Порівняльний аналіз оптимізації системи контрольних допусків при розпізнаванні інфраструктурних об'єктів

Максим Руденко
кафедра комп'ютерних наук
Сумський державний університет
Суми, Україна
m.rudenko@cis.sumdu.edu.ua

Микита Мироненко
кафедра комп'ютерних наук
Сумський державний університет
Суми, Україна
m.myronenko@cs.sumdu.edu.ua

Comparative Analysis of Control Tolerance System Optimization for Infrastructure Object Recognition

Maksym Rudenko
dept. of Computer Science
Sumy State University
Sumy, Ukraine
m.rudenko@cis.sumdu.edu.ua

Mykyta Myronenko
dept. of Computer Science
Sumy State University
Sumy, Ukraine
m.myronenko@cs.sumdu.edu.ua

Анотація — В роботі розглядається порівняльний аналіз паралельного, паралельно-послідовного та багатоінтервального алгоритмів оптимізації системи контрольних допусків на ознаки розпізнавання в рамках інформаційно-екстремальної інтелектуальної технології на прикладі розпізнавання інфраструктурних об'єктів. В результаті аналізу виявлено, що поетапне застосування алгоритмів оптимізації системи контрольних допусків дозволяють значно підвищити функціонально ефективність системи розпізнавання інфраструктурних об'єктів та в результаті побудувати безпомилкові вирішальні правила за багатовимірною навчальною матрицею.

Abstract — This paper presents a comparative analysis of parallel, parallel-sequential, and multi-interval algorithms for optimizing the control tolerance system of recognition features based on the information intelligent technology, using the example of infrastructure object recognition. The analysis reveals that the stepwise application of control tolerance optimization algorithms significantly enhances the functional efficiency of the infrastructure object recognition system and ultimately enables to build an error-free decision rules based on a multidimensional training matrix.

Ключові слова — система контрольних допусків; паралельна оптимізація; паралельно-послідовна оптимізація; багатоінтервальна оптимізація; інформаційно-екстремальна інтелектуальна технологія; інфраструктуні об'єкти

Keywords — control tolerance system; parallel optimization; parallel-sequential optimization; multi-interval optimization; information intelligent technology; infrastructure object

I. Вступ

Сучасні безпілотні літальні апарати (БПЛА) або дрони використовуються для різноманітних задач цивільного та військового призначення. У невійськових задачах БПЛА застосовуються для виявлення лісових пожеж, моніторингу екологічних проблем, в археології та в сільському господарстві. У оборонній сфері дрони застосовуються для розвідувальних операцій, корегування вогневих ударів та в якості ударних засобів. Окремо слід зазначити використання БПЛА у картографії для створення детальних планів населених пунктів, житлових та інфраструктурних об'єктів. Розробка програмного забезпечення для таких задач передбачає побудову інтелектуальної системи, здатної навчатися та розпізнавати образи.

Одним з перспективних методів для реалізацій інтелектуальної системи розпізнавання образів для БПЛА є застосування моделей і методів інформаційно-екстремальної інтелектуальної технології (ІЕІТ). В працях [1, 2] розглядається розпізнавання інфраструктурних об'єктів в рамках ІЕІТ з паралельною-послідовною оптимізацією системи контрольних допусків (СКД) на ознаки розпізнавання. З метою підвищення повної ймовірності правильного прийняття рішень пропонується порівняти паралельний, паралельно-послідовний алгоритм оптимізації СКД та багатоінтервальну систему контрольних допусків, яка дозволяє збільшити простір ознак розпізнавання за рахунок кодування відповідних

сегментів поля контрольних допусків. Такий підхід є ефективним, так як дозволяє реалізувати максимально-дистанційний принцип теорії розпізнавання образів, збільшити середню міжкласову відстань та підвищити повну ймовірність правильного прийняття рішень.

II. Оптимізація СКД

В рамках IEIT оптимізація СКД на ознаки розпізнавання безпосередньо впливає на геометричні параметри контейнери класів розпізнавання в бінарному просторі Хеммінга, і, відповідно, – на точнісні характеристики навчання системи розпізнавання інфраструктурних об'єктів. Виділяють наступні інформаційно-екстремальні алгоритми оптимізації контрольних допусків [3]:

- Паралельний алгоритм передбачає одночасну оптимізацію контрольних допусків на всі ознаки. Перевагою даного алгоритму є його висока оперативність, проте він не дозволяє одержати максимальне значення критерію функціональної ефективності (КФЕ) в робочій області визначення його функції.
- Паралельно-послідовний алгоритм, при якому кожний контрольний допуск оптимізується окремо. При цьому квазіоптимальні контрольні допуски отримані при паралельній оптимізації є стартовими для алгоритму послідовної оптимізації.
- Багатоінтервальна система контрольних допусків, яка передбачає кодування ознак розпізнавання бінарними комбінаціями відповідних сегментів контрольного поля допусків, що дозволяє збільшити розмір простору ознак розпізнавання, а також реалізувати максимально-дистанційний принцип теорія розпізнавання образів.

