

УДК 004.272

Т. Б. Мартинюк, д-р техн. наук, проф.; А. В. Кожем'яко, канд. техн. наук, доц.;
Д. О. Каташинський; І. В. Булига

ОСОБЛИВОСТІ ОБЧИСЛЮВАЛЬНОГО ПРОЦЕСУ У МАТРИЧНОМУ КЛАСИФІКАТОРІ ОБ'ЄКТІВ

Систолічний підхід є перспективним напрямком удосконалення обчислювальних засобів через вдале поєднання високого рівня паралелізму оброблення даних та регулярності систолічної структури. Зокрема, двовимірна систолічна структура потребує специфічного оброблення даних у вигляді матриці. У роботі розглядається варіант реалізації систолічного процесу класифікації об'єктів за лінійними дискримінантними функціями із застосуванням методу різницевих зрізів. Для цього n елементів кожної m з лінійних дискримінантних функцій представлено у вигляді матриці розміром $m \times n$ елементів. В процесі застосування різницево-зрізового методу систолічне оброблення виконується у кожному циклі спочатку паралельно по стовпцях матриці із застосуванням швидкісної операції декремента, а потім паралельно порядках матриці виконується транспозиція (зсув) нульових елементів відповідно або праворуч, або ліворуч у межах кожного рядка. Таким чином визначається максимальна лінійна дискримінантна функція. У роботі пропонується удосконалення матричного методу оброблення елементів лінійних дискримінантних функцій з урахуванням від'ємних коефіцієнтів зміщення, які представлено у матричному вигляді. Це дозволяє нормалізувати елементи лінійних дискримінантних функцій, а отже, підвищити достовірність отриманих результатів. Наведено удосконалену структуру класифікатора об'єктів, у блок класифікації якого введено разом з вузлом матричного оброблення вузол нормалізації. Крім того, для формування матриці ваг W задіяно навчальний блок на входи якого подається навчальна вибірка для вирішення конкретної задачі класифікації. Реалізацію запропонованої систолічної структури класифікатора об'єктів можна застосувати апаратно як прискорювач у підсистемах підтримки прийняття рішень в експертних системах різного призначення. Особливий інтерес при цьому представляє використання такого класифікатора під час медичного діагностування, що прискорить процес прийняття рішень медичним спеціалістом.

Ключові слова: класифікатор об'єктів, дискримінантний аналіз, матрична структура, систолічний процес.

Вступ

Однією з поширених процедур в теорії розпізнавання образів в контексті штучного інтелекту є класифікація об'єктів [1 – 3]. Це, в першу чергу, пов'язано з тим, що саме у багатьох нейромереж однією з базових властивостей є здатність до класифікації вхідних образів [4 – 6].

Актуальність тематики

Процес класифікації об'єктів знаходить застосування у різних прикладних областях, серед яких особливе місце займає медичне діагностування [7,8]. При цьому, сьогодні особлива увага приділяється застосуванню під час медичного діагностування саме нейромережних технологій [9 – 12], оскільки класифікатор як базовий вузол входить до складу підсистеми підтримки прийняття рішень в експертних системах різного призначення [13,14].

Метою роботи є аналіз особливостей обчислювального процесу у класифікаторі об'єктів із застосуванням дискримінантного аналізу.

Постановка задачі

В якості моделі дослідження обрано підхід до класифікації об'єктів на базі

дискримінантного аналізу, а саме, із задіянням лінійних дискримінантних функцій (ЛДФ) [15 – 17]. В цьому випадку базовими є такі співвідношення для ЛДФ:

$$g_i(X) = \sum_{j=1}^n w_{ij} x_j - w_{io} x_o, \quad i = \overline{1, m} \quad (1)$$

$$X \in C_k \Leftrightarrow k = \operatorname{argmax}\{g_k(X)\}, \quad k = \overline{1, m} \quad (2)$$

де x_j – j -ий елемент n -вимірний вхідного вектора ознак X ; w_{ij} – ваговий коефіцієнт j -го елемента i -ої ЛДФ $g_i(X)$; $w_{io}x_o$ – вільний елемент (зміщення); $C = \{C_1, \dots, C_m\}$ множина класів і m – кількість класів.

На рис. 1 наведено відповідну структуру класифікатора об'єктів, базовими складовими якого є навчальний блок, формувач ЛДФ та максимізатор. Якщо навчальний блок обчислює матрицю $\mathbf{W}$, що містить коефіцієнти $w_{io}, \dots, w_{ij}$ для кожної ЛДФ $g_i(X)$, то формувач ЛДФ реалізує співвідношення (1), а максимізатор виділяє максимальну k -ту ЛДФ $g_k(X)$ і формує одиничний вихідний сигнал y_k , що свідчить про визначення класу C_k за формулою (2).

