

Т. Б. Мартинюк¹
 В. В. Ворожбит¹
 О. М. Перебейніс¹
 Т. Ю. Позднякова¹

НАВЧЕНИЙ КЛАСИФІКАТОР З РОЗШИРЕНИМИ ФУНКЦІОНАЛЬНИМИ МОЖЛИВОСТЯМИ

¹Вінницький національний технічний університет

Розглянуто алгоритм класифікації за дискримінантними функціями (ДФ). Показано процес формування двох вихідних векторів: класифікації та рангів ДФ з використанням оброблення елементів матриці за різницеvim зрізами. Запропоновано удосконалення блока класифікації у складі навченого класифікатора.

Ключові слова: навчений класифікатор, дискримінантна функція, ранжирування, різницеvий зріз.

Вступ

Класифікація є однією з найпоширеніших процедур розпізнавання образів. Тому класифікатори є базовою складовою сучасних інтелектуальних систем різного призначення [1—3]. На сьогодні найбільшу зацікавленість викликають класифікатори на базі нейромереж і гібридні з використанням нейро-фаззі технологій [4]. Але призначенням будь-якого класифікатора залишається віднесення об'єкта класифікації, заданого сукупністю його ознак, до певного класу, тобто побудова такого вирішального правила, щоб розпізнавання проводилося з мінімальною кількістю помилок [5, 6].

Разом з тим, враховуючи різноманіття методів і засобів класифікації, інтенсивно досліджуються варіанти розширення функціональних можливостей процедури класифікації, наприклад, за рахунок уточнення результату класифікації з визначенням найближчого класу до знайденого або формування низки найвірогідніших рішень класифікації [5].

Метою роботи є розширення функціональних можливостей відомого навченого класифікатора шляхом ранжирування класів, що дозволяє збільшити область прийняття можливих рішень класифікації.

Постановка задачі

За прототип для реалізації поставленої мети вибрано пристрій для розпізнавання образів [7], у якому використовується відомий спосіб класифікації за дискримінантними функціями (ДФ) [5, 6]. Вирішальне правило в цьому випадку має вигляд [8, 9]:

$$p_l = \left\{ 1 \mid \max g_l(Z), l = \overline{1, m} \right\} \Rightarrow Z \in C_l, \quad (1)$$

тобто до l -го класу C_l належить вхідний образ Z , якщо l -та ДФ $g_l(Z)$ є максимальною серед всіх ДФ $g_1(Z), \dots, g_m(Z)$, про що свідчить одиничне значення елементарного вихідного вектора класифікації, причому ДФ мають вигляд

$$g_l(Z) = \sum_{i=1}^n w_{ij} \cdot z_j, \quad (2)$$

де w_{ij} — відповідний елемент матриці ваг \mathbf{W} ; z_j — j -й компонент вхідного вектора Z .

На рис. 1 показано структурну схему пристрою для розпізнавання образів — навчений класифікатор, який містить n інформаційних входів вектора Z , вхідний блок, блок впорядкування навчальних сигналів, блок зважування, блок класифікації, блок формування цілочисельних ваг, виходи вектора P класифікації, входи керування та адреси, виходи ознак [7].