Використання неоптимальних контрольних допусків, при виконанні базового алгоритму навчання, не дозволяє побудувати безпомилкові за навчальною матрицею вирішальні правила. Тому обов'язковою процедурою інформаційно-екстремального алгоритму навчання системи розпізнавання інфраструктурних об'єктів є паралельна оптимізація СКД. Якщо паралельна або паралельна-послідовна оптимізація СКД не дозволяє побудувати безпомилкові вирішальні правила, то наступним ефективним підходом є багатоінтервальна оптимізація СКД, яка дозволяє значно збільшити міжцентрову кодову відстань контейнерів класів, що в свою чергу значно підвищує повну ймовірність правильного прийняття класифікаційних рішень. На рис. 1 показана схема кодування значень ознак розпізнавання при попаданні в сегменти трьох інтервального поля контрольних допусків.

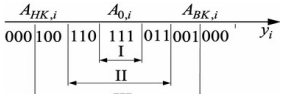


Рис. 1. Приклад кодування трьох інтервального поля контрольних допусків.

На відміну від одно інтервального поля контрольних допусків, яке кодує кожну ознаку одним значенням 0 або 1, при двох або трьох інтервальній СКД кожна ознака в залежності від кількості інтервалів кодується двома або трьома бітами, що дозволяє значно збільшити міжкласову кодову відстань та підвищити функціональну ефективність системи розпізнавання інфраструктурних об'єктів.

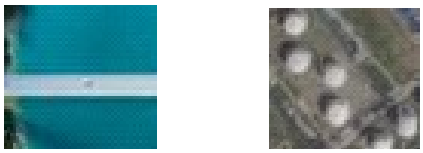
В якості КФЕ було використано інформаційну міру Кульбака, яка обчислюється як добуток відношення правдоподібності на міру відхилень відповідних розподілів ймовірностей:

$$E_m^{(k)} = \log_2\left(\frac{2-\left(\alpha_m^{(k)}(d)+\beta_m^{(k)}(d)\right)}{\alpha_m^{(k)}(d)+\beta_m^{(k)}(d)}\right)* \\ *\left[1-\left(\alpha_m^{(k)}(d)+\beta_m^{(k)}(d)\right)\right] \quad (1)$$

де $\alpha_m^{(k)}(d)$, $\beta_m^{(k)}(d)$ – помилки першого та другого роду прийняття рішення на *k*-му кроці машинного навчання; $D_{1,m}^{(k)}(d)$, $D_{2,m}^{(k)}(d)$ – перша та друга достовірності; d– дистанційна міра, яка визначає радіуси гіперсферичних контейнерів класів розпізнавання, побудованих в радіальному базисі бінарного простору Хеммінга [4].

III. Результати фізичного моделювання

Розглянемо практичні реалізації вище наведених алгоритмів оптимізації СКД. Приклади зображень інфраструктурних об'єктів отриманих з БПЛА наведені на рис. 2.



а) б)

Рис. 2. Приклади зображень інфраструктурних обєктів: а) міст через річку – класс X_1^o; б) нафтобаза – клас X_2^o

Спочатку було реалізовано алгоритм паралельної оптимізації СКД. На рис. 3 показано графік залежності усередненого інформаційного КФЕ від параметра поля контрольних допусків δ. Заштрихована ділянка тут і далі позначає робочу область визначення КФЕ, тобто область де перша та друга достовірність більше 0,5. Аналіз рис. 3 показує, що оптимальне значення поля контрольних допусків $\delta^{\square} = \pm 30$градацій яскравості, при $\bar{E}^{\square} = 5,39$.

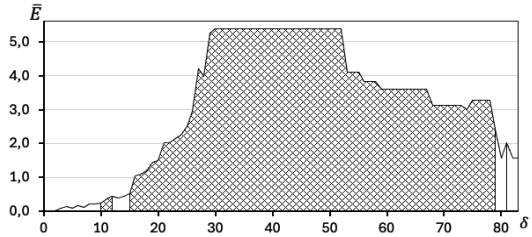


Рис. 3. Графік залежності усередненого КФЕ від параметра поля контрольних допусків δ.

На рис. 4 представлені графіки залежності КФЕ від радіусів контейнерів класів розпізнавання. Аналіз рис. 4 показує, що для класу X_1^o оптимальне значення радіусу контейнеру класу $d_1^{\square}=70$, при максимальному значенні $E_1^{\square}=3,13$, для класу X_2^o– $d_2^{\square}=48$, при $E_2^{\square}=7,65$.

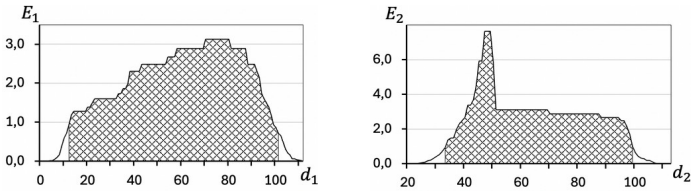


Рис. 4. Графіки залежності КФЕ від радіусів конейнерів класів після паралельної оптимізації.

