminative analysis methods / N. Pyasova, R. Paringer, A. Kupriyanov. – In book: Computer Vision and Graphics / ed. by L.J. Chmielewski, A. Datta, R. Kozera, K. Wojciechowski. – Springer International Publishing AG, 2016. – P. 408-417. – DOI: 10.1007/978-3-319-46418-3_36
- Кутикова, В.В. Исследование методов отбора информативных признаков для задачи распознавания текстурных изображений с помощью масок Лавса / В.В. Кутикова, А.В. Гайдель // Компьютерная оптика. – 2015. – Т. 39, № 5. – С. 744-750. – DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-5-744-750.
- Гайдель, А.В. Отбор признаков для задачи диагностики остеопороза по рентгеновским изображениям шейки бедра / А.В. Гайдель, В.П. Крашенинников // Компьютерная оптика. – 2016. – Т. 40, № 6. – С. 939-946. – DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-6-939-946.

Сведения об авторах

Хорин Павел Алексеевич, 1995 года рождения, в 2016 году окончил факультет информатики Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королёва, магистр 2 курса факультета информатики Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королева (Самарский университет). Область научных интересов: математическое моделирование, дифракционная оптика, оптическая и цифровая обработка изображений, интеллектуальный анализ данных. E-mail: paul.95.de@gmail.com.

Ильясова Наталья Юрьевна, 1966 года рождения. В 1991 году окончила с отличием Самарский государственный аэрокосмический университет имени С.П. Королёва (СГАУ). В 1997 году защитила диссертацию на соискание степени кандидата технических наук, в 2015 году защитила диссертацию на соискание степени доктора технических наук. В настоящее время работает старшим научным сотрудником в Учреждении Российской академии наук Институте систем обработки изображений РАН – филиале ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН и одновременно доцентом кафедры технической кибернетики Самарского университета. Круг научных интересов включает цифровую обработку сигналов и изображений, анализ и интерпретацию биомедицинских изображений. Имеет более 100 публикаций, в том числе 35 статей и три монографии (в соавторстве). E-mail: ilyasova@smr.ru.

Парингер Рустам Александрович, 1990 года рождения, аспирант Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королева (Самарский университет), стажёр-исследователь в Учреждении Российской академии наук Институте систем обработки изображений РАН – филиале ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН. В 2013 году окончил факультет информатики СГАУ. Круг научных интересов включает цифровую обработку изображений, распознавание образов, а также анализ и интерпретацию биомедицинских сигналов и изображений. E-mail: rusparinger@gmail.com.

ГРНТИ: 29.31.29; 28.23.15; 27.43.51

Поступила в редакцию 29 сентября 2017 г. Окончательный вариант – 26 ноября 2017 г.

INFORMATIVE FEATURE SELECTION BASED ON THE ZERNIKE POLYNOMIAL COEFFICIENTS FOR VARIOUS PATHOLOGIES OF THE HUMAN EYE CORNEA

P.A. Khorin¹, N.Yu. Ilyasova^{1,2}, R.A. Paringer^{1,2}

¹ Samara National Research University, Samara, Russia,

² Image Processing Systems Institute of RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS, Samara, Russia

Abstract

The study was devoted to the analysis of wavefront aberrations under changes of the cornea surface curvature in the human eye. The analysis was based on the representation of aberrations of the front and rear corneal surfaces as superposition of Zernike functions. Weight coefficients of the Zernike polynomials were the object of this study. The data under analysis were obtained in a number of clinical trials in the Branchevski's eye clinic. The most informative weight coefficients were analyzed from the point of view of classification of patients by particular diagnosis. A comparison of the classification results was carried out using thirty front and rear corneal features, as well as the most informative features. The features were ranked by the informativity criterion for solving a specific classification task. While doing analysis, the informativity was evaluated on the basis of values of a separability criterion. An additional estimation of informativeness was carried out by calculating the classification error by a K-means method. As a result of the analysis, basic Zernike functions that are most informative for particular eye pathologies were identified.