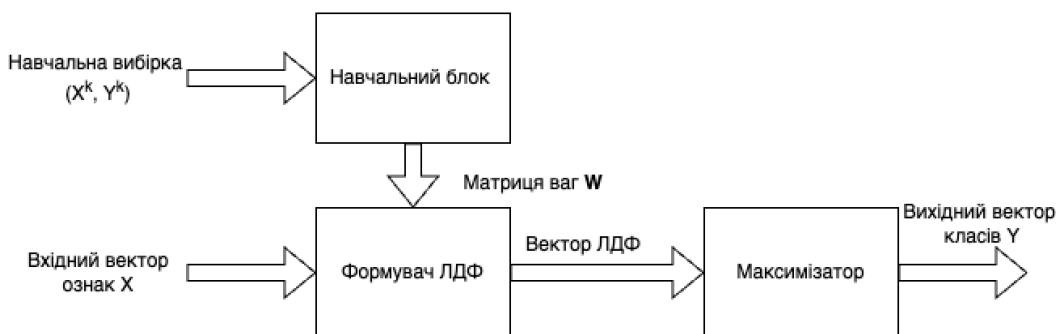


Рис. 1. Структура класифікатора об'єктів

У статті [18] показано, яким способом можна об'єднати дві важливі процедури (1) та (2). Для цього треба перейти до безпосереднього оброблення елементів всіх ЛДФ у матричному вигляді.

При цьому, такий підхід передбачає задіяння систолічних архітектур, оскільки перспективність їх використання пов'язана з вдалим поєднанням швидкодії через високий паралелізм оброблення з ефективним використанням апаратних засобів через регулярність структури [19,20], зокрема з орієнтацією на перспективну елементу базу ПЛІС [21], що забезпечує компактність, надійність та швидкодію обчислювальних структур.

Отже, у статті [18] розглядається як приклад матричний варіант оброблення саме зважених елементів ЛДФ з формули (1) вигляду:

$$a_{ij}^o = w_{ij} x_j, \quad i = \overline{1, m}, j = \overline{1, n}, \quad (3)$$

оскільки вони мають однаковий додатний знак, а отже, входять до суми $g_i(X)$, $i = \overline{1, m}$ як доданки. В результаті не враховано вільний елемент $w_{io}x_o$ з формули (1) через його від'ємний знак. Таким чином, результат класифікації в цьому випадку не може бути слухним.

Матричний підхід до оброблення елементів ЛДФ

Для врахування від'ємного елемента $w_{io}x_o$ у формулі (1) необхідно виконати

нормування відповідних доданків $w_{ij}x_j$. Це необхідно зробити до процесу матричного оброблення всіх елементів a_{ij}^o (3), які, у свою чергу, представлено як елементи відповідної матриці A^o розмірністю $m \times n$ вигляду [18]:

$$A^o = \begin{bmatrix} a_{11}^o & \dots & a_{1n}^o \\ a_{m1}^o & \dots & a_{mn}^o \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Якщо представити вагові коефіцієнти w_{oi} для всіх m ЛДФ $g_i(X)$ (1) у вигляді вектора зміщень B , враховуючи, що $x_o=1$, то можна задіяти такий варіант їх подання для врахування у матриці A^o (4). Пропонується сформувати матрицю зміщень B розмірністю $m \times n$ з елементами вигляду:

$$b_{ij} = \frac{w_{io}}{m}, \quad (5)$$

де m – кількість класів.

В результаті матриця зміщень B матиме вигляд:

$$B = \begin{bmatrix} b_{11} & \dots & b_{1n} \\ b_{m1} & \dots & b_{mn} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Отже, якщо елементи a_{ij}^o кожного рядка матриці A^o представляють собою доданки i -ої ЛДФ $g_i(X)$, то зменшення їх на однакову для кожної ЛДФ величини w_{io} дозволить врахувати від'ємний елемент у формулі (1). Такий підхід з використання співвідношення (5) можливий через те, що за замовчуванням приймається $x_o=1$.

Таким чином, остаточно нормалізована матриця елементів ЛДФ формується так:

$$A = A^o - B, \quad (7)$$

де A – матриця з нормованими елементами a_{ij}^o початкової матриці A^o (4).