З метою збільшення значення КФЕ була проведена послідовна оптимізація СКД на ознаки розпізнавання. При цьому контрольні допуски отримані після паралельної оптимізації СКД використовувалися, як початкові. Аналіз графіку на рис. 5 показує, що КФЕ не змінюється на кожному кроці оптимізації і відповідно значення поля контрольних допусків залишається незмінним для всіх ознак.

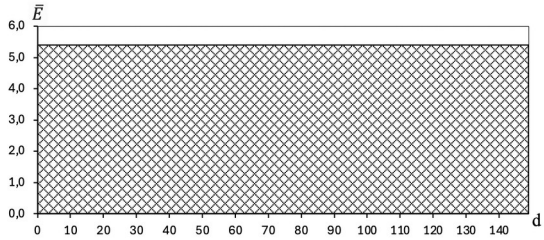


Рис. 5. Графік залежності КФЕ при послідовній оптимізації СКД.

Для подальшого етапу навчання системи було реалізовано алгоритм оптимізації багатоінтервальної СКД. При цьому одночасно проводилась паралельна оптимізація СКД та пошук оптимальної комбінації бінарних кодів, тобто для двох інтервалів можливі комбінації кодів: 10, 11, 01 або 01, 11, 10 або 11, 11, 11. В останньому випадку інтервали фактично перетворюються в один і, у випадку попадання в контрольний допуск, ознаки кодуються однією комбінацією 11. У таблиці 1 видно що вже при двох інтервалах КФЕ досягає свого максимального граничного значення $\bar{E}^{\square}=7,65$. При цьому оптимальним виявилася комбінація кодів 11, 11, 11, що говорить про те, що фактично два інтервали перетворились на один.

ТАБЛИЦЯ I. РЕЗУЛЬТАТИ ОПТИМІЗАЦІЇ ІНТЕРВАЛІВ СКД

КФЕ	Кількість інтервалів контрольного поля допусків	
	1	*2*
$\bar{E}^{\square}$	5,39	7,65

На рис. 6 показані графіки КФЕ після багатоінтервальної оптимізації СКД. З графіків видно, що для кожного класу побудовані безпомилкові вирішальні правила, так як для обох класів КФЕ досягає свого максимального значення. При цьому словник ознак збільшився в два рази з 150 ознак до 300.

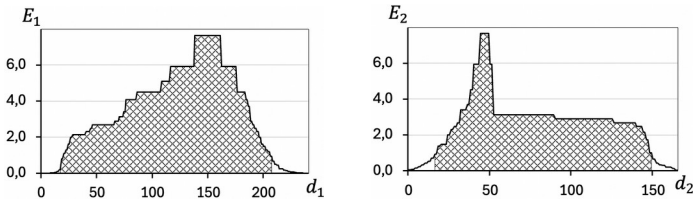


Рис. 6. Графіки залежності КФЕ від радіусів конейнерів класів після багатоінтервальної оптимізації СКД.

Таким чином, в результаті багатоітераційної процедури оптимізації СКД за допомогою паралельного, та багатоінтервального алгоритмів вдалося побудувати безпомилковий класифікатор.

IV. ВИСНОВКИ

В результаті порівняльного аналізу трьох алгоритмів оптимізації СКД при розпізнавання інфраструктурних об’єктів в рамках IEIT встановлено, що паралельна оптимізація є необхідною умовою підвищення функціональної ефективності навчання системи. Паралельний-послідовний алгоритм може мати значний вплив на КФЕ, однак, як показано в дослідженні для деяких даних може бути неефективним. Наступний алгоритм, який дозволяє підвищити функціональну ефективність системи є багатоінтервальний алгоритм оптимізації СКД, який ділить поле контрольних допусків на декілька інтервалів і, в залежності від їх кількості, кодує ознаки відповідною комбінацією біт, що в свою чергу дозволяє збільшити міжцентрову кодову відстань та побудувати безпомилкові вирішальні правила.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

[1] Мироненко М. Інформаційно-екстремальна машинне навчання автономного безпілотного літального апарату для розпізнавання наземних інфраструктурних об’єктів, М. Мироненко, В. Стрілець, С. Ковалевський, Р. Красковський / Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського, Випуск 4/2024 (147). – С. 85–91.

[2] Довбиш А. С. Інформаційно-екстремальне машинне навчання бортової системи розпізнавання наземного об’єкта / А. С. Довбиш, М. М. Будник, В. Ю. П’ятаченко, М. І. Мироненко // Кибернетика и системный анализ. – 2020. – Т. 56, № 4. – С. 18–27.

[3] Довбиш А. С. Інтелектуальні інформаційні технології в електронному навчанні / А. В. Васильєв, А. С. Довбиш, В. О. Любчак. – Суми: Сумський державний університет, 2013. – 177 с.

[4] Довбиш А.С. Основи машинного навчання : навчальний посібник [Електронне видання] /А. С. Довбиш, М. І. Мироненко. – Суми: Сумський державний університет, 2025. – 106 с.