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

УДК 681.3;004.93

В.П. КОЖЕМ'ЯКО^а, Л.І. ТИМЧЕНКО^б, А.А. ЯРОВИЙ^а, Д.П. ЗАРЕЗЕНКО^а

РОЗРОБКА МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ ДЛЯ ВИСОКОТОЧНОГО ВИМІРЮВАННЯ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ КООРДИНАТ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ЦЕНТРІВ ЗОБРАЖЕНЬ ПРОТЯЖНИХ ЛАЗЕРНИХ ТРАС

^а *Вінницький національний технічний університет
95, Хмельницьке шосе, Вінниця, 21021, Україна
Тел.: +380 (432) 598019, E-mail: kvp@vstu.vinnica.ua*

^б *Київський університет економіки і технологій транспорту
19, вул. Лукашевича, Київ, 03049, Україна
E-mail: timchen@svitonline.com*

Анотація. В роботі розглянуто основні положення проблематики профілювання лазерного випромінювання, запропоновано відповідні методи попередньої обробки зображень протяжних лазерних трас, методи визначення центру максимальної інтенсивності лазерного випромінювання, екстраполяційні методи для обробки та прогнозування координат енергетичних центрів зображень протяжних лазерних трас, а також відповідні засоби на основі паралельно-ієрархічних обчислювальних структур.

Аннотация. В работе рассмотрены основные положения проблематики профилирования лазерного излучения, предложены соответствующие методы предварительной обработки изображений протяженных лазерных трасс, методы определения центра максимальной интенсивности лазерного излучения, экстраполяционные методы для обработки и прогнозирования координат энергетических центров изображений протяженных лазерных трасс, а также соответствующие средства на основе параллельно-иерархических вычислительных структур.

Abstract. The basic description of a problems of laser emission profiling are considered in the given work. The appropriate methods of the preprocessing of the extended laser paths images, methods of location of the maximal intensity centre of laser emission, extrapolation methods for processing and prediction of the energy centres coordinates of the extended laser paths images, and also appropriate means on the basis of parallel-hierarchical computing structures are offered.

Ключові слова: паралельні обчислення, паралельно-ієрархічні мережі, системи профілювання лазерних пучків, обробка зображень, розпізнавання образів.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ. ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ

Сучасні комп'ютерні прилади мають достатню продуктивність (до 10^{14} оп/с). Але цей показник не включає витрат часу на таку важливу операцію як введення інформації. Крім цього, комп'ютерні прилади обробляють інформацію, не дивлячись на псевдо-паралельність, послідовно у часі, а всі команди та їх виконання відбувається лише відносно деревовидного закону, тобто всі інтелектуальні процедури побудовані виключно на ієрархічному принципі. Тому існують такі задачі, в яких забезпечення швидкої обробки зображень у реальному часі неможливо здійснити навіть за допомогою найшвидших

комп'ютерних приладів. Вони „аргіюї” не спроможні забезпечити таку комплексну продуктивність, яка потрібна для забезпечення роботи пристроїв у реальному часі.

Виходом із цієї ситуації може бути концепція створення спеціалізованих паралельних оптоелектронних перетворювачів для обробки зображень у реальному часі [1,2].

Ця концепція включає можливість використання паралельних оптичних каналів введення зображення. Причому, самі оптичні канали можуть бути побудовані різними засобами, наприклад тепловізійними, лазерними, світлодіодними тощо. Для подальшої обробки потрібна така організація паралельних каналів, яка забезпечує завадостійку та швидко попередню обробку, компактний опис та гнучку класифікацію зображень.

Останнім часом, з розвитком оптико-електронних інформаційно-енергетичних технологій та їх все більшим впровадженням в прикладну сферу, відчутна необхідність широкого застосування оптоелектронних систем з автоматичним відслідковуванням світлових випромінювань, сформованих світловим випромінюванням, особливо в лазерній обробці матеріалів, локаційних системах, оптичному зв'язку й інших галузях інженерії. Поширення лазерного випромінювання в атмосфері супроводжується дуже великим набором явищ лінійної і нелінійної взаємодії. При цьому жодне з цих явищ не виявляється окремо. За якісними ознаками зазначені явища можна розділити на такі основні групи:

- рефракція променів лазерного пучка;
- поглинання енергії лазерного пучка атмосферними газами;
- розсіювання енергії лазерного пучка частками аерозолів на флуктуаціях щільності повітря та ін.;
- флуктуації параметрів лазерних пучків, обумовлені атмосферою турбулентністю.