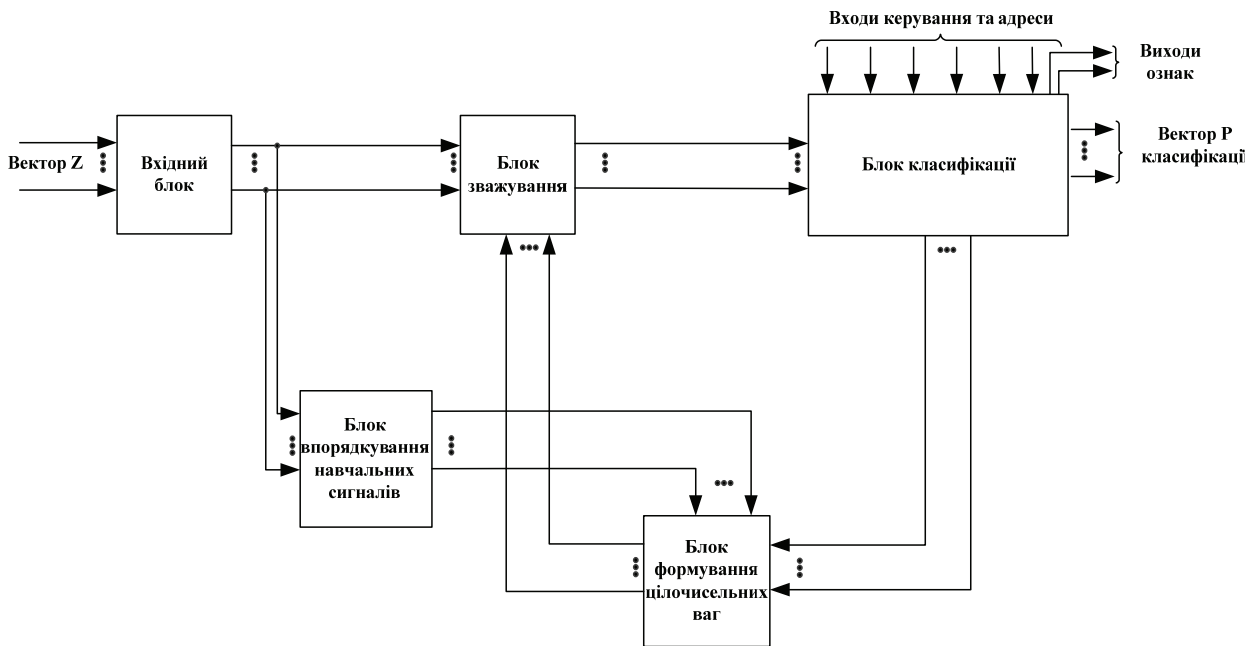


Рис. 1. Структурна схема навченого класифікатора

Навчений класифікатор (рис. 1) працює у двох режимах: режимі навчання (адаптації) та робочому режимі. У режимі навчання (адаптації) на n входів вхідного блока послідовно подаються значення компонент навчальних векторів, які далі надходять на входи блока впорядкування навчальних сигналів, де впорядковані компоненти навчальних векторів зберігаються в регістрах. Дані з виходів вхідного блока також подаються на входи блока зважування, де помножуються на вагові коефіцієнти, які на першому кроці мають початкові значення, а в процесі навчання послідовно налаштовуються за допомогою блока формування цілочисельних ваг. Формування ваг у цьому блоці залежить від значень сигналів навчального вектора, а також результатів, що отримуються на виходах блока класифікації.

У такому режимі в блоці класифікації за сигналами керування на його адресних входах та входах керування обробляються зважені навчальні сигнали, які подаються на його входи у вигляді матриць розміром $m \times n$, де m — кількість класів образів, n — розмірність вхідних векторів.

У робочому режимі на інформаційні входи пристрою подається досліджуваний n -вимірний об'єкт (образ) Z . При цьому дані з виходів вхідного блока надходять на входи блока зважування, який виконує множення кожного елемента вектора Z на відповідні йому цілочисельні значення ваг, які у вигляді матриці ваг \mathbf{W} розміром $m \times n$ були сформовані у режимі навчання і зберігаються у блоці зважування. Блок зважування видає зважений вхідний вектор у вигляді матриці A^0 розміром $m \times n$ на входи блока класифікації, який формує на своїх виходах класифікації m -вимірний сигнал належності вхідного об'єкта (образу) Z до певного класу з m визначених класів. Сигналом закінчення процесу класифікації образів є наявність одиничного сигналу на виході сигналу «Кінець» пристрою.

Блок впорядкування навчальних сигналів і блок формування цілочисельних ваг у робочому режимі вимкнуті. Причому на початку роботи пристрою блок класифікації встановлюється у початковий стан за сигналом на вході скиду пристрою [7].

До недоліку наведеного класифікатора можна віднести відсутність можливості визначення найближчого класу до визначеного в процесі розпізнавання.

