
МЕТОДИ ТА СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ І ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ ТА СИГНАЛІВ

УДК 004.93

А.В. КОЖЕМ'ЯКО, Л.В. КРУПЕЛЬНИЦЬКИЙ, О.В. ВОЙЦЕХОВСЬКА, І.В. БУЛИГА

ЗАСОБИ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО ОБРОБЛЕННЯ ДАНИХ ДЛЯ РОБОТОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

Вінницький національний технічний університет

21021, Хмельницьке шосе 95, м. Вінниця, Україна ibulyga@ukr.net

Анотація. Тематику статті присвячено дослідженню особливостей базових процедур навігаційного оброблення даних для автономного керування робототехнічних систем. Розглядаються такі процедури, як аналіз та класифікація об'єктів зовнішнього середовища для мобільного робота з орієнтацією на автономне керування, а саме, на реалізацію таких його властивостей, як автономність, адаптивність та мобільність. При цьому необхідною умовою є дотримання таких ключових показників, як компактність апаратної реалізації, надійність у складних умовах та захист від несанкціонованого втручання до програмного забезпечення. Для виявлення контрольних об'єктів та визначення їх місцеположення у даній роботі проаналізовано особливості матричного кореляційного оброблення зображень. Такий підхід дозволяє виявити наявність еталонних зображень на полі поточного зображення, а також визначити їх центри з подальшим фокусуванням зорового засобу мобільного робота. Класифікація знайдених об'єктів навігаційною системою мобільного робота необхідна для прийняття конкретних рішень стосовно його подальших дій, зокрема, для уникнення наявних перешкод. У даній роботі пропонується в якості класифікатора об'єктів використати нейроподібний класифікатор на базі лінійних дискримінантних функцій. Особливістю такого підходу є можливість задіяти альтернативний метод сортування у конкурентному шарі класифікатора, який реалізує модель конкуренції WTA (Winner Takes All). Регулярність структури розглянутих засобів інтелектуального оброблення даних для мобільних роботів передбачає компактну реалізацію у мікросхемах ПЛІС.

Ключові слова: аналіз, кореляція, класифікація об'єктів, робототехнічна система, автономність.

Abstract. This article focuses on investigating the characteristics of basic navigation data processing procedures for the autonomous control of robotic systems. The article examines procedures such as the analysis and classification of environmental objects for a mobile robot with a focus on autonomous control, specifically on the implementation of its properties such as autonomy, adaptability, and mobility. A necessary condition here is compliance with key performance indicators such as compactness of hardware implementation, reliability in challenging conditions, and protection against unauthorized software interference. To detect reference objects and determine their locations, this work analyzes the features of matrix correlation image processing. This approach allows for the detection of reference images within the field of view of the current image, as well as the determination of their centers, followed by focusing of the mobile robot's visual system. Classification of the detected objects by the mobile robot's navigation system is necessary for making specific decisions regarding its subsequent actions, in particular, to avoid existing obstacles. This paper proposes using a neural-like classifier based on linear discriminant functions as an object classifier. A distinctive feature of this approach is the ability to employ an alternative sorting method in the classifier's competitive layer, which implements the WTA (Winner Takes All) competition model. The regularity of the structure of the considered intellectually processed data for mobile robots allows for a compact implementation in a FPGA chips.

Keywords: analysis, correlation, object classification, robotic system, autonomy.

DOI: 10.31649/1681-7893-2026-51-1-57-67

МЕТОДИ ТА СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ І ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ ТА СИГНАЛІВ

ВСТУП

У теперішній час робототехнічні системи знайшли ефективне використання у таких широко розповсюджених прикладних застосуваннях, як системи безпеки (поліція, security), військова галузь, медицина (мініроботи), побут, на виробництві тощо [1-3]. Еволюційно роботи пройшли шлях від програмованих до інтелектуальних систем, від промисловості до побуту, від досліджень до мистецтва [4 - 6].

Разом з тим, невідомо зростає потреба у робототехнічних системах різного призначення з широкими функціональними та апаратними можливостями, особливо із забезпеченням автономного керування в процесі функціонування у складних умовах [7, 8].

Метою роботи є підвищення автономності функціонування робототехнічної системи за рахунок розширення функціональних можливостей для навігаційного оброблення даних про об'єкти зовнішнього середовища.

Для досягнення цієї мети необхідно:

- 1) проаналізувати сучасні методи та засоби навігаційного оброблення даних для робототехнічних систем;
- 2) обґрунтувати вибір методу та засобу кореляційного оброблення зображень;
- 3) обґрунтувати вибір методу та засобу класифікації об'єктів з орієнтацією на застосування нейромережного підходу.

ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

Залишається досить актуальною здатність роботів різного призначення ефективно ідентифікувати та взаємодіяти з об'єктами у фізичному середовищі [9, 10]. Крім того, зростає необхідність у робототехнічних системах з автономними можливостями [1, 8, 11], що потребує значного розширення як функціональних можливостей, так і можливостей їх адекватної реалізації [5, 12, 13].

Це стосується не тільки реалізації способів навігації [4, 7, 14], визначення та уникнення перешкод у реальному часі [15, 16], але й захисту даних у базових вузлах мобільних роботів [1, 17]. У свою чергу, автономне керування мобільним роботом потребує компактного апаратного забезпечення та новітніх розробок його вузлів, зокрема, у системі технічного зору [8, 11, 17].

У зв'язку з цим актуальною задачею є розроблення апаратних засобів з орієнтацією на сучасну елементну базу, а саме на програмовані логічні ІС (ПЛІС) [18 - 20].