Кожна з перерахованих груп явищ взаємодії лазерного випромінювання з атмосферою може виявлятися в галузях як лінійної, так і нелінійної оптики. У той же час кожна з цих груп має чіткі специфічні особливості, що повинні враховуватися при відповідних теоретичних і експериментальних дослідженнях [3,4].

ОБРОБКА ЗОБРАЖЕНЬ ПРОТЯЖНИХ ЛАЗЕРНИХ ТРАС

Вимірювання координат енергетичних центрів плямових зображень протяжних лазерних трас здійснювалось за такими етапами: виділення граничних ліній на зображенні (починаючи від точки максимальної яскравості формуються N її значень – (T_{max-w}) , де $w=1, \dots, N$; крайні точки з яскравістю (T_{max-w}) утворюють граничну лінію); визначення попередніх центрів на основі виконання операції урівноваження зображення контурних препаратів за чотирма напрямкам; сегментування граничних ліній (обрані точки використовуються як дані для апроксимації); апроксимація граничних ліній (для кожного сегмента методом найменших квадратів проводиться апроксимація); пошук еталонного зображення; тунелювання по усереднених коефіцієнтах апроксимації; навчання паралельно-ієрархічної мережі (формується еталонна структура паралельно-ієрархічної мережі для еталонного зображення, тобто формується еталонна паралельно-ієрархічна мережа для тих зображень, що формують границі тунелю ліворуч і праворуч від центрального тунелю); обробка поточних зображень (знаходиться усереднені значення відношення коефіцієнтів апроксимації для кожного сегмента; у випадку влучення їх значення в один із тунелів і збігу паралельно-ієрархічної мережі для еталонного і поточного зображень останнє обирається для подальшої обробки, у протилежному випадку – вилучається; якщо поточне зображення обирається для подальшої обробки, то для нього обчислюється зсув δ_x, δ_y); оптимізація ваг.

У загальному виді концепцію багатоетапності обробки зображень можна сформулювати в такий спосіб. Аналіз зображення полягає в послідовному перетворенні співпадаючих і виявленні (фільтрації) незбіжних у часі складових зображення при переході елементів паралельно-ієрархічної (або нейронної) мережі з поточних енергетичних станів з одними просторовими координатами в стани з меншою енергією з іншими просторовими координатами. Такий процес аналізу зображення відбувається на багатьох етапах, кожний з яких включає виконання вищевказаної процедури. Умовою переходу складових зображення на більш високий рівень є наявність динаміки взаємного збігу проміжних результатів обробки в часі в паралельних каналах нижнього рівня. Результат аналізу зображення формується з ізольованих у просторово-часовій області складових зображення [5,6].

Розглянемо математичну модель паралельного розкладання множини $\mu = \{a_i\}$, $i = \overline{1, n}$ [2,5,6], що застосовується в кожній гілці паралельно-ієрархічної мережі.

$$\sum_{i=1}^n a_i = \sum_{j=1}^R \left(n - \sum_{k=0}^{j-1} n_k \right) (a^j - a^{j-1}), \quad (1)$$

де $a_i \neq 0$, R - розмірність даної множини. З однакових елементів сформуємо підмножини, елементи однієї

підмножини позначимо через a^k , $k = \overline{1, R}$, n_k - число елементів у k -ій підмножині (тобто кратність числа a_k), a^j - довільний елемент множини $\{a^k\}$, обраний на j -ому кроці, $j = \overline{1, R}$, $a^0 = 0$, $n_0 = 0$.

Скористаємось ідеєю популяційного кодування [7], побудувавши модель певної кінцевої дії, що здійснюється по всім поточним діям. Очевидно, що на рівні гілок нейронної мережі дана кінцева дія при реалізації популяційного кодування відповідає усередненим параметрам цієї мережі. Для паралельно-ієрархічної мережі такими усередненими параметрами можуть бути кількість елементів у гілці кожного рівня, які визначаються на основі моделі вигляду (1), і значення самого елемента. У цьому випадку поточний – образ, що розпізнається, буде відображатися поточною паралельно-ієрархічною мережею і порівнюватися з еталонною паралельно-ієрархічною мережею з усередненими параметрами.