Алгоритм класифікації образів за дискримінантними функціями

Початковими даними для алгоритму класифікації за ДФ є: вхідний образ Z у вигляді n -вимірного вектора $Z = (z_1, \dots, z_n)$; матриця ваг $\mathbf{W} = |w_{ij}|$, $i = \overline{1, m}$, $j = \overline{1, n}$; матриця елементів дискримінантних функцій A^0 розміром $m \times n$ вигляду [10, 11]:

$$A^0 = \begin{pmatrix} a_{1,1}^0 & \cdots & a_{1,j}^0 & \cdots & a_{1,n}^0 \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ a_{i,1}^0 & \cdots & a_{i,j}^0 & \cdots & a_{i,n}^0 \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ a_{m,1}^0 & \cdots & a_{m,j}^0 & \cdots & a_{m,n}^0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_1^0 \\ \vdots \\ A_i^0 \\ \vdots \\ A_m^0 \end{pmatrix}, \quad (3)$$

причому

$$a_{i,j}^0 = w_{ij} \cdot z_j. \quad (4)$$

У вектора рангів $R = (r_1, \dots, r_m)$ масивів A_1^0, \dots, A_m^0 всі елементи r_i дорівнюють одиниці, а у вектора класифікації $P = (p_1, \dots, p_m)$ всі елементи p_i дорівнюють нулю, тобто

$$R = (1 \ 1 \ \dots \ 1); \quad (5)$$

$$P = (0 \ 0 \ \dots \ 0). \quad (6)$$

Алгоритм класифікації образів за різницевиими зрізами (P3) має такий вигляд [10—12]:

Крок 1. У кожному стовпці матриці A^{t-1} , починаючи з матриці A^0 , виконують визначення мінімального елемента вигляду

$$\min_j^{t-1} = \min_i a_{i,j}^{t-1}, \quad j = \overline{1, n}, \quad t = \overline{1, N}, \quad (7)$$

у подальшому поіменованого як мінелемент, де N — кількість циклів оброблення. В результаті формують вектор-рядок з n мінелементів вигляду

$$\text{Min}_j^{t-1} = (\min_1^{t-1}, \dots, \min_j^{t-1}, \dots, \min_n^{t-1}). \quad (8)$$

Крок 2. Виконують паралельне віднімання j -го мінелемента від кожного i -го елемента відповідного j -стовпця матриці A^{t-1} , де $t = \overline{1, N}$ і формують невпорядковану матрицю вигляду \overline{A}^t , причому

$$\overline{a}_{i,j}^t = \overline{a}_{i,j}^{t-1} - \min_j^{t-1}. \quad (9)$$

Далі перевіряють дві умови: умову наявності m нульових рядків, тобто

$$\overline{A}_1^t = \dots = \overline{A}_i^t = \dots = \overline{A}_m^t = 0, \quad t = \overline{1, N} \quad (10)$$

і умову появи поточного k -го нульового рядка

$$\overline{A}_k^t = 0, \quad k = \overline{1, m}. \quad (11)$$

За виконання умови (10) процес оброблення закінчують. Перехід до кроку 4.

Виконання умови (11) свідчить про те, що у деякому циклі t у двовимірній матриці \overline{A}^t з'являється деякий k -й рядок з усіма нульовими елементами. Цей рядок вказує на k -й масив чисел $A_k^0(1)$ ($k = \overline{1, m}$), який є мінімальним за сумою своїх елементів серед початкових масивів A_1^0, \dots, A_m^0 .

Нульовий k -й рядок в подальшому обробленні участі не приймає і значення його елементів не беруть до уваги при визначенні мінелементів кожного стовпця поточної матриці \overline{A}^t . Одночасно маскують елемент r_k вектора рангів R (5), що відповідає нульовому рядку \overline{A}_k^t матриці \overline{A}^t , а всі інші елементи вектора рангів R збільшують на одиницю. Перехід до кроку 3.

Крок 3. Після перевірки виконання умов (10), (11) для всіх рядків поточної матриці \overline{A}^t паралельно виконують транспозицію елементів із просуванням праворуч усіх нульових елементів і формують впорядковану матрицю A^t , для якої повторюють цикли оброблення, які складаються з вищезазначеної послідовності дій, починаючи з визначення мінелемента (7) у кожному стовпці

поточної матриці A^l (крок 1).

Оброблення кожної неупорядкованої матриці $\overline{A^l}$ триває доки не виконається умова (10) наявності m нульових рядків. Результатом оброблення є останній рядок A^N_l , який має нульові елементи за умови, що решта рядків були виключені з оброблення як нульові. Цей рядок матриці $\overline{A^N}$ за умови (10) вказує на деякий l -й масив чисел $A_l^0 \dots (l \in \overline{1, m})$, який є максимальним за сумою своїх елементів серед початкових масивів чисел A_1^0, \dots, A_m^0 . Одночасно з тим формується вектор рангів R , всі елементи якого відповідають рангам масивів чисел у відсортованій послідовності початкових масивів даних A_1^0, \dots, A_m^0 . Формується вихідний вектор $P = (p_1, \dots, p_m)$, в якому тільки один елемент p_l дорівнює одиниці, а всі інші дорівнюють нулю, що дозволяє визначити належність вхідного образу Z до l -го класу.