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ

Серед базових блоків робототехнічної системи важливе місце займають такі: блок сприйняття інформації, блок керування, блок виконавчого механізму [4, 11, 12]. Більш детально на рис. 1 показано базову модель структурної організації мобільної робототехнічної платформи (МРТП) з інтелектуальною системою керування [1].

Не зменшуючи важливість всіх блоків МРТП (рис. 1), базовим для навігаційного обчислення даних залишається саме блок, що містить інтелектуальні навігаційні апаратно-програмні засоби. Разом з тим, необхідно відзначити, що для інтелектуальних нейроконтролерів [21, 22] у складі інтелектуальних робототехнічних систем рівень координації (coordination level) контролює такі питання, як налаштування (tuning), безпосередній контроль (supervision), вирішення кризисів (crisis management), планування (planning) та прогнозування ситуацій (forecasting situations).

Враховуючи це, серед задіяних процедур інтелектуального оброблення даних для навігації та уникнення перешкод у мобільного робота варто виділити кореляційний аналіз та класифікацію об'єктів навколишнього середовища. Саме ці процедури дозволяють:

- по-перше, виділити серед зорових контрольних об'єктів еталонний об'єкт, зафіксований у пам'яті робота;
- по-друге, класифікувати цей об'єкт з подальшим прийняттям рішення щодо конкретних дій мобільного робота безпосередньо. Все це дозволяє реалізувати автономність керування роботом.

МЕТОДИ ТА СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ І ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ ТА СИГНАЛІВ

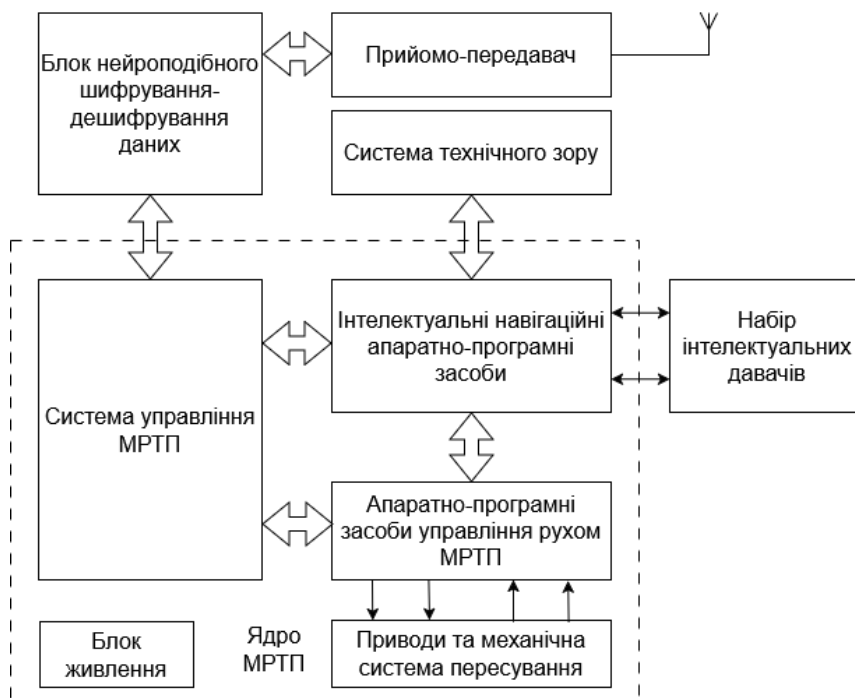


Рисунок 1 – Базова архітектура МРТП [1]

У табл. 1 показано пропозиції щодо реалізаційних моделей базових засобів інтелектуального навігаційного блока (рис. 1).

Таблиця 1 – Реалізаційні моделі для інтелектуального навігаційного блока

Функціональні та технічні вимоги	Пропозиції щодо реалізаційних моделей
Функціональна спроможність	Навігація, уникнення перешкод, прогнозування, адаптація до навколишнього середовища, автономне керування
Апаратна функціональність	Технічний зір, препроцесор, корелятор, класифікатор, підсистема підтримки прийняття рішень
Регулярність структурних рішень, високий рівень паралелізму оброблення даних	Альтернативний метод оброблення векторних даних на одновимірному масиві лічильників. Матричний метод оброблення двовимірному масиву даних у кореляційній матриці
Компактність апаратної реалізації, надійність у складних умовах, захист від несанкціонованого доступу до програмного забезпечення	Застосування технологій ПЛІС

Наведені базові процедури для автономного інтелектуального керування мобільним роботом базуються на визначених властивостях програми-агента, яка після отримання завдання здатна поставити себе на місце користувача [21]. У табл. 2 [21] наведено перелік базових властивостей агентів, з яких для мобільних роботів з автономним керуванням інтерес представляють автономність, адаптивність та мобільність.

Серед наведених у табл.2 властивостей найбільш важливим є адаптивність, оскільки тут задіяна як здатність до навчання, тобто використання отриманого досвіду, так і здатність до формування висновків залежно від стану навколишнього середовища та отриманих знань [21]. Конкретно для автономних мобільних роботів необхідними властивостями є також автономність та мобільність відповідно. Разом з тим, враховуючи такий важливий аспект для мобільних роботів із автономним керуванням як компактність апаратної реалізації його блоків, немає альтернативи щодо використання елементної бази ПЛІС [23-25].