Позначивши середнє значення довільного елемента першого рівня через $\bar{a}_{i,j}^1$, другого рівня - $\bar{a}_{i,j}^2$, третього рівня - $\bar{a}_{i,j}^3$ і т.д. k -го останнього рівня $\bar{a}_{i,j}^k$, а також середнє число елементів першого рівня - $N_{\bar{a}_{i,j}^1}$, другого рівня - $N_{\bar{a}_{i,j}^2}$, третього рівня - $N_{\bar{a}_{i,j}^3}$ і т.д. k -го рівня - $N_{\bar{a}_{i,j}^k}$ можна сформулювати паралельно-ієрархічну мережу з усередненими параметрами.

Поточний образ або досліджуваний образ, який оброблений паралельно-ієрархічною мережею з поточними параметрами $a_{i,j}^1, a_{i,j}^2, a_{i,j}^3, \dots, a_{i,j}^k$ і $N_{a_{i,j}^1}, N_{a_{i,j}^2}, N_{a_{i,j}^3}, \dots, N_{a_{i,j}^k}$, порівнюється з еталонним образом або образом норми, який оброблений паралельно-ієрархічною мережею з усередненими параметрами - $\bar{a}_{i,j}^1, \bar{a}_{i,j}^2, \bar{a}_{i,j}^3, \dots, \bar{a}_{i,j}^k$ і $N_{\bar{a}_{i,j}^1}, N_{\bar{a}_{i,j}^2}, N_{\bar{a}_{i,j}^3}, \dots, N_{\bar{a}_{i,j}^k}$...

Якщо скористатися препаруванням елементів паралельно-ієрархічної мережі для кожного рівня [2,8,9], то від усереднених параметрів $\bar{a}_{i,j}^1, \bar{a}_{i,j}^2, \bar{a}_{i,j}^3, \dots, \bar{a}_{i,j}^k$ можна перейти на основі тривіневого кодування до їх відображення бінаризованими препаратами (-1, 0, +1). Тобто для довільного усередненого параметра такий перехід може відображатися трьома видами препаратів: $a_{i,j}^0, a_{i,j}^1, a_{i,j}^{-1}$. У цьому випадку паралельно-ієрархічна мережа з числовими відліками перетвориться в паралельно-ієрархічну мережу з бінаризованими відліками $a_{i,j}^0, a_{i,j}^1, a_{i,j}^{-1}$. Тоді істотно спрощується процедура порівняння бінаризованих відліків поточної й еталонної паралельно-ієрархічних мереж.

Для формування еталонів зображення, наприклад плямового зображення норми і плямових зображень з патологіями необхідно провести для них навчання в межах навчальної вибірки. Для чого необхідно при кожнім навчанні робити усереднення по елементах гілки кожного рівня, тобто формувати усереднені елементи $\bar{a}_{i,j}^1, \bar{a}_{i,j}^2, \bar{a}_{i,j}^3, \dots, \bar{a}_{i,j}^k$, далі переходячи до бінаризованих препаратів $a_{i,j}^0, a_{i,j}^1, a_{i,j}^{-1}$. Виконавши у такий спосіб вищевказані дії можна сформулювати паралельно-ієрархічну мережу з еталонними параметрами для плямових зображень норми („хороших”) і плямових зображень з різними відхиленнями („поганих”).

Сформувавши паралельно-ієрархічні мережі з еталонними параметрами для плямових зображень норми і плямових зображень з різними відхиленнями можна робити її порівняння з паралельно-ієрархічною мережею, що використовує поточні параметри. Під паралельно-ієрархічною мережею з поточними параметрами варто розуміти паралельно-ієрархічну мережу з поточними значеннями її елементів $a_{i,j}^1, a_{i,j}^2, a_{i,j}^3, \dots, a_{i,j}^k$ з переходом до бінаризованих препаратів $a_{i,j}^0, a_{i,j}^1, a_{i,j}^{-1}$ і поточним числом елементів у гілках кожного рівня $N_{a_{i,j}^1}, N_{a_{i,j}^2}, N_{a_{i,j}^3}, \dots, N_{a_{i,j}^k}$... Процедура порівняння паралельно-ієрархічної мережі з еталонними параметрами і паралельно-ієрархічної мережі з поточними параметрами полягає в їх топографічному накладенні один на одного й обчисленні числа збігів однойменних бінаризованих елементів.