Keywords: aberrations of the cornea, Zernike functions, myopia of the human eye, classification, feature space, analysis of the informative features.

Citation: Khorin PA, Ilyasova NYu, Paringer RA. Informative feature selection based on the Zernike polynomial coefficients for various pathologies of the human eye cornea. *Computer Optics* 2018; 42(1): 159-166. DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-1-159-166.

Acknowledgements: The work was supported by the Federal Agency of Science organizations (agreement # 007-GZ/43363/26) in the paragraph "Model and the Russian Science Foundation (grants # 15-29-03823, # 16-41-630761, # 17-01-00972), as well as for partial support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation of the Samara Competitiveness Program University among the world's leading research and educational centers in 2013-2020.

References

- | | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>[1] Ilyasova NYu. Methods for digital analysis of human vascular system. Literature review [In Russian]. <i>Computer Optics</i> 2013; 37(4): 511-535.</p> <p>[2] Born M, Wolf E. Principles of optics: Electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light. 7th ed. Cambridge: Cambridge University Press; 1999. ISBN: 978-0-521-64222-4.</p> | <p>[3] Atchison DA. Recent advances in measurement of monochromatic aberrations of human eyes. <i>Clin Exp Optom</i> 2005; 88: 5-27. DOI: 10.1111/j.1444-0938.2005.tb06659.x.</p> <p>[4] Goncharov AS, Larichev AV, Iroshnikov NG, Ivanov VYu, Gorbunov SA. Modal tomography of aberrations of the human eye. <i>Laser Physics</i> 2006; 16(12): 1689-1695. DOI: 10.1134/S1054660X06120152.</p> <p>[5] Lombardo M, Lombardo G. New methods and techniques for sensing the wave aberrations in human eyes. <i>Clin Exp</i></p> |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

- Optom 2009; 92(3): 176-186. DOI: 10.1111/j.1444-0938.2009.00356.x.
- [6] Artal P. Optics of the eye and its impact in vision: A tutorial. *Advances in Optics and Photonics* 2014; 6(3): 340-367. DOI: 10.1364/AOP.6.000340.
- [7] Ilyasova N. Computer systems for geometrical analysis of blood vessels diagnostic images. *Optical Memory and Neural Networks (Information Optics)* 2014; 23(4): 278-286. DOI: 10.3103/S1060992X14040110.
- [8] Ilyasova NYu, Abulkhanov DA, Kupriyanov AV, Karsakov AV. Evaluation of aberrations in the optical system of the human eye based on the spatial spectrum of a diagnostic image; *CEUR Workshop Proceedings* 2016; 1638: 39-48. DOI: 10.18287/1613-0073-2016-1638-39-48.
- [9] Farah SG, Azar DT, Gurdal C, Wong J. Laser in situ keratomileusis: Literature review of a developing technique. *Journal of Cataract and Refractive Surgery* 1998; 24(7): 989-1006. DOI: 10.1016/S0886-3350(98)80056-4.
- [10] Roberts C. Biomechanics of the cornea and wavefront-guided laser refractive surgery. *J Refrac Surg* 2002; 18(5): S589-S592. DOI: 10.3928/1081-597X-20020901-18.
- [11] O'Keefe M, O'Keefe N. Corneal surgical approach in the treatment of presbyopia. *Journal of Clinical & Experimental Ophthalmology* 2016; 7(1): 1000512. DOI: 10.4172/2155-9570.1000512.
- [12] Bakholdin AV, Korshikova NF, Cherkasova DN. Computer modeling of the human eye optical system [In Russian]. *Journal of Instrument Engineering* 2012; 55(4): 68-72.
- [13] Ha Y, Zhao D, Wang Y, Kotlyar VV, Khonina SN, Soifer VA. Diffractive optical element for Zernike decomposition. *Proc SPIE* 1998, 3557: 191-197. DOI: 10.1117/12.318300.
- [14] Khonina SN, Kotlyar VV, Wang Y. Diffractive optical element matched with Zernike basis. *Pattern Recognition and Image Analysis* 2001; 11(2): 442-445.
- [15] Khonina SN, Kotlyar VV, Kirsh DV. Zernike phase spatial filter for measuring the aberrations of the optical structures of the eye. *Journal of Biomedical Photonics & Engineering* 2015; 1(2): 146-153. DOI: 10.18287/jbpe-2015-1-2-146.
- [16] Kirilenko MS, Khorin PA, Porfirev AP. Wavefront analysis based on Zernike polynomials. *CEUR Workshop Proceedings* 2016; 1638: 66-75. DOI: 10.18287/1613-0073-2016-1638-66-75.
- [17] Porfirev AP, Khonina SN. Experimental investigation of multi-order diffractive optical elements matched with two types of Zernike functions. *Proc SPIE* 2016; 9807: 98070E. DOI: 10.1117/12.2231378.
- [18] Khorin PA, Degtyarev SA. Wavefront aberration analysis with a multi-order diffractive optical element. *CEUR Workshop Proceedings* 2017; 1900: 28-33. DOI: 10.18287/1613-0073-2017-1900-28-33.
- [19] WaveLight® Oculyzer User's Manual. *Visiometrics*; 2012.
- [20] Khorin PA, Khonina SN, Karsakov AV, Branchevsky SL. Analysis of corneal aberrations of the human eye. *Computer Optics* 2016; 40(6): 810-817. DOI: 10.18287/0134-2452-2016-40-6-810-817.
- [21] Vapnik VN. *The nature of statistical learning theory*. 2nd ed. New York: Springer-Verlag; 2000. ISBN: 978-0-387-98780-4.
- [22] Fukunaga K. *Introduction to statistical pattern recognition*. San Diego: Academic Press; 1990. ISBN: 0-12-269851-7.
- [23] Ilyasova N, Paringer R, Kupriyanov A. Regions of interest in a fundus image selection technique using the discriminative analysis methods. In Book: Chmielewski LJ, Datta A, Kozera R, Wojciechowski K, eds. *Computer Vision and Graphics*. Springer International Publishing AG; 2016. DOI: 10.1007/978-3-319-46418-3_36.
- [24] Kutikova VV, Gaidel AV. Study of informative feature selection approaches for the texture image recognition problem using Laws' masks [In Russian]. *Computer Optics*, 2015; 39(5): 744-750. DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-5-744-750.
- [25] Gaidel AV, Krashennnikov VR. Feature selection for diagnosing the osteoporosis by femoral neck X-ray images. *Computer Optics* 2016; 40(6): 939-946. DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-6-939-946.

Author's information

Pavel Alexeyevich Khorin, was born in 1995, in 2016 he graduated from Informatics faculty of Samara National Research University, Master of 2 course of Computer Science faculty of Samara National Research University. Research interests: mathematical modeling, diffraction optics, optical and digital image processing, data mining. E-mail: paul.95.de@gmail.com.

Nataly Yu. Ilyasova (b. 1966), graduated with honors from S.P. Korolyov Samara State Aerospace University (SSAU) (1991). She received her PhD (1997) and DSc (2015) in Technical Sciences. At present, she is a senior researcher at the Image Processing Systems Institute of the Russian Academy of Sciences, and holding a part-time position of Associate Professor at SSAU's Technical Cybernetics sub-department. The area of interests includes digital signals and image processing, pattern recognition and artificial intelligence, biomedical imaging and analysis. She's list of publications contains more than 100 scientific papers, including 35 articles and 3 monographs published with coauthors. E-mail: ilyasova@smr.ru.

Rustam Aleksandrovich Paringer (b. 1990) received Master's degree in Applied Mathematics and Informatics from Samara State Aerospace University (2013). Teaching assistant of the Technical Cybernetics department and junior researcher of Samara University, intern researcher of IPSI RAS – Branch of the FSRC "Crystallography and Photonics". Research interests are currently focused on computer image processing, pattern recognition and data mining. E-mail: rusparinger@gmail.com.

Received September 29, 2017. The final version – November 26, 2017.