МЕТОДИ ТА СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ І ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ ТА СИГНАЛІВ

Таблиця 2 – Загальні властивості програмних агентів

Властивість	Визначення
Автономність (Autonomy)	Дія незалежно від користувача (керівника)
Адаптивність (Adaptivity)	Здатність до навчання під час спрацювання (отримання досвіду)
Комунікативність (Communicative)	Здатність до комунікації (взаємодії) з користувачами або іншими агентами
Співробітництво (Collaborative)	Співпраця з іншими агентами для досягнення мети
Персоніфікація (Personality)	Природність поведінки (прояв емоцій)
Мобільність (Mobility)	Здатність до пересування в навколишньому середовищі
Передбачуваність (Providence)	Здатність до прогнозування та уникнення зовнішніх загроз

МАТРИЧНЕ КОРЕЛЯЦІЙНЕ ОБРОБЛЕННЯ ЗОБРАЖЕНЬ

На засіб кореляційного оброблення у складі навігаційного блока мобільного робота покладено такі важливі завдання: необхідно не тільки визначити наявність еталонного зображення на полі поточного зображення, але й виконати координатну прив'язку об'єкта, зокрема, сфокусувати зоровий засіб мобільного робота на центр виявленого об'єкта на зображенні.

Для реалізації таких завдань з урахуванням спрацювання корелятора в реальному часі необхідно віддати перевагу саме матричному корелятору через можливість паралельного кореляційного оброблення двовимірного зображення [26, 27]. Одним з таких прикладів можна розглядати оптоелектронну систему з кореляційною матрицею для виявлення еталонного зображення на полі поточного зображення [28].

На рис. 2 наведено структуру блока кореляції у складі оптоелектронної системи [28], яка містить блок керування, кореляційну матрицю і пам'ять еталонів, що призначені для оброблення бінарних зображень. Перед процесом оброблення у пам'яті еталонів фіксуються еталонні бінарні зображення. Після подачі поточного бінарного зображення на вхід кореляційної матриці, в результаті процесу оброблення формується матриця кореляційних коефіцієнтів, тобто кореляційний рельєф [28].

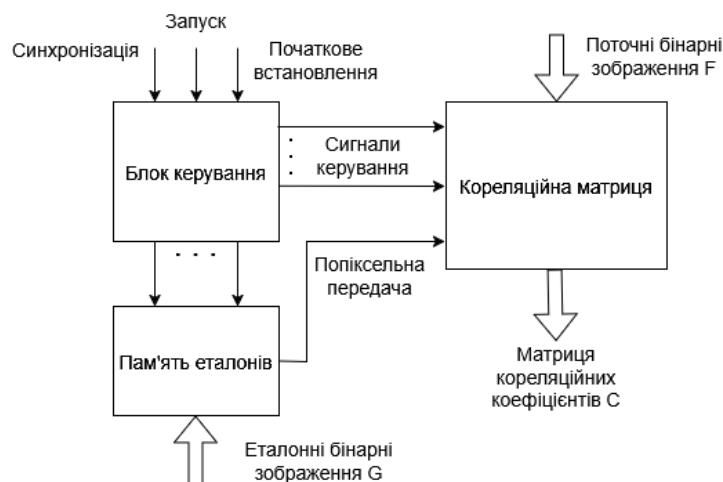


Рисунок 2 – Структура блока кореляції

Для методу кореляції за базову обрано статистичну оцінку за наявності гауссового шуму у вигляді відомого критерію збіжності вигляду [26, 27]:

$$K = \sum_{i,j} d(i+k, j+l)t(i, j), \quad (1)$$

де $t(i, j)$ – значення елемента еталона з координатами (i, j) ; $d(i+k, j+l)$ – значення елемента зображення; (k, l) – координати початку фрагмента зображення.

МЕТОДИ ТА СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ І ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ ТА СИГНАЛІВ

Враховуючи, що наведена оцінка (1) є варіантом дискретної згортки поточного зображення D з довільним фрагментом T , в цьому випадку блок кореляції (рис. 2) представляє собою фільтр у системі кореляційного оброблення зображень, оскільки оцінка (1) описує процес ковзання на частині поточного зображення зі згорткою еталона з послідовними фрагментами, які зсунуто на певну величину (рядків/стовпців) [26, 27].

Особливістю блока кореляції на рис. 2 є те, що кореляційна матриця представляє собою двовимірну пам'ять з розширеними функціональними можливостями, оскільки вона здійснює не тільки запам'ятовування сформованого кореляційного рельєфу, але й обчислює його кореляційні коефіцієнти. Через оброблення бінарних зображень у виразі (1) використовується логічне множення, а замість підсумовування можна задіяти операцію підрахунку одиниць збіжності у пікселях обох зображень [28]. Це пов'язано з особливістю представленого процесу кореляційного оброблення поточного бінарного зображення F з еталонним бінарним зображенням G . Так з пам'яті еталонів (рис. 2) зчитується у кожному циклі оброблення відповідний (згідно з розгорткою еталона) елемент $q_{i,j}$ еталона G , який логічно перемножується з усіма елементами $f_{i+k,j+1}$ поточного зображення F , які зсунуто у протилежному напрямку з розгорткою елементів еталона [28].

В результаті розмірність $(N \times M)$ поточного зображення F визначає розмірність $(N+n-1) \times (M+m-1)$ інформаційного поля кореляційної матриці (рис. 2), а розмірність $(n \times m)$ еталонного зображення G визначає тривалість (кількість циклів) процесу кореляції. Для крос-кореляції $N \gg n, M \gg m$ [26]. Такі показники характерні для процесу кореляції, коли виконується не зсув еталона на полі поточного зображення, а зсув всього поточного зображення залежно від розгортки елементів еталона, що виконується в процесі попіксельного зчитування еталона з пам'яті еталонів (рис. 2).