Дві бінаризовані паралельно-ієрархічні мережі збігаються, якщо попарно рівні всі однаково розташовані в мережі відліки кожного з препаратів. У випадку розбіжності розмірності порівнюваних паралельно-ієрархічних мереж необхідно ввести в її гілки додаткові вузли з кодуванням четвертого стану. Для оцінки результату порівняння бінаризованих паралельно-ієрархічних мереж введемо кількісний показник, що характеризує їхню міру збігу.

$$R(c_e, c_m) = \sum (a_{i,j}^{1(\dots)})_e \cap (a_{i,j}^{1(\dots)})_m + \dots + \sum (a_{i,j}^{k(\dots)})_e \cap (a_{i,j}^{k(\dots)})_m, \quad (2)$$

де $c_e = f_e(a_{i,j}^1, a_{i,j}^2, \dots, a_{i,j}^k)$ - мережна функція еталонного зображення, $c_m = f_m(a_{i,j}^1, a_{i,j}^2, \dots, a_{i,j}^k)$ - мережна

функція поточного зображення, а $a_{i,j}^{k(\dots)} \in \{a_{i,j}^{k(0)}, a_{i,j}^{k(1)}, a_{i,j}^{k(-1)}\}$, \cap - знак збігу однойменних бінаризованих препаратів при їхньому порівнянні. Складові (2) дорівнюють одиниці тільки в тому випадку, коли однойменні препарати збігаються. Тобто

$$(a_{i,j}^{k(\dots)})_e \cap (a_{i,j}^{k(\dots)})_m = \begin{cases} 1, & \text{якщо } (\dots) = (\dots) \\ 0, & \text{в іншому випадку} \end{cases} \quad (3)$$

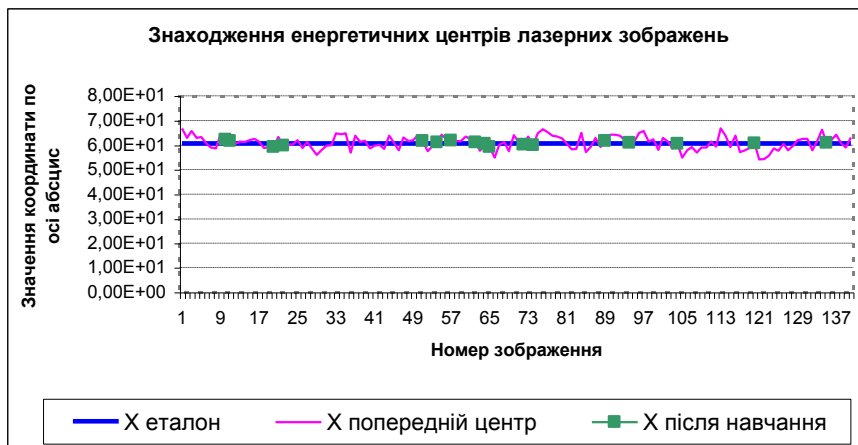
Загальне число елементів в еталонній паралельно-ієрархічній мережі обчислюється в такий спосіб

$$N_e = N_{a_{i,j}^1} + N_{a_{i,j}^2} + \dots + N_{a_{i,j}^3} + N_{a_{i,j}^k} \quad (4)$$

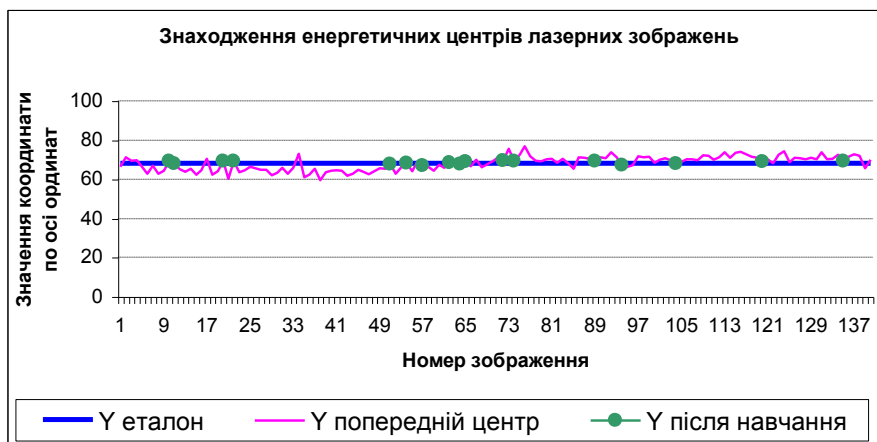
Нормована міра порівняння обчислюється в так:

$$\mathfrak{R} = \frac{R(c_e, c_m)}{N_e} \quad (5)$$

Порівняльний аналіз показує, що запропоновані методи дозволяють вимірювати координати центру лазерних зображень на основі операцій урівноваження і апроксимації крайових ліній з точністю визначення точки прив'язки не більше ніж 1,5 пікселя, (рис.1), які по точності перевищують відомі, наприклад, на основі визначення центру ваги за допомогою моментних ознак [6,10].