Крок 4. Завершення процесу. Величина N дорівнює кількості циклів оброблення, виконаних в процесі пошуку максимального масиву чисел серед масивів A_1^0, \dots, A_m^0

Вдосконалення блока класифікації у складі навченого класифікатора

Для вдосконалення блока класифікації (рис. 2), який складається з обчислювального блока, вузла аналізу і вузла оброблення, було введено блок ранжирування, на якому при завершенні процесу класифікації формується вектор рангів $R = (r_1, \dots, r_m)$ [12].

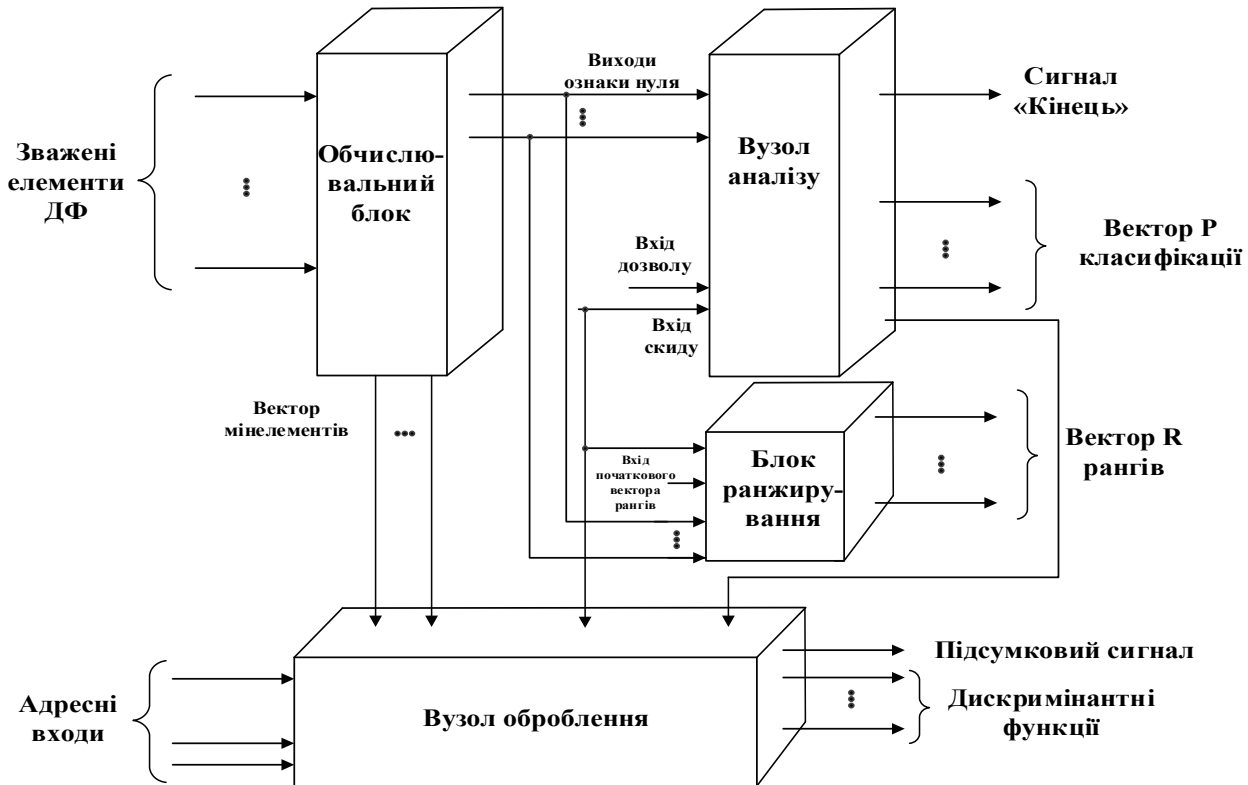


Рис. 2. Блок класифікації

Блок ранжирування (рис. 3) складається з m вузлів рангу, кожний з яких містить елемент НІ, RS-тригер, два елементи І, лічильник СТ [12]. На входи блока ранжирування подаються початковий вектор рангів R , ознаки нуля з виходів обчислювального блока і сигнал скиду, а на його mk -розрядних виходах, де $k = \log_2 m$, формуються відповідні ранги m ДФ.

Імітаційне моделювання процесу класифікації з використанням РЗ [13] показало, що елемент r_l вектора R , значення якого дорівнює максимальному рангу m , відповідає одиничному значенню елемента p_l вектора класифікації P . Крім того моделювання підтвердило, що процеси ранжирування та класифікації проходять одночасно, що не вимагає витрат додаткового часу.

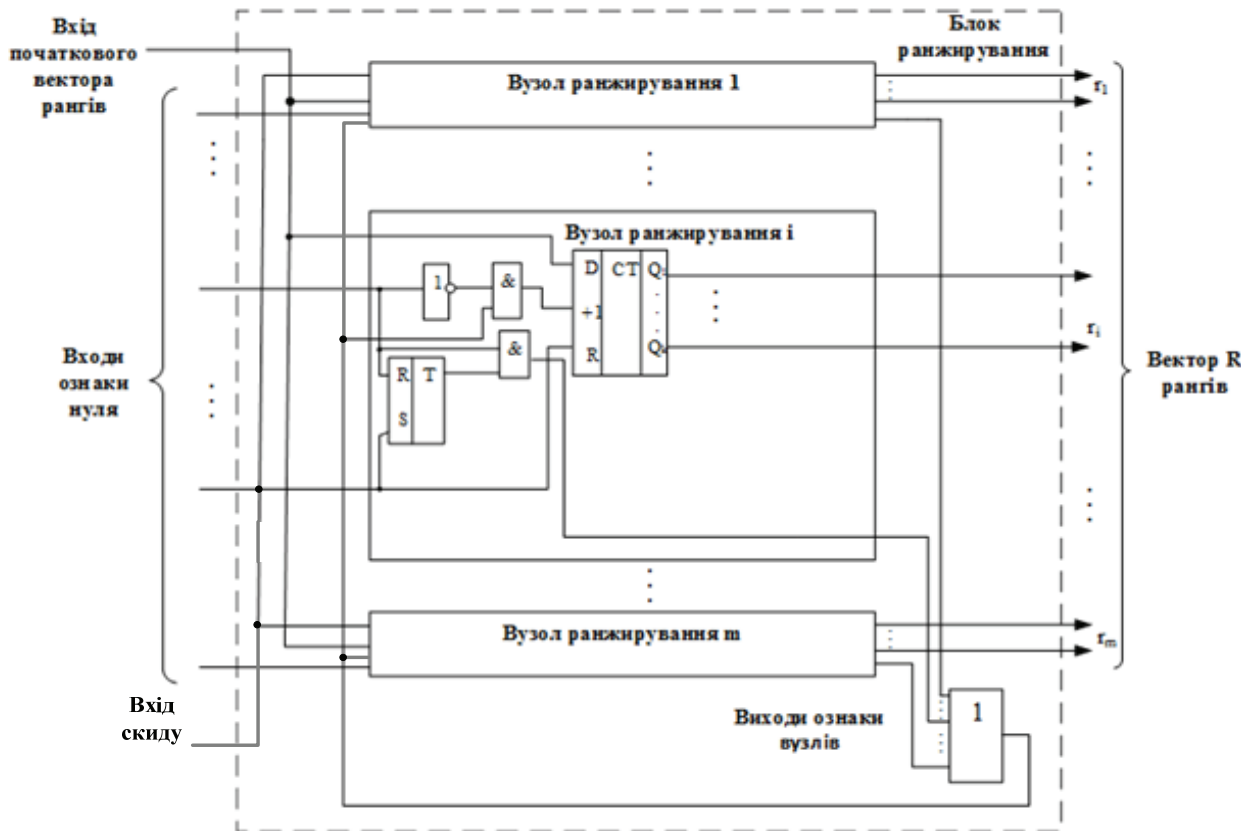


Рис. 3. Блок ранжирування

Приклад класифікації образів з ранжируванням дискримінантних функцій

Розглянемо приклад реалізації класифікації n -вимірного образу у вигляді векторного масиву чисел (рис. 4). Нехай маємо вхідний образ $Z = (5\ 3\ 6\ 4)$ та матрицю вагових коефіцієнтів [12]:

$$W = \begin{pmatrix} 5 & 6 & 2 & 2 \\ 4 & 3 & 1 & 5 \\ 2 & 7 & 5 & 1 \\ 3 & 2 & 4 & 7 \end{pmatrix}. \quad (12)$$