Особливості обчислювального процесу у матричному класифікаторі

В подальшому елементи матриці A (7) обробляються за методом різницевого зрізів, а саме, спочатку паралельно по стовпцях, а потім паралельно по рядках в кожному циклі оброблення [18]. При цьому видалення відповідного мінімального ненульового елемента паралельно у всіх стовпцях матриці A дозволяє виконати порівняння всіх m ЛДФ $g_i(X)$, оскільки порівнюються їх одноіменні елементи a_{ij} , що в результаті забезпечує виділення серед всіх ЛДФ максимальної.

При цьому, операція транспозиції (просування) праворуч або ліворуч сформованих нульових елементів a_{ij} у t -му циклі у всіх рядках матриці A^t паралельно виконується з урахуванням властивості комутативності для сум елементів. Такі дії дозволяють уникнути в подальшому впливу сформованих нульових елементів у кожному стовпці матриці A .

Таким чином, введення перед основним процесом оброблення елементів початкової матриці A^o нормування її елементів з врахуванням вільних елементів ЛДФ потребує під'єднання до матричного обчислювача [18] у структурі класифікатора (рис. 1) вузла нормалізації, де реалізуються функціонально операції (5) і (6).

На рис.2 представлено вдосконалену структуру класифікатора об'єктів, де у вузлі матричного оброблення об'єднано функції формувача ЛДФ та максимізатора (рис. 1).

Структура та принцип функціонування вузла матричного оброблення у блоці класифікації (рис. 2) повністю відповідає структурі та принципу функціонування класифікатора об'єктів зі статті [18]. При цьому, структурна регулярність базового вузла матричного оброблення у блоці класифікації зобов'язана використанню реверсивних лічильників для реалізації базових операцій різницево-зрізового оброблення елементів матриці ЛДФ [18, 22].

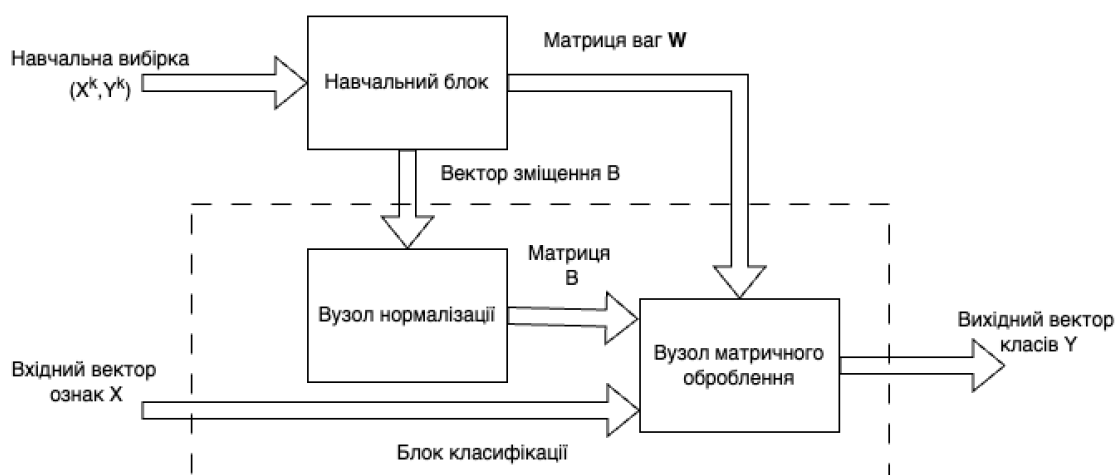


Рис. 2. Вдосконалена структура класифікатора об'єктів

Висновки

1. Удосконалення матричного методу оброблення елементів лінійних дискримінантних функцій пов'язано з урахуванням коефіцієнтів зміщення за рахунок їх представлення у матричному вигляді, що дозволяє використати метод різницево-зрізового оброблення елементів матриці для визначення максимальної ЛДФ.

2. Різницево-зрізовий метод оброблення, у свою чергу, забезпечує ефективне застосування систолічної матричної структури з високим рівнем паралелізму оброблення елементів матриці відповідно по її стовпцях і рядках.

3. Апаратна реалізація запропонованої структури класифікатора об'єктів представляє інтерес як прискорювач у підсистемах підтримки прийняття рішень, особливо в експертних системах медичного діагностування.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Довбуш А. С. Основи проектування інтелектуальних систем : навч. посібник. Суми, Україна: Видавництво СумДУ, 2009. 171 с.
2. Шаховська Н. Б., Камінський Р. М., Вовк О. Б. Системи штучного інтелекту. Львів, Україна: Видавництво Львівської політехніки, 2018. 392 с.
3. Куусуль Н. М., Шеметов А. Ю., Лавренюк А. М. Інтелектуальні обчислення : навч. посібник. Київ, Україна: Наукова думка, 2006. 186 с.
4. Руденко О. Г., Бодяньський Є. В. Штучні нейронні мережі : навч. посібник. Харків, Україна: ТОВ «Компанія СМІТ»; 2006. 404 с.
5. Haykin S. Neural Networks, A Comprehensive Foundation, 2d ed. N. J.: Prentice Hall, Upper Saddle River, 1999. 842 p.
6. Callan R. The Essence of Neural networks. Prentice Hall Europe, 1999. 232 p.
7. Rangayan R. M. Biomedical Signal Analysis, 2d ed. Wiley-IEEE Press, 2015. 720 p.
8. Мартинюк Т. Б., Кожем'яко А. В., Каташинський Д. О., Булига І. В. Особливості процесу класифікації у контексті медичного діагностування. *Наукові праці ВНТУ*. 2025. №1. URL: <https://doi.org/10.31649/2307-5376-2025-1-80-85>.
9. Neural network approach in the stroke diagnosis / L. Kupershtein et al. *Proc. of the 2016 IEEE 1st International Conference on Data Mining and Processing, DSMP 2016*. P. 138–141. DOI: 10.1109/DSMP.2016.7583525.
10. Сверстюк А. С., Горкуленко А. Б. Неромережеві експертні системи для діагностування прогнозування стану серцево-судинної системи. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. 2014. №4. С. 102–108.
11. Мартинюк Т. Б., Запетрук Я. В. Нейромережевий підхід до медичної експрес-діагностики. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2019. №6. С. 37–44.
12. Awad S. R., Alghared F. G. Encoding-Based Machine Lening Approach For Health Classafication and Remote Monitoring of Cardiac Patients. *Algoritms*. 2025. №18 (2). P. 94. <https://doi.org/10.3390/a 18020094>.

13. Вуйцик І., Готра О. З., Григор'єв В. В. Експертні системи : навч. посібник. Львів, Україна: Ліга Прес, 2006. 290 с.
14. Гнатієнко Г. М., Снитюк В. Є. Експертні технології прийняття рішень. Київ, Україна: ТОВ «Маклаут», 2008. 444 с.
15. Hayes T. L., Kanan C. Lifelong Machine Learning with Deep Streaming Linear Discriminant Analysis. 2020 *IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW)*, Seattle, WA, USA, 2020. P. 887–896. DOI: 10.1109/CVPRW50498.2020.00118.
16. Yang X. Linear Discriminant Analysis, Explained. URL: <https://towardsdatascience.com/linear-discriminant-analysis-explained-f88be6c1e00b>.
17. Applications of Discriminant Analysis Methods in Medical Diagnostics / T. B. Martyniuk et. al. *Proc. Of SPIE-Optical Fibers and Their Applications*. 2012. Vol. 8698, Article №86980G.
18. Систолічна архітектура матричного обчислювача для класифікатора об'єктів / Т. Б. Мартинюк та ін. *Electronic Modeling*. 2021. V. 43, № 3. С. 36–46. DOI: <https://doi.org/10.15407/emodel.4303.036>.
19. Meribont M., Firands A. A new systolic multiprocessor architecture for realtime soft tomography algorithms. *Parallel Computing*. 2016. Vol. 52. P. 144–155. <https://doi.org/10.1016/j.parco.2016.01.002>.
20. Bagavath C., Saraniya O. Evolutionary Mapping Techniques for Systolic Computing System. *Deep Learning and Parallel Computing Environment for Bioengineering Systems, Academic Press*. 2019. P. 207–223. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816718-2.00020-8>.
21. Design of Digital Advanced System Dased on Programmable System on Chip / N. Aranzabal et al. Field-Programmable Gate Array”, *InTech*. 2017. URL: https://www.researchgate.net/publication/317311938_Design_of_Digital_Advanced_Systems_Based_on_Programmable_System_on_Chip.
22. Кравчук С. О., Шонін В. О. Основи комп'ютерної техніки : навч. посібник. Київ, Україна: ІВЦ «Видавництво Політехніка», 2002. 344 с.

Стаття надійшла до редакції 25.06.2025.

Стаття пройшла рецензування 22.07.2025.

Мартинюк Тетяна Борисівна – д-р техн. наук, професор кафедри обчислювальної техніки, e-mail: martyniuk.t.b@gmail.com.

Кожем'яко Андрій Вікторович – канд. техн. наук, доцент кафедри обчислювальної техніки, e-mail: kvantron@vntu.edu.ua.

Каташинський Дмитро Олександрович – аспірант кафедри обчислювальної техніки, e-mail: katashinskydmitry@gmail.com.

Булига Ігор Володимирович – аспірант кафедри обчислювальної техніки.
Вінницький національний технічний університет.