а) по координаті X



б) по координаті Y

Рис. 1. Координати енергетичних центрів зображень протяжних лазерних трас

ВИЗНАЧЕННЯ ЦЕНТРУ МАКСИМАЛЬНОЇ ІНТЕНСИВНОСТІ ВИПРОМІНЮВАННЯ ПРИ ОБРОБЦІ ЗОБРАЖЕНЬ ПРОТЯЖНИХ ЛАЗЕРНИХ ТРАС

Суть методу полягає у визначенні центра максимальної інтенсивності плями зображення протяжної лазерної траси використовуючи звичайний метод знаходження центра мас. В загальному випадку центр максимальної інтенсивності можна визначити за наступною формулою:

$$\vec{r} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \vec{r}_{ij} \cdot \omega_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \omega_{ij}} \quad (6)$$

де \vec{r} – радіус-вектор центра максимальної інтенсивності; \vec{r}_{ij} – радіус-вектор поточного пікселя з координатами $(i;j)$; ω_{ij} – інтенсивність поточного пікселя з координатами $(i;j)$; n – висота зображення в пікселях; m – ширина зображення в пікселях.

Враховуючи те, що ми можемо спроектувати всі вектори на одну площину і при цьому рівняння (6) не втратить сенсу, а також те, що ми працюємо з двовимірною ортогональною системою координат, для кожної координати можна записати наступні рівняння:

$$x = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m x_{ij} \cdot \omega_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \omega_{ij}} \quad (7)$$

$$y = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m y_{ij} \cdot \omega_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \omega_{ij}} \quad (8)$$

де x – абсциса центра максимальної інтенсивності; y – ордината центра максимальної інтенсивності; x_{ij} – абсциса поточного пікселя з координатами $(i;j)$; y_{ij} – ордината поточного пікселя з координатами $(i;j)$;

Якщо обрати за початок відліку верхній лівий кут зображення, то дані рівняння приймуть вигляд:

$$x = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m i \cdot \omega_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \omega_{ij}} \quad (9)$$

$$y = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m j \cdot \omega_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \omega_{ij}} \quad (10)$$

Таким чином, запропонована методика вимірювання центра максимальної інтенсивності плями зображення протяжної лазерної траси, з одного боку, є достатньо зручною для моделювання та програмної реалізації, а також, з іншого, показує достатньо непогані результати при обробці плями зображень різних геометричних форм (згідно із отриманими експериментальними даними) [11]. Це є важливим, оскільки дані методи визначення центру максимальної інтенсивності призначені для підвищення швидкості прогнозування поведінки плями в режимі реального часу. Дана проблема є досить актуальною, оскільки вже існуючі методи не достатньо задовольняють вимогам, які висуваються до подібних систем прогнозування поведінки реальних об'єктів.

ЕКСТРАПОЛЯЦІЙНІ МЕТОДИ ПРИ ОБРОБЦІ ТА ПРОГНОЗУВАННІ КООРДИНАТ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ЦЕНТРІВ ЗОБРАЖЕНЬ ПРОТЯЖНИХ ЛАЗЕРНИХ ТРАС

Аналіз задачі екстраполяції лазерної траси показує, що вона, по суті, має статистичний характер по мірі значного впливу флуктуацій плями зображення лазерної траси на координати центра, що обчислюються, і по яким, в принципі, і здійснюється екстраполяція. Таким чином, розглядаючи задачу

екстраполяції як статистичну задачу оцінювання, варто знаходити відповідні інтервальні оцінки координат центра плями в минулі моменти часу і їх оцінки в майбутні моменти. Однак, такий підхід ніяк не підвищує точність і надійність екстраполяції. Для підвищення точності й надійності екстраполяції можна запропонувати два підходи [12]:

- 1) використання, замість енергетичного центра плями, іншої характеристики, більш стійкої до флуктуацій;
- 2) препарування вихідного зображення плями таким чином, щоб послабити вплив флуктуацій на координати обраного центра (зокрема, енергетичного).