Для визначення місцеположення центра еталона G на полі поточного зображення F початок розгортки еталона необхідно починати з його центрального (нульового) пікселя при непарній розмірності обох зображень. В результаті максимальні (одичні) значення пікселів кореляційного рельєфу будуть визначати місцеположення центрів еталона G на полі поточного зображення F . Для цього доведено у статті [28], що ефективним має бути еталонне зображення розміром 3×3 пікселя у вигляді як на рис. 3, де також показано координати для його розгортки.

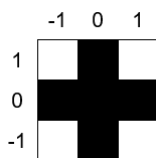


Рисунок 3 – Еталонне зображення розмірністю 3×3 пікселя, де інформаційні пікселі – чорні

Для реалізації такого методу кореляційного оброблення важливе значення має структура обчислювальних комірок (computing cells) та зв'язок між ними по горизонталі та вертикалі (по рядках і по стовпцях) кореляційної матриці (рис. 2). В результаті функціонально кожна обчислювальна комірка повинна виконувати як процес обчислення, так і транзит інформації між іншими комірками. На рис. 4 наведено функціональну схему обчислювальної комірки, що складається з двох функціональних частин [28]:

- запам'ятовування - зсув, де мультиплексор MX та D -тригер виконують збереження та зсув пікселя $f_{i,j}$ у певному напрямку за відповідною адресою;
- обчислення, де RS -тригер та логічний елемент I формують сигнал вигляду:

$$\delta_{i,j} = q_{i,j} \bar{f}_{i,j}, \quad (2)$$

де сигнал $\delta_{i,j}$ скидає у нульовий стан RS -тригер, а отже, так формується нульовий піксель $c_{i,j}$ кореляційного рельєфу.

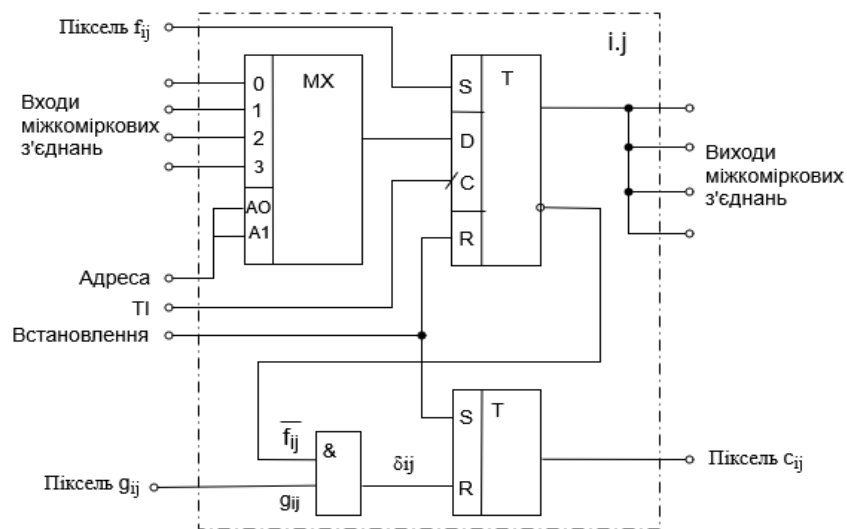


Рисунок 4 – Функціональна схема обчислювальної комірки

Для розглянутого варіанта кореляційного оброблення пам'ять еталонів (рис. 2) можна реалізувати у вигляді зсувного регістра для попіксельного зчитування еталонного бінарного зображення. Регулярна структурна організація обчислювальних комірок (рис. 4) із сусідніми між'єднаннями дозволяє компактно розмістити блок кореляції (рис. 2) в одній мікросхемі ПЛІС середньої розмірності, наприклад, у мікросхемі FLEX10K фірми Altera [20, 24]. У свою чергу, застосування ПЛІС забезпечує не тільки компактність і можливість нарощувати структурні характеристики засобів, а також спрацювання у реальному часі, надійність та захист від несанкціонованого доступу до програми керування, що є необхідною умовою при проектуванні навігаційного блока у складі мобільного робота з автономним керуванням.

НЕЙРОПОДІБНИЙ КЛАСИФІКАТОР ОБ'ЄКТІВ

Одним з відомих методів класифікації об'єктів є метод з використанням дискримінантного аналізу [29]. Вибір цього методу можна обґрунтувати за таких умов:

- через використання статистичних даних, а не ймовірнісних;
- через фіксовані значення коефіцієнтів лінійних дискримінантних функцій (ЛДФ) для конкретної задачі;
- через представлення навчальної інформації у вигляді матриці спостережень з достовірним визначенням класів;
- через можливість реалізації цього методу нейромережею, що призначена для класифікації, наприклад, на базі мережі Хеммінга [22, 30].

Для методу класифікації за ЛДФ характерні такі базові операції:

$$g_i(X) = \sum_{j=1}^n w_{ij}x_j - w_{i0}x_0, i = 1, \dots, m \quad (3)$$

$$X \in C_k \Leftrightarrow k = \operatorname{argmax}\{g_i(X)\}, k = 1, \dots, m \quad (4)$$

де x_j – j -й елемент n -вимірного вхідного вектора ознак X ; w_{ij} – ваговий коефіцієнт j -го входу i -ї ЛДФ $g_i(X)$; $w_{i0}x_0$ – вільний елемент; \mathbf{W} – матриця вагових коефіцієнтів w_{ij} ; $C = (C_1, \dots, C_m)$ – множина класів; m – кількість класів.

Аналіз базових операцій (3) і (4) свідчить, по-перше, про простоту обчислювальної операції (3), а по-друге, про можливість альтернативної реалізації вирішального правила (4). Тому саме варіанти реалізації вирішального правила (4) дозволяють удосконалити цей метод класифікації, а отже, досягти оптимізації таких ключових показників ефективності, як збільшення швидкодії та зменшення апаратних витрат.

На рис. 5 наведено базову структурну схему класифікатора об'єктів, що використовує ЛДФ. Такий класифікатор представляє собою систему розпізнавання з навчанням. При цьому особливість навчання полягає в тому, що вагові коефіцієнти w_{ij} та вільні елементи $w_{i0}x_0$ всіх ЛДФ (3) обчислюються під конкретну задачу класифікації з використанням матриці спостережень з достовірним визначенням класів. Отримані дані у вигляді матриці вагових коефіцієнтів \mathbf{W} та вектора вільних елементів (зміщення

МЕТОДИ ТА СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ І ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ ТА СИГНАЛІВ

В) записуються і зберігаються у матричній пам'яті з подальшим використанням у формувачі ЛДФ (рис. 5).

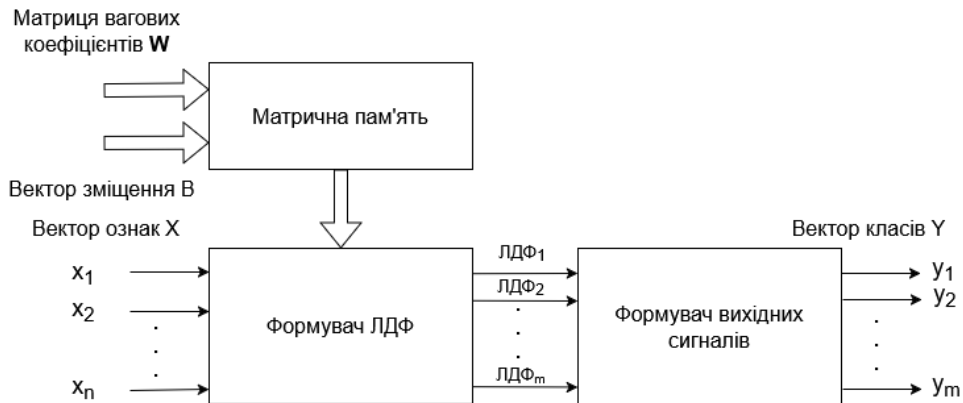


Рисунок 5 – Структура класифікатора об'єктів

Отже, функціональне призначення базових блоків класифікатора об'єктів (рис. 5) таке:

- функція обчислення ЛДФ (3) у формувачі ЛДФ;
- функція визначення елементів вектора класів Y у формувачі вихідних сигналів.

Враховуючи особливість вирішального правила (4) функціонально формувач вихідних сигналів можна розглядати як максимізатор, оскільки необхідно визначити максимальну за значенням ЛДФ, номер якої вказує на належність вхідного об'єкта до конкретного класу [30].

Якщо розглядати набір сформованих ЛДФ $g_i(X)$, де $i = 1, \dots, m$, як лінійний масив числових елементів, то процес визначення найбільшого серед них може бути реалізований у вигляді сортування. Разом з тим, особливістю цього процесу (4) є неможливість тасування (транспозиції) числових елементів, оскільки важливим для класифікації є топологічне розташування цих елементів, особливо максимального серед них. У зв'язку з цим, прийнятним варіантом є або альтернативне сортування чисел [31], або використання нейромережного підходу, наприклад, мереж типу MAXNET [22, 32].

Відомо що мережі типу MAXNET використовуються, наприклад, як конкурентний шар у класифікаторі типу мережі Хеммінга [32]. Разом з тим, у статті [33] показано, що можна скоротити кількість латеральних зворотно-від'ємних зв'язків між нейронами у конкурентному шарі до кількості $m(m-1)$ з досягненням прискорення процесу майже у 2 рази. З іншого боку, серед альтернативних методів сортування інтерес представляє метод, який не використовує порівняння та перестановку у парах числових елементів в процесі сортування. В цьому випадку задіяно швидкісну операцію декремента одночасно до всіх елементів числового масиву [30].

На рис. 6 представлено структурну схему нейроподібного класифікатора об'єктів, де задіяно операцію декремента у його конкурентному шарі. Класифікатор працює таким чином.

В процесі ініціалізації класифікатора у зв'язках нейроелементів прихованого шару фіксуються попередньо розраховані вагові коефіцієнти w_{ij} матриці ваг W . Нейроелементи конкурентного шару встановлюються (скидаються) у нульовий стан, а нейроелементи вихідного шару – в одиничний стан.

Саме процес спрацювання класифікатора виконується у такій послідовності.

1. На входах нейроелементів прихованого шару формуються значення групи ЛДФ $g_1(X), \dots, g_m(X)$ за формулою (3).

2. Сформовані ЛДФ $g_1(X), \dots, g_m(X)$ записуються у нейроелементи конкурентного шару, де обробляються із застосуванням операції декремента одночасно до всіх ЛДФ, що призводить до їх послідовного обнулення.

3. Момент обнулення кожної з ЛДФ фіксується елементом маски у вихідному шарі, який маскує нейроелементи вихідного шару, що відповідають необнуленим нейроелементам конкурентного шару. Разом з тим, в результаті обнулення одного з нейроелементів конкурентного шару призводить до обнулення відповідного нейроелемента вихідного шару.

4. Момент обнулення останнього k -го нейроелемента конкурентного шару не призводить до обнулення відповідного k -го нейроелемента вихідного шару. В результаті на відповідному виході u_k класифікатора залишається одиничний сигнал. Так реалізується вирішальне правило (4).

МЕТОДИ ТА СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ І ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ ТА СИГНАЛІВ

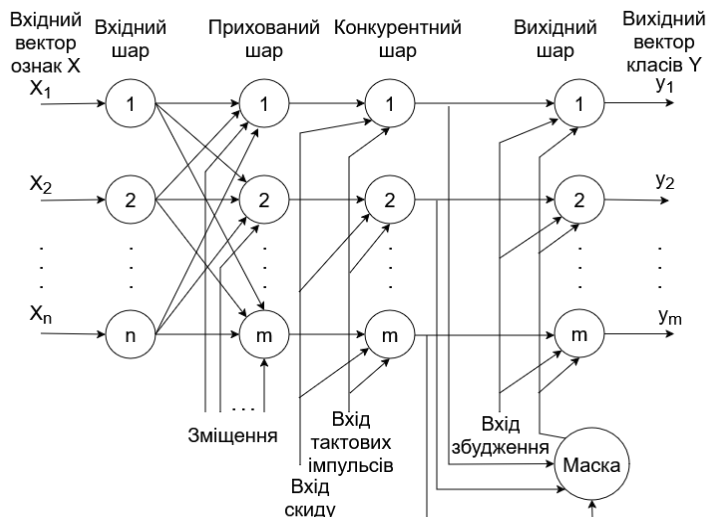


Рисунок 6 – Структурна схема класифікатора

На рис. 7 детально показано функціональні схеми нейроелементів конкурентного шару та вихідного шару класифікатора відповідно.

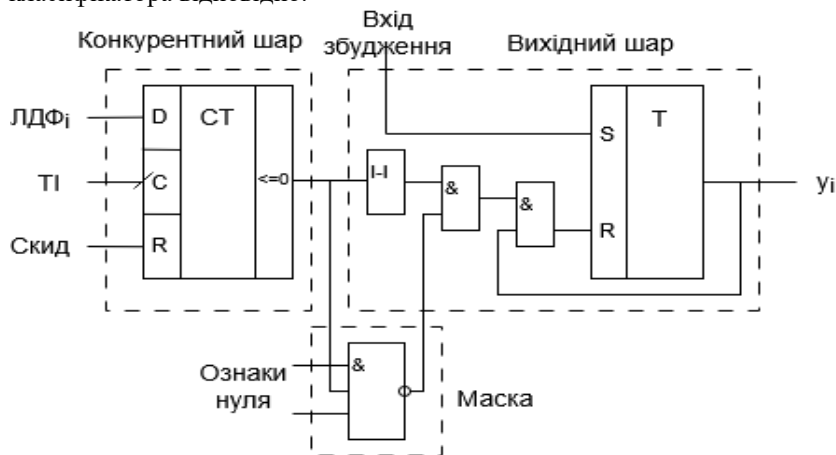


Рисунок 7 – Функціональна схема нейроелементів двох шарів класифікатора

З рис. 7 видно, що операція декремента у кожному нейроелементі конкурентного шару виконується на двійковому лічильнику СТ, в якого як вихідний сигнал використовується сигнал ознаки його обнулення. Елемент маски вихідного шару реалізується у вигляді багатовхідного елемента I-NI, а кожний нейроелемент цього шару має у своєму складі RS-тригер Т і три логічних елемента: елемент затримки і два елемента І. Отже, саме логічну складову нейроелементів та елемента маски у вихідному шарі задіяно у формуванні вихідних сигналів y_1, \dots, y_m нейромережного класифікатора (рис. 6).

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Аналіз літературних джерел показав інтенсивність розроблення методів та засобів реалізації навігаційного оброблення даних для ефективного автономного спрацювання мобільних роботів різного призначення. При цьому особливо зростають вимоги до таких їх ключових показників, як автономність, адаптивність та мобільність.

В результаті запропоновано структурні рішення двох важливих напрямків навігаційного оброблення даних, а саме:

МЕТОДИ ТА СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ І ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ ТА СИГНАЛІВ

- аналіз поточних зображень матричним корелятором з визначенням на зображенні місцеположення центра еталонного зображення;
- класифікація об'єктів за їх ознаками нейромережним класифікатором із задіянням отриманих результатів для подальшого прийняття конкретних рішень у навігаційному плані.

Всі розробки зорієнтовані на реалізацію у мікросхемах ПЛІС, що підвищить автономність та надійність структурної організації мобільних роботів.

ВИСНОВКИ

1. Через невинне зростання уваги до реалізації та впровадження робототехнічних систем з автономним керуванням виникає необхідність у розширенні функціональних можливостей мобільних роботів в процесі навігаційного оброблення даних про об'єкти зовнішнього середовища. Все це підвищує вимоги до реалізації процесів аналізу та класифікації об'єктів із задіянням інтелектуальних апаратно-програмних засобів.

2. Застосування матричного кореляційного оброблення зображень потребує адекватної організації як структури обчислювальних комірок, так і відповідних з'єднань між ними у складі кореляційної матриці. У свою чергу, регулярність структури кореляційної матриці дозволяє її компактну реалізацію у мікросхемі ПЛІС.

3. Структура класифікатора об'єктів на базі дискримінантного аналізу дозволяє не тільки реалізувати його за аналогією мережі Хеммінга, але й вдосконалити важливий блок - максимізатор із паралельним задіянням швидкісної операції декремента у конкурентному шарі нейроподібного класифікатора. Це дозволяє усунути значну кількість латеральних зв'язків, а також прискорити процес визначення місцеположення максимальної за значенням ЛДФ в процесі альтернативного сортування.

Подяки

Дослідження виконано за підтримки проєкту (№ держреєстрації 0126U002063) Міністерства освіти і науки України

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ / REFERENCES

1. I. G. Tsmots, V. M. Teslyuk, Yu. V. Opotiak, R. V. Parcei, & R. V. Zinko, "The basic architecture of mobile robotic platform with intelligent motion control system and data transmission protection," *Ukrainian Journal of Information Technology*, 3(2), 74–80. 2021. <https://doi.org/10.23939/ujit2021.02.074>
2. M. Cognominal, K. Patronymic, & A. Wańkiewicz, "Evolving field of autonomous mobile robotics: Technological advances and applications," *Fusion Multidisciplinary Res., Int. J.*, vol. 2, no. 2, pp. 189–200, Jul. 2021. doi: <https://doi.org/10.63995/USAS3015>
3. L. Yang, J. Qi, D. Song, J. Xiao, J. Han, & Y. Xia, "Survey of robot 3D path planning algorithms," *J Control Sci Eng*, 5 p. 2016. <https://doi.org/10.1155/2016/7426913>
4. I. Tsmots, V. Teslyuk, & I. Vavruk, "Hardware and software tools for motion control of mobile robotic system," in *12th International Conference "The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics," CADSM 2013*, 368 p. 2013.
5. R. M. F. Alves, & C. R. Lopes, "Obstacle avoidance for mobile robots: A hybrid intelligent system based on fuzzy logic and artificial neural network," in *Proc. of the 2016 IEEE Intern. Conf. on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE)*, Vancouver, BC, Canada, 24-29 July 2016, 1038-1043. 2016. <https://doi.org/10.1109/FUZZ-IEEE.2016.7737802>
6. Y. Yusof, H. M. A. H. Mansor, & A. Ahmad, "Formulation of a lightweight hybrid ai algorithm towards self-learning autonomous systems," in *Proc. of the 2016 IEEE Confer. on Systems, Process and Control (IC-SPC)*, Melaka, Malaysia, 16-18 December 2016, 142-147. 2016. <https://doi.org/10.1109/SPC.2016.7920719>
7. M. Hoy, A. S. Matveev, & A. V. Savkin, "Algorithms for collision free navigation of mobile robots in complex cluttered environments: a survey," *Robotica*, 33(3), 463–497. 2015. <https://doi.org/10.1017/S0263574714000289>

МЕТОДИ ТА СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ І ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ ТА СИГНАЛІВ

8. K. Matviichuk, V. Teslyuk, & T. Teslyuk, "Vision system model for mobile robotic systems," in *Proc. of the KhIIh International Conference "Perspective Technologies and Methods in MEMS Design," MEMSTECH2016*, 20-24 April 2016, Polyana, Lviv, Ukraine, 104-106. 2016. <https://doi.org/10.1109/MEMSTECH.2016.7507529>
9. C. L. P. Chen, D. Yu, & L. Liu, "Automatic leader follower persistent formation control for autonomous surface vehicles." *IEEE Access*, 7, 12146-12155. 2019. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2886202>
10. Dusan, Glavaski, Volf, Mario, & Bonkovic, Mirjana, "Robot motion planning using exact cell decomposition and potential field methods," in *Proc. of the 9th WSEAS International conference on Simulation, modelling and optimization, World Scientific and Engineering Academy and Society (WSEAS)*. 2009.
11. I. Tsmots, O. Skorokhoda, B. Andriyetskyi, and R. Tkachenko, "Hardware implementation of intelligent components of robotic systems", *Bulletin of the National University of Lviv Polytechnic: series "Computer Science and Information Technologies"*, No. 744. P. 58-63. 2012.
12. P. Denysyuk, V. Teslyuk, & I. Chorna, "Development of mobile robot using LIDAR technology based on Arduino controller," in *14th International Conference on Perspective Technologies and Methods in MEMS Design, MEMSTECH 2018, Proceedings*, 240-244. 2018. <https://doi.org/10.1109/MEMSTECH.2018.8365742>
13. I. Islam, M.T. Shahria, M.S. Sunny, M.M.R. Khan, S. Ahamed, I. Wang, & M. Rahman, "A Vision-based Object Detection and Localization System in 3D Environment for Assistive Robots' Manipulation," in *Proc. of the 9th International Conference of Control Systems, and Robotics (CDSR'22)*, Niagara Falls, ON, Canada, 2-4 June 2022. [doi: 10.11159/cdsr22.112](https://doi.org/10.11159/cdsr22.112)
14. C.L.P. Chen, D. Yu, & L. Liu, "Automatic leader-follower persistent formation control for autonomous surface vehicles," *IEEE Access* (2019) 7, 12146-12155. [doi: 10.1109/ACCESS.2018.2886202](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2886202).
15. S. Wang, G. Xu, T. Liu & Y. Zhu, "Robust Real-time Obstacle Avoidance of Wheeled Mobile Robot based on Multi-Sensor Data Fusion," in *Proc. of the IEEE 5th Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC)*, Hongqing, China, 2021, pp. 2383-2387. [doi: 10.1109/IAEAC50856.2021.9391021](https://doi.org/10.1109/IAEAC50856.2021.9391021).
16. A. Medina-Santiago, L. A. Morales-Rosales, C. A. Hernández-Gracidas, I. Algreto-Badillo, A. D. Pano-Azucena, & J. A. Orozco Torres, "Reactive Obstacle – Avoidance Systems for Wheeled Mobile Robots Based on Artificial Intelligence," *Applied Sciences*, 11(14), 6468. 2021. <https://doi.org/10.3390/app11146468>
17. Tsmots, R. Tkachenko, V. Teslyuk, Y. Optyak & V. Rabyk, "Hardware Components for Nonlinear Neuro-like Data Protection in Mobile Smart Systems," in *Proc. of the IEEE 17th International Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT)*, Lviv, Ukraine, 2022, pp. 198-202. [doi: 10.1109/CSIT56902.2022.10000636](https://doi.org/10.1109/CSIT56902.2022.10000636).
18. Z. Wan, B. Yu, T. Y. Li, J. Tang, Y. Zhu, Y. Wang, & S. Liu, "A survey of FPGA-based robotic computing," *IEEE Circuits and Systems Magazine*, 21 (2), pp. 48-74. 2021. <https://doi.org/10.1109/MCAS.2021.3071609>
19. S. Pine, & B. B. Choudhury, "FPGA implementation of modified swarm optimization based control strategy for a mobile robot," in *Applications of Robotics in Industry Using Advanced Mechanisms: Proc. of International Conference on Robotics and Its Industrial Applications 2019. J Springer International Publishing*, 280-290. 2020. https://doi.org/10.1007/978-3-030-30271-9_26
20. I. Syafalni, M. I. Firdaus, N. Sutisna, Y. W. Hadi, & T. Adiono, "Control system for mobile robot using FPGA-based Q-learning accelerator," in *8th International Conference on Wireless and Telematics (ICWT)*, *IEEE*, pp. 1-6. 2022. <https://doi.org/10.1109/ICWT55831.2022.9935386>
21. M. Tim Jones, *AI Application Programming*, 2nd ed. Dreamtech Press. 2006.
22. S. Haykin, *Neural Networks. A Comprehensive Foundation*, 2nd ed. Prentice Hall, Inc., 1999.
23. A. Ghorbel, N. Ben Amor, & M. Jallouli, "Design of a flexible reconfigurable mobile robot localization system using FPGA technology," *SN Applied Sciences*, 2, pp. 1-14. 2020. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-2960-4>
24. A. H. Issa, A.T. Humod, & S.A. Gitaffa, "FPGA implementation of reconfigurable intelligent controller for mobile robot," *Journal of Mechanical Engineering Research and Developments*, 44 (1), pp. 254-264. 2021.
25. Y. Zhou, X. Jin, & T. Wang, "FPGA Implementation of A* Algorithm for Real-Time Path Planning," *International Journal of Reconfigurable Computing*, 2020, 1-11. 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/8896386>

МЕТОДИ ТА СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ І ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ ТА СИГНАЛІВ

26. W.K. Pratt, *Digital image processing*, 2nd ed. A Willey-Interscience Publication, Willey.1991.
27. R.E. Woods, & R. C.Gonzalez, *Digital image Processing*, 4th ed. Global Edition, New York. 218.
28. T.B. Martynyuk, S.V. Bogomolov, S.M. Fashchilin, and E.S. Generalnytsky, "Image analysis in an optoelectronic system with a correlation matrix," *Information Technologies and Computer Engineering*, No. 3 (46), pp. 39-46. 2019.
29. R.M. Rangayyan, *Biomedical Signal Analysis*, 2nd ed. Willey-IEEE Press. 2015.
30. T. Martyniuk, A. Kozhemiako, S. Bogomolov et al., "Feature of Functional Basis for Neural Network Classifiers," in *Proc. of SPIE the international Society for Optical Engineering*, 2025, 14009, 1400919.
31. D.E. Knuth, *The art of computer programming. Vol.3. Sorting and Searching*, 2nd ed. Addison Wesley Longman Publishing Co., Inc. 1998.
32. S. Osowski, *Sieci neuronowe do przetwarzania informacji*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej. 2013.
33. T. Martyniuk, B. Krukivskyi, L. Kupershtein, & V. Lukichov, "Neural network model of heteroassociative memory for the classification task," *Radioelectronic and Computer Systems*, no.2(102).2022. doi: 10.32620/reks.2022.09.
34. Bisikalo, O., Kharchenko, V., Kovtun, V., Krak, I., Pavlov, S. Parameterization of the Stochastic Model for Evaluating Variable Small Data in the Shannon Entropy Basis, *Entropy*, 2023, 25(2), 184.
35. Kukharchuk, V.V., Pavlov, S.V., Holodiuk, V.S., et al. Information conversion in measuring channels with optoelectronic sensors, *Sensors*, 2022, 22(1), 271

Дата надходження: 20.03.2026

Дата прийняття до друку після рецензування: 25.04.2026

Дата публікації: 18.06.2026

Ця робота ліцензується відповідно до
[Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

КОЖЕМ'ЯКО АНДРІЙ ВІКТОРОВИЧ – кандидат технічних наук, доцент кафедри обчислювальної техніки, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна;
e-mail: kvantron@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-7323-7146>

КРУПЕЛЬНИЦЬКИЙ ЛЕОНІД ВІТАЛІЙОВИЧ – кандидат технічних наук, доцент кафедри обчислювальної техніки, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна;
e-mail: krup@vntu.edu.com, <https://orcid.org/0000-0001-7370-9772>

ВОЙЦЕХОВСЬКА ОЛЕНА ВАЛЕРІЇВНА – кандидат технічних наук, доцент кафедри обчислювальної техніки, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна;
e-mail: vojcehovska.o.v@vntu.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0001-8755-1574>

БУЛИГА ІГОР ВОЛОДИМИРОВИЧ – аспірант кафедри обчислювальної техніки, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна; **e-mail:** ibulyga@ukr.net, <https://orcid.org/0009-0007-5394-3247>

Andrii KOZHEMIAKO, Leonid KRUPELNITSKYI, Olena VOITSEHOVSKA, Ihor BULYHA
INTELLIGENT PROCESSING TOOLS FOR ROBOTIC SYSTEMS

Vinnitsia National Technical University