

УДК 004.932.2:004.93'1

Н. В. Власенко<sup>1</sup>, В. А. Гороховатский<sup>2</sup><sup>1</sup> ХНЭУ им. С. Кузнеца, г. Харьков, Украина, e-mail: gorohovatskaja@gmail.com,<sup>2</sup> ХИБД УБД НБУ, г. Харьков, Украина, e-mail: gorohovatsky-v@rambler.ru

## ОЦЕНИВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ ПРИЗНАКОВ В МЕТОДАХ РАСПОЗНАВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ СТРУКТУРНОГО АНАЛИЗА

Обсуждается построение критериев для оценивания качества методов распознавания на основе матрицы расстояний в базе изображений. Предложены модели критерия и примеры их реализации. Приведены результаты экспериментов по анализу и классификации изображений в базах визуальных данных.

РАСПОЗНАВАНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ, СТРУКТУРНЫЕ МЕТОДЫ, БАЗА ИЗОБРАЖЕНИЙ, МАТРИЦА РАССТОЯНИЙ, КРИТЕРИЙ КАЧЕСТВА РАСПОЗНАВАНИЯ

### Введение

В современных структурных методах распознавания, основанных на представлении и анализе описаний визуальных объектов в виде множества дескрипторов (числовых векторов), актуальным является выбор такой системы признаков, которая позволяет наиболее эффективно осуществлять распознавание с точки зрения показателей быстродействия и достоверности, определяемой значением вероятности правильного распознавания [1]. В частности, при применении ортогональных трансформаций к структурным описаниям с целью построения новых более эффективных представлений на основе ограниченного подмножества функций Уолша (ФУ) необходимо отобрать как можно меньшее число ФУ (критерий быстродействия), в то же время обеспечивая достаточно высокую вероятность распознавания (критерий достоверности) [2]. Если быстродействие может быть оценено путем анализа объема вычислений на основе применяемого метода и выбранной системы признаков, то достоверность распознавания трудно оценить на предварительном этапе без практического применения метода для конкретных баз изображений. Прикладным подходом к решению рассматриваемой задачи есть экспериментальное вычисление вероятности распознавания при выборе всевозможных допустимых наборов ФУ. Однако этот путь требует объемных вычислений, вызванных значительными размерами баз изображений и связанных с перебором допустимого множества систем признаков с учетом геометрических преобразований и помех.

Перспективным и в то же время более простым способом есть построение и анализ (на предварительном этапе) матрицы расстояний для обрабатываемой базы объектов-изображений с последующим сопоставлением значений критерия эффективности для разных систем признаков путем оценивания достоверности распознавания на основе значений элементов этой матрицы. Матрица расстояний  $R$  – это симметричная числовая матрица размером  $N \times N$ , которая содержит

попарные расстояния между  $N$  эталонными объектами базы при применении конкретного метода на основе фиксированной системы признаков [3]. На диагонали этой матрицы, содержащей расстояния объектов самих с собой, при отсутствии искажений стоят нули. Недиagonальные элементы матрицы отражают значения близости разных объектов базы между собой (межклассовое расстояние), т.е. характеризуют, в какой степени эталоны базы схожи между собой в выбранной системе признаков с использованием конкретного расстояния  $\rho(Z^1, Z^2)$  между структурными описаниями  $Z^1, Z^2$ . Такой содержательный смысл матрицы расстояний позволяет использовать множество ее элементов для построения критериев, связанных с оценкой достоверности распознавания.

Цель настоящего исследования – построение критериев для оценивания качества распознавания в произвольной базе изображений на основе вычисления матрицы расстояний для выбранного метода и системы признаков, а также непосредственное определение значений критериев для конкретных методов и баз изображений.

### 1. Критерии для оценивания эффективности системы признаков

Пусть  $O = \{O^k\}$  – база объектов (изображений),  $Z = \{Z^k\}$  – множество описаний объектов (пространство признаков),  $E = \{E^j\}_{j=1}^N$ ,  $E \subseteq O$  – конечное множество эталонных объектов, определяющее фиксированное число  $N$  классов в базе  $O$ ,  $M$  – метод классификации. Классификацию объекта будем рассматривать как отображение

$$M: O \rightarrow Z \rightarrow E, \quad (1)$$

которое определяет номер  $j = \overline{1, N}$  класса распознаваемого объекта. В самом общем случае критерий  $\gamma$  качества классификации можно считать функцией  $\gamma = \gamma(M, O, Z, E)$ . Для конкретности будем считать  $0 \leq \gamma \leq 1$ . Изменение любого из параметров  $M, O, Z, E$  непосредственно влияет на значение критерия  $\gamma$ .

Построим на основе применяемого метода с фиксированными параметрами  $M, O, Z, E$  матрицу

расстояний  $R$ , предполагая, что вид расстояния  $\rho(Z^1, Z^2)$  между описаниями уже включен в метод распознавания  $M$ . Определим минимальный элемент  $\rho_{\min}$  вне диагонали матрицы  $R$ . Можно отметить, что чем ближе значение  $\rho_{\min}$  к нулю, тем значительнее два разных объекта, для которых он получен, будут похожи между собой. Значит, в процессе распознавания (особенно в условиях преобразований и помех) эти объекты могут быть неправильно установлены распознающей системой. Если  $\rho(Z^1, Z^2)$  – некоторое расстояние между структурными описаниями  $Z^1 = \{z^1(i)\}, Z^2 = \{z^2(m)\}$  двух объектов, то значение минимума матрицы расстояний

$$\rho_{\min} = \min_{\substack{i=1, \overline{N-1} \\ m=i+1, \overline{N}}} \rho(Z^i, Z^m) \quad (2)$$

будем считать критерием при оценке достоверности распознавания. Чем меньше значение  $\rho_{\min}$ , тем ниже качество распознавания в данной системе признаков для конкретной базы, т.е. при выбранных параметрах  $M, O, Z, E$ . Заметим, что поиск минимума в (2) объясняется тем фактом, что  $\rho$  является метрикой, вид которой определяется описаниями из  $Z$ . Учитывая, что модель описания в методах структурного распознавания изображений – это вектор или множество векторов, то  $\rho$  есть метрика для векторов или для конечных множеств векторов.

Матрица попарных расстояний для базы (конечного множества) многомерных объектов нашла практическое применение в ряде задач визуализации многомерных данных [4] при оценивании качества представления множества объектов в синтезированном пространстве признаков. Учитывая, что здесь основным фактором есть степень изменения структуры данных после отображения в новое пространство, ошибку визуализации оценивают путем минимизации функционала, характеризующего меру отклонений между нормированными матрицами расстояний для этих пространств

$$v = \sqrt{\frac{2}{s(s-1)} \sum_{i=1}^{s-1} \sum_{j=i+1}^s (\rho(X^i, X^j)/V - \rho(\tilde{X}^i, \tilde{X}^j)/\tilde{V})^2}, \quad (3)$$

где  $s$  – число объектов,  $X^i, \tilde{X}^i$  – исходное и преобразованное пространства,

$$V = \max_{\substack{i=1, \overline{s-1} \\ j=i+1, \overline{s}}} \rho(X^i, X^j), \quad \tilde{V} = \max_{\substack{i=1, \overline{s-1} \\ j=i+1, \overline{s}}} \rho(\tilde{X}^i, \tilde{X}^j) -$$

нормировочные коэффициенты к отрезку  $[0, 1]$ .

Как можно увидеть, ошибка (3) определяется усредненным евклидовым расстоянием между нормированными элементами матриц расстояний в двух пространствах  $X^i, \tilde{X}^i$  представления данных. В соотношении (3) учтены лишь расстояния между объектами разных классов, что с учетом симметрии матрицы расстояний отражает считающуюся ошибочной близость разных объектов

между собой. Исходя из выражения (3), рассмотрим еще один критерий для оценивания качества классификации с использованием всех элементов матрицы расстояний  $R$ , который в агрегированном виде учитывает суммарное отклонение для подмножества элементов  $R$  (выше диагонали) в виде

$$v = \frac{1}{\rho_{\max}} \sqrt{\frac{2}{N(N-1)} \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{m=i+1}^N \rho^2(Z^i, Z^m)}, \quad (4)$$

где  $\rho_{\max} = \max_{\substack{i=1, \overline{N-1} \\ m=i+1, \overline{N}}} \rho(Z^i, Z^m)$  – максимальный элемент

выше диагонали симметрической матрицы расстояний  $R$ . Фактически критерий (4) представляет собой разновидность нормы вектора, сформированного из элементов выше диагонали матрицы  $R$ .

Обобщая приведенные рассуждения, критерий  $v$  качества распознавания в конечной базе изображений можно представить как некоторую функцию от подмножества элементов матрицы расстояний  $R$ , т.е.

$$v = F\{\rho(Z^i, Z^m) : i = \overline{1, N-1}, m = \overline{i+1, N}\}. \quad (5)$$

Критерий (5), который определяется конкретным видом функции  $F$ , может быть построен как интегральным способом в виде (2), (4), так и процедурным путем за счет анализа отдельных строк (столбцов) матрицы  $R$ . Эта возможность объясняется тем, что каждая строка или столбец матрицы содержит информацию о расстояниях объекта до остальных элементов базы, что может характеризовать, насколько этот объект отличается от других объектов базы при фиксированных параметрах вида описания и метода распознавания.

## 2. Результаты компьютерных экспериментов

Проведенное компьютерное моделирование осуществлялось для двух баз изображений – домашних животных и насекомых, примеры которых приведены на рис. 1. Каждая из этих баз содержит по 12 изображений. Описание  $Z$  объектов в виде множества дескрипторов сформировано путем применения метода SURF[5].



Рис. 1. Примеры изображений из баз домашних животных и насекомых

С целью сравнительного анализа эффективности методов классификации исследовались варианты построения систем признаков на основе применения преобразования Уолша к описанию изображения с использованием разнообразных вариантов выбора кортежей и различного числа ФУ в этих кортежах [2]. Ключевым параметром есть применяемое для трансформации системы  $Z$  число ФУ, т.к. от этого параметра напрямую зависит как быстродействие, так и качество распознавания. База изображений предварительно обрабатывалась, осуществлена сортировка ФУ по убыванию значений дисперсии наибольшего отклика среди множества 64 ФУ в соответствии с разработанным методом [2]. Каждый элемент описания изображения (вектор размерности 64) классифицировался к конкретной ФУ в соответствии с квадратом максимального отклика среди всех 64 ФУ. В результате исходное описание  $Z$  (множество векторов) приобретало векторное представление  $u[Z] = (u_1, \dots, u_q)$ ,  $u_i \geq 0$ , где  $q$  – число применяемых ФУ в выбранной системе признаков. Расстояние между векторами определялось в соответствии с метрикой

$$\rho[u^a, u^b] = \frac{\sum_{i=1}^q |u_i^a - u_i^b|}{\sum_{i=1}^q \max(u_i^a, u_i^b)} \quad (6)$$

Изучены в сравнительном плане такие варианты построения систем признаков с использованием следующих принципов выбора подмножества ФУ:

- 1) полный набор из 64 ФУ;
- 2) первые три ФУ из отсортированного списка (исходные номера 1, 3, 49);
- 3) три ФУ с номерами 4-6 (исходные номера 33, 2, 50);
- 4) пять ФУ с номерами 4-8;
- 5) восемь ФУ с номерами 4-11;
- 6) шестнадцать ФУ с номерами 4-19;
- 7) тридцать две ФУ с номерами 4-35;
- 8) сорок восемь ФУ с номерами 4-51.

Рис. 2 содержит пример гистограмм векторного описания для первого изображения рис. 1, соответствующие его представлению в системах 3, 5, 6. В табл. 1 приведена матрица расстояний для базы изображений животных с применением системы признаков 6.

Табл. 2 содержит значения критерия (2) для рассматриваемых систем признаков(1-8).

Как видим из табл. 2, характеристики для систем 1 и 2 полностью совпадают, т.к. ФУ с номерами 1, 3, 49 отдельно или в составе всех 64 ФУ в полном объеме «перетягивают на себя» все векторы

Таблица 1

Матрица расстояний в базе животных для системы признаков 6

0	0,4311	0,6111	0,6048	0,4285	0,4741	0,5104	0,3631	0,455	0,4347	0,4514	0,4303
0,4311	0	0,6467	0,4285	0,5133	0,4150	0,4196	0,3425	0,2884	0,4145	0,3102	0,5952
0,6111	0,6467	0	0,7647	0,6148	0,6682	0,6778	0,5889	0,6097	0,6793	0,6880	0,5847
0,6048	0,4285	0,7647	0	0,6533	0,4106	0,3738	0,5222	0,4901	0,6011	0,3544	0,7147
0,4285	0,5133	0,6148	0,6533	0	0,6083	0,6285	0,4098	0,4627	0,3111	0,5894	0,4900
0,4741	0,4150	0,6682	0,4106	0,6083	0	0,3510	0,4254	0,4936	0,5692	0,2921	0,6232
0,5104	0,4196	0,6778	0,3738	0,6285	0,3510	0	0,4572	0,4525	0,6350	0,2405	0,7210
0,3631	0,3425	0,5889	0,5222	0,4098	0,4254	0,4572	0	0,4141	0,4106	0,4170	0,5117
0,455	0,2884	0,6097	0,4901	0,4627	0,4936	0,4525	0,4141	0	0,4502	0,4120	0,5574
0,4347	0,4145	0,6793	0,6011	0,3111	0,5692	0,6350	0,4106	0,4502	0	0,5687	0,5056
0,4514	0,3102	0,6880	0,3544	0,5894	0,2921	0,2405	0,4170	0,4120	0,568	0	0,6327
0,4303	0,5952	0,5847	0,7147	0,4900	0,6232	0,7210	0,5117	0,5574	0,505	0,632	0

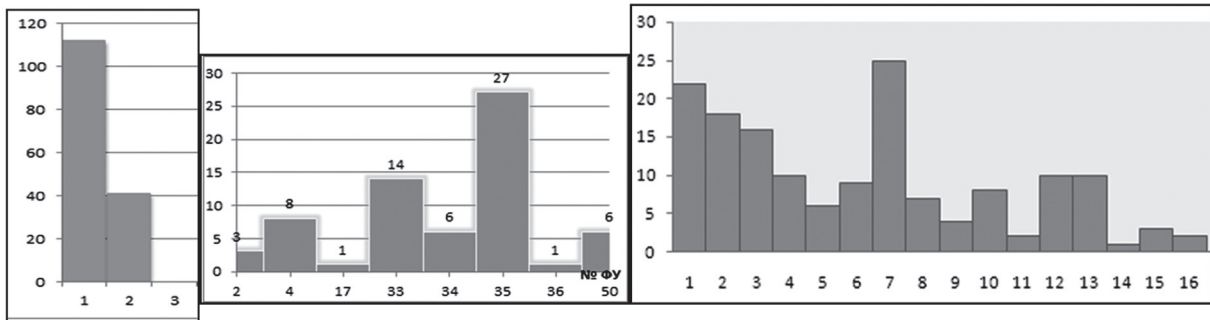


Рис. 2. Представление описания в системах признаков 3, 5, 6

Таблица 2

Значения критерия (2) для различных систем признаков

База изображений	Системы признаков							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Животные	0,029	0,029	0,044	0,104	0,172	0,241	0,291	0,324
Насекомые	0,059	0,059	0,038	0,103	0,243	0,281	0,382	0,382

из исходного описания изображения. В результате все элементы описания классифицируются к ФУ с номерами 1 и 2 (рис. 2). Эта ситуация характерна для обеих исследуемых баз изображений.

С увеличением количества используемых ФУ с 3-х до 48-ми (варианты систем признаков 3-8) значение минимума матрицы  $R$  увеличивается с 0,044 до 0,324, т.е. качество распознавания явно улучшается, т.к. описания разных объектов «удаляются» друг от друга. Это, с одной стороны, подтверждает общепризнанный факт повышения качества распознавания с увеличением размерности системы признаков. Но в то же время при полном наборе из 64 ФУ показатель качества становится достаточно низким (значение критерия (2) для обеих баз не превышает величины 0,06), т.е. на отрезке числа ФУ от 16 до 64 зависимость исследуемого критерия (2) от числа используемых ФУ имеет максимум. Это можно объяснить тем обстоятельством, что один и тот же набор характерных признаков (векторов) поочередно распределяется по числу ФУ, равному 3, 5, 8, 16, 32, 48, 64. Понятно, что при большом числе ФУ информация как бы «размывается» по всему пространству ФУ и становится малозначащей для отдельных элементов спектра, а значит более схожей между разными описаниями. В то же время для предельных значений параметра  $q$  наблюдается их сосредоточение на крайних слева ФУ, что тоже ухудшает качество. Это подтверждается видом гистограмм рис. 2 и значениями табл. 2.

Ясно, что в общем случае число ФУ, соответствующее максимуму критерия (2), может быть различным для разных баз изображений. При этом, в свою очередь, время распознавания с увеличением числа ФУ прямо пропорционально возрастает, поэтому количество ФУ надо брать поменьше, если нужно обеспечить высокое быстродействие. В принципе, можно считать, что зависимость времени распознавания от числа используемых ФУ в обсуждаемом методе носит линейный характер.

На рис. 3 приведены зависимости значения критерия (2) от числа используемых ФУ. Полученные кривые дают возможность согласовать значение критериев быстродействия и достоверности, выбирая необходимое число ФУ, обеспечивающее удовлетворение необходимым требованиям. Как видим, для базы насекомых при всех значениях числа ФУ кривая проходит выше, что говорит о худшей различимости описаний для этой базы в целом.

Отдельные результаты вычислений для исследуемых систем признаков и агрегированного критерия (4) приведены в табл. 3.

В целом зависимость критерия (4) от числа применяемых ФУ носит более плавный характер, чем для критерия (2), однако, закономерности роста и наличия максимума подтверждаются. Учитывая

незначительные изменения критерия (4) в зависимости от числа ФУ, делаем вывод, что этот критерий значительно менее чувствителен к изменению величины  $q$ , чем критерий (2).

Таблица 3

Значения критерия (4)

База изображений	Системы признаков				
	3	5	6	7	8
Животные	0,551	0,591	0,676	0,697	0,698
Насекомые	0,610	0,640	0,742	0,769	0,740

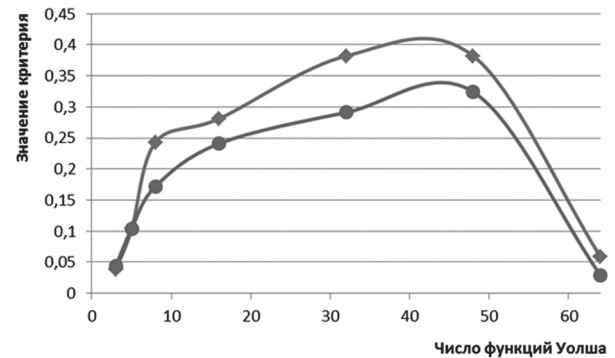


Рис. 3. Зависимость значений критерия (2) от числа ФУ для разных баз изображений (квадратик – насекомые, кружок – животные)