Очевидно, що ці два підходи є незалежними й можуть використовуватися спільно. Попереднє препарування зображення буде корисним (і навіть необхідним) при використанні як центру зображення будь-якої інтегральної ознаки зображення.

Зосередимось детально на другому підході, що стосується енергетичного центра плями. З результатів обчислення координат енергетичного центра відзначено, що точки, розташовані на краях зображення, здійснюють найбільш сильний вплив на координати центра, завдяки ваговим множникам координат x, y . У той же час саме периферійні точки найбільш сильно піддані флуктуаціям (це справедливо й відносно периферійних точок рівневих та розрядних зрізів зображення). Виходячи із цього, пропонується метод препарування зображень лазерної плями за допомогою операції ерозії (дилатії – dilation), суть якої – у видаленні периферичних та ізольованих пікселів зображення.

У найпростішому випадку бінаризованого зображення, цей метод полягає в наступному:

- 1) бінаризація зображення плями за рівнем t .

$$f_b(i, j) = \begin{cases} 1, & f(i, j) \geq t_0; \\ 0, & f(i, j) < t_0, \end{cases} \quad (11)$$

де i, j – дискретні координати пікселів;

- 2) k – крокова ерозія, що описується формулою:

$$f_b^{(k)}(i, j) = f^{(k-1)}(i-1, j) \wedge f^{(k-1)}(i, j-1) \wedge f^{(k-1)}(i, j+1) \wedge f^{(k-1)}(i+1, j), \quad (12)$$

або

$$f_b^{(k)}(i, j) = f^{(k-1)}(i-1, j) \wedge f^{(k-1)}(i, j-1) \wedge f^{(k-1)}(i, j) \wedge f^{(k-1)}(i, j+1) \wedge f^{(k-1)}(i+1, j),$$

де $f_b^{(k)}(i, j)$ – стан пікселя на k -му кроці.

Як видно, ерозія зводиться до кон'юнкції 4 пікселів – околу:

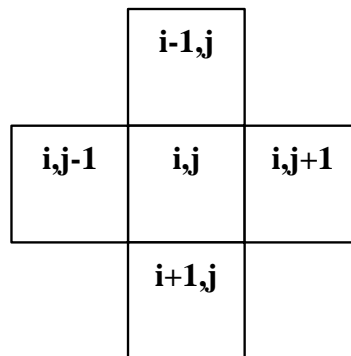


Рис. 2. Процедура кон'юнкції 4 пікселів

- 3) Екстраполяція препарованої лазерної траси за допомогою будь-якого алгоритму (за допомогою кінцевих різниць, сплайн-екстраполяція та ін.)

Також, є доцільним застосування запропонованого методу не до бінаризованого за одним рівнем t_0 зображення, а до сукупності його рівневих (за набором рівнів t_0, t_1, \dots, t_k) зрізів або розрядних зрізів.

Попередні результати моделювання даного методу показують, що він здійснює деяке покращення якості екстраполяції лазерної траси. У попередніх дослідженнях виконувалася бінаризація за одним рівнем t_0 , що обирався довільно, кількість кроків ерозії також вибиралась довільно.

ВИСНОВКИ

Таким чином, в роботі запропоновано методику обробки плямових зображень, апробовану на прикладах аналізу структурованих і неструктурованих зображень протяжних лазерних трас, що показує достатню її універсальність застосування для різноманітних прикладних задач і достатньої усталеності до різних деформуючих факторів. Запропоновано метод попередньої обробки для паралельно-ієрархічного розпізнавання зображень на основі урівноваження контурних препаратів, який у порівнянні з традиційним методом кореляційної обробки зображень дозволяє скоротити час розпізнавання для різної кількості урівноважуваних кривих. Розроблено метод визначення центру максимальної інтенсивності випромінювання для плямових зображень лазерних пучків на основі процедур урівноваження і апроксимації крайових ліній з використанням при навчанні мережного алгоритму.