Після виконання множення вагових коефіцієнтів на елементи вхідного образу, отримаємо початкову двовимірну матрицю вигляду

$$A^0 = \begin{pmatrix} 25 & 18 & 12 & 8 \\ 20 & 9 & 6 & 20 \\ 10 & 21 & 30 & 4 \\ 15 & 6 & 24 & 28 \end{pmatrix}. \quad (13)$$

Початкові ранги r_1, \dots, r_4 масивів A_1^0, \dots, A_4^0 дорівнюють одиниці, а елементи p_1, \dots, p_4 вектора P дорівнюють нулю. Цикли оброблення матриці A^0 (13) показано на рис. 4.

По закінченню обробки матриць за отриманими даними експерт ухвалює остаточне рішення, наприклад, стосовно діагнозу захворювання, враховуючи клас з максимальним рангом і найближчий до нього.

<p>0-й цикл</p> $A^0 = \begin{pmatrix} 25 & 18 & 12 & 8 \\ 20 & 9 & 6 & 20 \\ 10 & 21 & 30 & 4 \\ 15 & 6 & 24 & 28 \end{pmatrix}$	<p>1-й цикл</p> $\begin{aligned} Min^0 &= (10 \ 6 \ 6 \ 4) \\ R^1 &= (1 \ 1 \ 1 \ 1) \\ p^1 &= (0 \ 0 \ 0 \ 0) \\ A^1 &= \begin{pmatrix} 15 & 12 & 6 & 4 \\ 10 & 3 & 16 & 0 \\ 15 & 24 & 0 & 0 \\ 5 & 18 & 24 & 0 \end{pmatrix} \end{aligned}$	<p>2-й цикл</p> $\begin{aligned} Min^1 &= (5 \ 3 \ 0 \ 0) \\ R^2 &= (1 \ 1 \ 1 \ 1) \\ p^2 &= (0 \ 0 \ 0 \ 0) \\ A^2 &= \begin{pmatrix} 10 & 9 & 6 & 4 \\ 5 & 16 & 0 & 0 \\ 10 & 21 & 0 & 0 \\ 15 & 24 & 0 & 0 \end{pmatrix} \end{aligned}$
<p>3-й цикл</p> $\begin{aligned} Min^2 &= (5 \ 9 \ 0 \ 0) \\ R^3 &= (1 \ 1 \ 1 \ 1) \\ p^3 &= (0 \ 0 \ 0 \ 0) \\ A^3 &= \begin{pmatrix} 5 & 6 & 4 & 0 \\ 7 & 0 & 0 & 0 \\ 5 & 12 & 0 & 0 \\ 10 & 15 & 0 & 0 \end{pmatrix} \end{aligned}$	<p>4-й цикл</p> $\begin{aligned} Min^3 &= (5 \ 0 \ 0 \ 0) \\ R^4 &= (1 \ 1 \ 1 \ 1) \\ p^4 &= (0 \ 0 \ 0 \ 0) \\ A^4 &= \begin{pmatrix} 6 & 4 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 0 & 0 \\ 12 & 0 & 0 & 0 \\ 5 & 15 & 0 & 0 \end{pmatrix} \end{aligned}$	<p>5-й цикл</p> $\begin{aligned} Min^4 &= (2 \ 0 \ 0 \ 0) \\ R^5 &= (1 \ 1 \ 1 \ 1) \\ p^5 &= (0 \ 0 \ 0 \ 0) \\ A^5 &= \begin{pmatrix} 4 & 4 & 0 & 0 \\ - & - & - & - \\ 10 & 0 & 0 & 0 \\ 3 & 15 & 0 & 0 \end{pmatrix} \end{aligned}$
<p>6-й цикл</p> $\begin{aligned} Min^5 &= (3 \ 0 \ 0 \ 0) \\ R^6 &= (2 \ 1 \ 2 \ 2) \\ p^6 &= (0 \ 0 \ 0 \ 0) \\ A^6 &= \begin{pmatrix} 1 & 4 & 0 & 0 \\ - & - & - & - \\ 7 & 0 & 0 & 0 \\ 15 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \end{aligned}$	<p>7-й цикл</p> $\begin{aligned} Min^6 &= (1 \ 0 \ 0 \ 0) \\ R^7 &= (2 \ 1 \ 2 \ 2) \\ p^7 &= (0 \ 0 \ 0 \ 0) \\ A^7 &= \begin{pmatrix} 4 & 0 & 0 & 0 \\ - & - & - & - \\ 6 & 0 & 0 & 0 \\ 14 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \end{aligned}$	<p>8-й цикл</p> $\begin{aligned} Min^7 &= (4 \ 0 \ 0 \ 0) \\ R^8 &= (2 \ 1 \ 2 \ 2) \\ p^8 &= (0 \ 0 \ 0 \ 0) \\ A^8 &= \begin{pmatrix} - & - & - & - \\ - & - & - & - \\ 2 & 0 & 0 & 0 \\ 10 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \end{aligned}$
<p>9-й цикл</p> $\begin{aligned} Min^8 &= (2 \ 0 \ 0 \ 0) \\ R^9 &= (2 \ 1 \ 3 \ 3) \\ p^9 &= (0 \ 0 \ 0 \ 0) \\ A^9 &= \begin{pmatrix} - & - & - & - \\ - & - & - & - \\ - & - & - & - \\ 8 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \end{aligned}$	<p>10-й цикл</p> $\begin{aligned} Min^9 &= (8 \ 0 \ 0 \ 0) \\ R^{10} &= (2 \ 1 \ 3 \ 4) \\ p^{10} &= (0 \ 0 \ 0 \ 1) \\ A^{10} &= \begin{pmatrix} - & - & - & - \\ - & - & - & - \\ - & - & - & - \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \end{aligned}$	<p>Результат</p> <p>Образ, представлений вектором ознак Z, відноситься до 4-го класу з рангом 4. Найближчим до нього є 3-й клас із рангом 3. Найменший ранг має 2-й клас</p>

Рис. 4. Приклад оброблення матриць елементів дискримінантних функцій

Висновки

1. Запропоновано структуру навченого класифікатора, який відрізняється організацією блока класифікації, що дозволяє розширити функціональні можливості класифікатора завдяки ранжируванню результатів класифікації, а саме присвоєння рангів ДФ з визначенням максимального і найближчого до нього.

2. Вдосконалено алгоритм класифікації образів за ДФ з обробленням за РЗ, який має базовий цикл з 3-х кроків і результатом якого є формування вектора рангів R одночасно із формуванням вектора класифікації P.

3. Розроблено функціональну схему блока ранжирування ДФ, який формує вектор рангів R всіх ДФ і має регулярну структуру, що дозволяє нарощувати його розмірність з урахуванням кількості класів, тобто ДФ.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Распознавание изображений [Електронний ресурс]. — Режим доступу : <http://sumschool.sumdu.edu.ua>.
2. Аналитический обзор методов распознавания образов и принятия решений [Електронний ресурс]. — Режим доступу : <http://lc.boom.ru/aidos93/3.html>.
3. Рангайян Р. М. Анализ биомедицинских сигналов. Практический подход / Р. М. Рангайян ; пер. с англ. А. П. Немирко. — М. : ФИЗМАТЛИТ, 2007. — 400 с.

4. Осовский С. Нейронные сети для обработки информации / С. Осовский ; пер. с польск. И. Д. Рудинского. — М. : Финансы и статистика, 2004. — 344 с. — ISBN 5-279-02567-4.
5. Юнкеров В. И. Математико-статистическая обработка данных медицинских исследований / В. И. Юнкеров, С. Г. Григорьев. — СПб : ВМедА, 2002. — 266 с. — ISBN 5-94277-011-5.
6. Бернюков А. К. Распознавание биоэлектрических сигналов / А. К. Бернюков, Л. Т. Сушкова // Зарубежная радиоэлектроника. — 1996. — № 12. — С. 47—51.
7. Патент 92682 України, МПК⁸ G06K 9/00. Пристрій для розпізнавання образів / Т. Б. Мартинюк, Ю. Ф. Кутаєв, Л. І. Тимченко, О. М. Гуцол. — № a200904457 ; заявл. 05.05.2009 ; опубл. 25.11.2010, Бюл. № 22.
8. Дискриминантный анализ [Электронный ресурс]. — Режим доступа : [http:// statsoft.ru/home/textbook/modules/stdiscan.html](http://statsoft.ru/home/textbook/modules/stdiscan.html).
9. Местецкий Л. М. Математические методы распознавания образов : курс лекций / Л. М. Местецкий. — М. : МГУ, 2002. — 85 с.
10. Мартинюк Т. Б. Паралельний метод класифікації біоелектричних сигналів за принципом різницевої зрізів / Т. Б. Мартинюк, С. В. Павлов, Ж. О. Бітюкова, Н. В. Белік // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. — 2004. — № 2 (8). — С. 110—112. — ISSN 1681-7893.
11. Мартинюк Т. Б. Схемотехнічні рішення базових блоків для класифікатора образів / Т. Б. Мартинюк, Г. Д. Дорошенко, О. М. Гуцол // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2012. — № 3. — С. 132—141. — ISSN 1997-9266.
12. Патент на корисну модель 94439 України, МПК⁸ G06K 9/00. Пристрій для розпізнавання образів / Т. Б. Мартинюк, А. В. Кожем'яко, В. В. Ворожбит, О. М. Перебейніс. — № u201406401; заявл. 10.06.2014; опубл. 10.11.2014, Бюл. № 21.
13. Мартинюк Т. Б. Моделювання процесу ранжирування значень дискримінантних функцій / Т. Б. Мартинюк, А. В. Медвідь, О. М. Гуцол // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2013. — № 5. — С. 74—80. — ISSN 1997-9266.

Рекомендована кафедрою лазерної та оптикоелектронної техніки ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 24.06.2015

Мартинюк Тетяна Борисівна — д-р техн. наук, доцент, професор кафедри лазерної та оптикоелектронної техніки, e-mail: martyniuk.t.b@gmail.com;

Ворожбит Валерія Віталіївна — студентка факультету комп'ютерних систем та автоматики, e-mail: juny_93@i.ua;

Перейбейніс Олександр Миколайович — студент факультету комп'ютерних систем та автоматики, e-mail: sanok_perebeynis@mail.ru;

Позднякова Тетяна Юрївна — студентка факультету комп'ютерних систем та автоматики, e-mail: leonia09@mail.ru.

Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця

T. B. Martyniuk¹
V. V. Vorozhbyt¹
O. M. Perebeinis¹
T. Yu. Pozdniakova¹

Trained classifier with the enhanced functionality

¹Vinnitsia National Technical University

The algorithm of classification by discriminate functions (DFs) has been considered in the paper. The process of classification and ranking of DF output vectors with processing matrix element by difference slices has been shown. Improvement of classification block of a trained classifier has been offered in the article.

Keywords: trained classifier, discriminate function, ranking, difference slice.

Martyniuk Tetiana B. — Dr. Sc. (Eng.), Assistant Professor, Professor of the Chair of Laser and Optoelectronic Technique, e-mail: martyniuk.t.b@gmail.com;

Vorozhbyt Valeriia V. — Student of the Department of Computer Systems and Automation, e-mail: juny_93@i.ua;

Perebeinis Oleksandr M. — Student of the Department of Computer Systems and Automation, e-mail: sanok_perebeynis@mail.ru;

Pozdniakova Tetiana Yu. — Student of the Department of Laser and Optoelectronic Technique, e-mail: leonia09@mail.ru.

Т. Б. Мартынюк¹
В. В. Ворожбит¹
О. М. Перебейнис¹
Т. Ю. Позднякова¹

Обученный классификатор с расширенными функциональными возможностями

¹Вінницький національний технічний університет

Рассмотрен алгоритм классификации по дискриминантной функции (ДФ). Показан процесс формирования двух выходных векторов: классификации и рангов ДФ с использованием обработки элементов матрицы с разностными срезами. Предложено усовершенствование блока классификации в составе обученного классификатора.

Ключевые слова: обученный классификатор, дискриминантная функция, ранжирования, разностный срез.

Мартынюк Татьяна Борисовна — д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры лазерной и оптикоэлектронной техники, e-mail: martyniuk.tb@gmail.com;

Ворожбит Валерия Витальевна — студент факультета компьютерных систем и автоматики, e-mail: juny_93@i.ua;

Перебейнис Александр Николаевич — студент факультета компьютерных систем и автоматики, e-mail: sanok_perebeynis@mail.ru;

Позднякова Татьяна Юрьевна — студент факультета компьютерных систем и автоматики, e-mail: leoncia09@mail.ru