### Выводы

Матрица расстояний, вычисленная для фиксированных базы изображений, системы признаков и метода распознавания, может быть источником для построения серии критериев, которые позволяют определить качество распознавания на предварительном этапе при оценивании свойств и характеристик разрабатываемых методов. Рассмотренные в работе критерии (2), (4) являются конкретными вариантами обобщенного критерия (5) и позволяют выбрать параметры метода распознавания, при которых обеспечивается наиболее высокое качество его применения для распознавания в конкретных базах изображений. Другими вариантами критерия может быть подсчет числа элементов матрицы в строке (столбце), не превышающих заданный порог. Количество таких элементов можно также использовать как критерий.

Впервые показано, что матрица расстояний в фиксированной системе признаков для базы изображений представляет эффективный аппарат для построения новых критериев при оценивании качества распознавания на предварительном этапе выбора характеристик метода. Предложены и изучены варианты и свойства общего и конкретных критериев для оценивания качества.

Практически важным результатом есть вычисление конкретных значений критериев для сформированных баз изображений и построение зависимости значений критерия от числа используемых ФУ, что говорит о целесообразности

применения разработанных подходов в прикладных задачах компьютерного зрения.

Перспективой исследования есть непосредственное вычисление вероятности правильного распознавания на основе выбора параметров метода в соответствии с показателями разработанных критериев в целях подтверждения их эффективности и применимости в прикладных системах распознавания визуальной информации.

**Список литературы:** 1. *Гороховатский В. А.* Структурное распознавание изображений на основе моделей голосования признаков характерных точек / В. А. Гороховатский, Е. П. Путятин // Реєстрація, зберігання і обробка даних. – 2008. – Т. 10, № 4. – С. 75–85. 2. *Власенко Н. В.* Построение информативных компактных описаний и классификация объектов путем представления в ортогональном базисе / Н.В. Власенко // Бионика интеллекта: научн.-техн. журнал. – 2013. – № 1 (80). – С. 93–98. 3. *Маннинг К.Д.* Введение в информационный поиск / К. Д. Маннинг, П. Рагхаван, Х. Шютце: Пер. с англ. – М.: ООО «И.Д. Вильямс», 2011. – 528 с. 4. *Шкловец А.В.* Определение расстояний между точками на кусочно-гладких картах Кохонена / А. В. Шкловец, Н. Г. Аксак // Бионика интеллекта: научн.-техн. журнал. – 2012. – 1 (78). – С. 63–67. 5. *Bay H.* Surf: Speeded up robust features / Н. Bay, Т. Tuytelaars, L. Van

Gool // European Conference on Computer Vision. – 2006. – P. 404–417.

*Поступила в редколлегию 23.01.2014*

УДК 004.932.2:004.93'1

**Оцінювання ефективності систем ознак у методах розпізнавання зображень на основі структурного аналізу / Н.В. Власенко, В.О. Гороховатський // Біоніка інтелекту: наук.-техн. журнал. – 2014. – № 1 (82). – С. 38–42.**

В роботі запропоновані критерії оцінювання якості розпізнавання на основі обчислення матриці відстаней для обраного методу та системи ознак. Представлені результати обчислень значень критеріїв для конкретних методів та баз зображень.

Табл. 3. Іл. 3. Бібліогр.: 5 найм.

UDC 004.932.2:004.93'1

**Evaluation of feature-based systems effectiveness in based on structure analysis image recognition methods / N.V. Vlasenko, V.A. Gorohovatsky // Bionics of Intelligence: Sci. Mag. – 2014. – № 1 (82). – P. 38-42.**

This paper presents evaluation quality criteria for image recognition based on distance matrix computation for selected method and features system. In this work are shown criteria's values computation results for specific methods and image databases.

Fig. 3. Tab. 3. Ref.: 5 items.