Також, у роботі запропоновано для процедури навчання, використовуючи ідею популяційного кодування в штучній нейронній мережі і наближення її до природних нейронних мереж, поточний образ відображати поточно паралельно-ієрархічною мережею з поточними параметрами і перетворювати їх на основі узагальненого контурного препарування в бінарні препарати з наступним порівнянням на основі нормованої міри порівняння з еталонною паралельно-ієрархічною мережею еталонного образу з усередненими параметрами, елементи якого є бінаризованими препаратами. На відміну від відомих структур штучних нейронних мереж, у яких для порівняння використовуються не нормовані (абсолютні) критерії подібності в розглянутому методі навчання використовується нормований критерій. При цьому нормовану міру порівняння запропоновано обчислювати не тільки окремо для кожного двох рівнів, але також обчислювати і загальну для двох паралельно-ієрархічних мереж, що поліпшує точність формування результату розпізнавання. Результати машинного моделювання, проведені на прикладі обробки зображень протяжних лазерних трас, показують повну адекватність отриманих теоретичних і експериментальних результатів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Свечников С.В., Кожемяко В.П., Тимченко Л.И. Квазиимпульсно-потенциальные оптоэлектронные элементы и устройства логико-временного типа. – К.: Наукова думка, 1987. – 256с.
2. Паралельно-ієрархічне перетворення як системна модель оптико-електронних засобів штучного інтелекту. Монографія / В.П. Кожем'яко, Ю.Ф. Кутаєв, С.В. Свечніков, Л.І. Тимченко, А.А. Яровий – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2003. – 324 с.
3. Зуев В.Е., Фадеев В.Я. Лазерные навигационные устройства. - М.: Радио и связь, 1987. – 160 с.
4. Basov N.G., Zemskov E.M., Kutaev Y.F. et. al. Laser Control of Near Earth Space and Possibilities for Removal of Space Debris from Orbit with Explosive Photo-Dissociation Lasers with Phase Conjugation // Proc. GCL/HPL 98. SPIE Symposium. - St-Petersburg (Russia). - 1998.
5. Тимченко Л.И. Многоэтапная параллельно-иерархическая сеть как модель нейроподобной схемы вычислений. // Кибернетика и системный анализ. – 2000. – №2. – с.114-134.
6. В.П. Кожем'яко, Л.І. Тимченко, А.А. Яровий Паралельно-ієрархічні мережі як структурно-функціональний базис для побудови спеціалізованих моделей образного комп'ютера. Монографія. – Вінниця: Універсум-Вінниця, 2005. – 161 с.
7. Хинтон Д.Е. Как обучаются нейронные сети // В мире науки. – 1992.- №11-12. – с. 103-110.
8. Тимченко Л.І., Чепорнюк С.В., Кутаєв Ю.Ф., Герцій О.А. Компактний опис моделей зображень для класифікації образів. // Вісник ВПІ. – 1998. – №2. – с. 72-83.
9. V.P. Kozhemyako, L.I. Tymchenko, Yu.F. Kutaev, A.A. Yaroviy Approach for real-time image recognition. // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2001 р. – №1. – С. 110-124.
10. V.P. Kozhemyako, L.I. Timchenko, Yu.F. Kutaev, A.A. Yarovyuy, A.A. Gertsyiy, A.T. Terenchuk, Nafez Shweiki Method for Training of a Parallel-Hierarchical Network, Based on Population Coding for Processing of Extended Laser Paths Images // Proceedings of SPIE, Volume 4790, 2002. – p. 465-479.
11. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 20958. Комп'ютерна програма для реалізації обробки плямових зображень відео-траси лазерних променів у реальному часі / Яровий А.А., Зарезенко Д.П. Дата реєстрації Державним Департаментом інтелектуальної власності України 18.06.2007.
12. V.P. Kozhemyako, L.I. Timchenko, Yu.F. Kutaev, A.A. Gertsyiy, A.A. Yarovyuy, N.I. Kokryatskaya, N.P. Grebenyuk, O.A. Poplavskyy Analysis of the methodological approaches in connection with the problem

solving of extrapolation of object trajectory // Proceedings of SPIE, Volume 5175, 2003. – p. 222-236.

Надійшла до редакції 20.06.2007 р.

КОЖЕМ'ЯКО В.П. – академік АНУ, д.т.н., професор, завідуючий кафедрою лазерної і оптоелектронної техніки, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна.

ТИМЧЕНКО Л.І. – д.т.н., професор, завідуючий кафедрою автометрії і систем передачі інформації, Київський університет економіки і технологій транспорту, Київ, Україна.

ЯРОВИЙ А.А. – к.т.н., старший викладач кафедри інтелектуальних систем, науковий співробітник кафедри лазерної і оптоелектронної техніки, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна.

ЗАРЕЗЕНКО Д.П. – магістрант кафедри інтелектуальних систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна.