



УДК 004.93.12

С.В. ЯРЕМЕНКО

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна,
e-mail: yaserg555@gmail.com.

Ю.В. КРАК

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Інститут кібернетики
ім. В.М. Глушкова НАН України, Київ, Україна, e-mail: yuri.krak@gmail.com.

ВИЗНАЧЕННЯ ЦЕНТРОЇДА ЛАЗЕРНОЇ ПЛЯМИ У ПЛОЩИНІ ФОТОСЕНСОРА МУЛЬТИМЕДІЙНОГО ТИРУ НА ОСНОВІ МЕТОДІВ ІНТЕРПОЛЯЦІЇ ТА ФІЛЬТРАЦІЇ ФРАГМЕНТА ЗОБРАЖЕННЯ

Анотація. Розглянуто задачу визначення центроїда проекції лазерної плями на площині фотосенсора у мультимедійному тирі. Запропоновано двоетапний підхід до розв'язання цієї задачі. Досліджено можливості підвищення точності визначення центроїда за рахунок явного виділення контурів плями (другий етап оброблення) замість визначення країв плями з використанням порогової бінарizaції. Проведено аналіз підходів до визначення країв плями. Для розв'язання задачі збільшено масштаб фрагмента зображення за рахунок інтерполяції нових точок. Досліджено можливості виділення контуру плями шляхом оброблення фрагмента зображення фільтрами низьких та високих частот. Проведено порівняльну оцінку точності базового алгоритму порівняно з модифікованим варіантом. Показано, що модифікований алгоритм забезпечує підвищення точності визначення центроїда на 30 %. Підвищення точності досягнуто завдяки тому, що модифікований метод надає змогу знаходити контури плями в явному вигляді.

Ключові слова: мультимедійний тир, лазерна пляма, контур, центр ваги, фільтри цифрового зображення.

ВСТУП. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Задача знаходження центроїда проекції лазерної плями на площині фотосенсора в мультимедійному тирі є важливою та актуальною. Її розв'язання дає змогу точніше оцінити правильність влучення в ціль [1–3] і, як наслідок, підвищити якість і ефективність навчання користувачів на тренажерах цього типу. Для знаходження лазерної плями та визначення правильності влучень у ціль у цій роботі запропоновано підхід до розв'язання зазначеної задачі, який містить два етапи.

1. З кадру виділяють точки плями, використовуючи бінарizaцію типу BINARY бібліотеки [4] з максимально можливим нижнім порогом, який відсікає шумові ефекти. Далі обчислюють центроїд точок як центр мас, а також квадратний фрагмент навколо нього.

2. Для цього квадратного фрагмента уточнюють положення центроїда шляхом виділення точок за допомогою бінарizaції зі збереженням інтенсивності точок (на основі TOZERO [4]) та з меншим порогом. Центроїд визначають як центр тяжіння з урахуванням інтенсивності точок.

У межах запропонованого підходу краї плями виділяють методом порогової бінарizaції [2, 4]. Як показує аналіз плям та результати тестування цього ал-

© С.В. Яременко, Ю.В. Крак, 2022

горитму, таке наближення є допустимим. Найбільш яскраві точки знаходяться ближче до центра, причому їхній вплив на розташування центроїда є значно сильнішим ніж у периферійних точок. Отже, явне виділення країв (контуру) плями може забезпечити значне підвищення точності визначення центроїда. Зазначимо, що кожного разу, коли точка помилково потрапила (або не потрапила) в ділянку плями, відбувається зміщення її центроїда.

У цій роботі досліджено можливості підвищення точності визначення центроїда за рахунок точнішого виділення контурів плями (другий етап оброблення) порівняно з визначенням країв плями тільки з використанням порогової бінаризації.

ПІДХОДИ ДО ВИЗНАЧЕННЯ ЦЕНТРОЇДА НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ КОНТУРІВ ПЛЯМИ

Різновиди країв та можливі алгоритми визначення контурів плями на їхній основі наведено на рис. 1.

Оригінальне зображення плями має краї типу NOISY («зашумлені»). Перед подальшим обробленням їх рекомендують згладити відповідними методами, які будуть розглянуті нижче. Як варіант, можна спочатку виділити контури плями одним із відомих методів виявлення безпосередньо за оригінальним зображенням, потім цей контур інтерпольувати еліпсом і визначити центроїд. Після згладжування отримують краї контуру типу RAMP. Їх можна привести до типу ROOF або STEP, використовуючи відповідно бінаризацію TOZERO або BINARY [4]. Потім визначають контур плями, а за ним — центроїд. Зазначимо, що у разі використання бінаризації контур плями визначається неоднозначно — залежно від заданого порогу вибирають різні контури. Для однозначного визначення контуру плями потрібно виділити точки, в яких відбувається найбільша зміна інтенсивності.

Отже, контури, визначені різними алгоритмами, є подібними, але відрізняються розмірами. Якщо припустити, що лазерну пляму представлено набором еквідистантних ліній (еліпсів) різної інтенсивності, достатньо знайти хоча б одну з них, а потім можна визначити положення центроїда плями.

Водночас, якщо здійснювати бінаризацію фрагмента зображення з різними порогоми, положення центроїда однієї й тієї самої плями може змінюватись, оскільки для кожного значення порогу бінаризації буде визначено свій контур з іншим положенням центроїда.

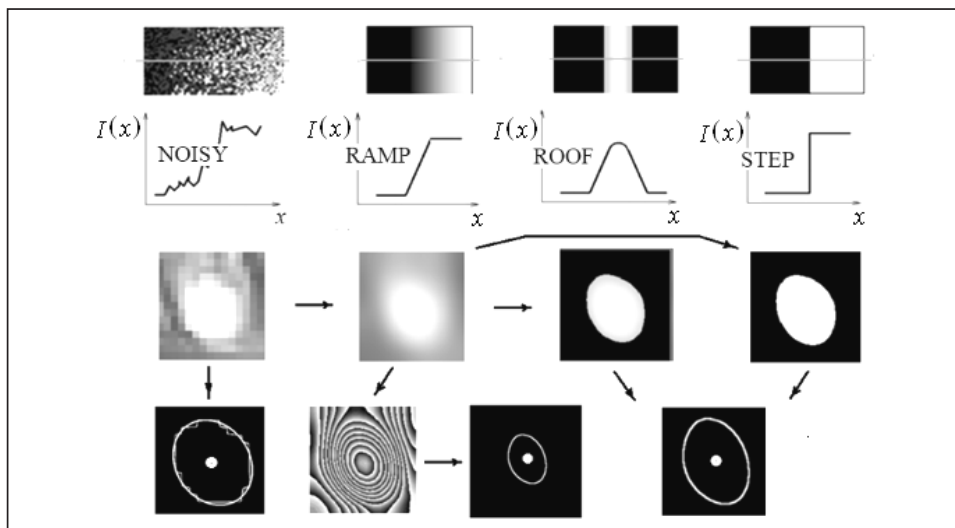


Рис. 1. Різновиди країв та можливі алгоритми їхнього визначення

Вочевидь, на ступінь нееквідистантності чинить вплив нерівномірність інтенсивності точок фону навколо плями. Контур плями зсувається у той бік, де точки фону світліші. Для градієнтних ліній (еліпсів), що знаходяться ближче до центра плями, властивість еквідистантності є більш характерною ніж для ліній, віддалених від центра (див. рис. 1). Отже, положення центроїдів цих ліній буде практично одним і тим самим. Оскільки внутрішні еліпси визначаються найінтенсивнішими точками, то для найвищих порогів можна отримати найбільшу стабільність у визначенні центроїда.

Зазначимо, що контур — це замкнена межа (край), визначена точками між двома ділянками з відносно різними рівнями інтенсивності кольору. Основні методи виділення країв ґрунтуються на одній із базових властивостей сигналу яскравості, якою є перепад (розривність) функції яскравості $f(x)$ [5, 6].

Зазвичай краї визначають шляхом знаходження:

- локальних екстремумів (максимумів або мінімумів) першої похідної;
- перетину нуля другої похідної.

Критеріями оптимального виявлення контурів є:

- мінімізація ймовірності виявлення паразитних країв та пропуску реальних країв;
- хороша локалізація (виявлені точки мають бути якомога ближче до істинних країв);
- один відгук (мінімальна кількість локальних екстремумів навколо істинного краю).

Під час оброблення цифрових зображень [5] у задачах визначення центроїда досить складно обчислити похідні зміни інтенсивності, оскільки зображення представлено пікселями дискретно. Натомість похідну оцінюють за допомогою математичної операції, відомої як згортка. Основна ідея згортки полягає в тому, щоб брати середнє арифметичне значення точок у деякому околі як нове значення точки.

Першу похідну можна обчислити оператором Собеля:

$$\frac{df}{dx} = M_x \otimes f, \quad \frac{df}{dy} = M_y \otimes f,$$

$$\nabla f = \sqrt{\left(\frac{df}{dx}\right)^2 + \left(\frac{df}{dy}\right)^2}, \quad (1)$$

$$M_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad M_y = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}.$$

Другу похідну можна представити оператором Лапласа:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} &= f(i+1, j) - 2f(i, j) + f(i-1, j) \rightarrow [1 \quad -2 \quad 1], \\ \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} &= f(i, j+1) - 2f(i, j) + f(i, j-1) \rightarrow \begin{bmatrix} 1 \\ -2 \\ 1 \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\nabla^2 f = f(i+1, j) + f(i-1, j) - 4f(i, j) + f(i, j+1) + f(i, j-1),$$

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & -2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}.$$

Для зменшення шумів використовують оператор згладжування Гауса

$$G = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{(x^2+y^2)}{2\sigma^2}} \rightarrow \sigma=1 \rightarrow \begin{bmatrix} 0.003 & 0.013 & 0.022 & 0.013 & 0.003 \\ 0.013 & 0.059 & 0.097 & 0.059 & 0.013 \\ 0.022 & 0.097 & 0.159 & 0.097 & 0.022 \\ 0.013 & 0.059 & 0.097 & 0.059 & 0.013 \\ 0.003 & 0.013 & 0.022 & 0.013 & 0.003 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Операцію визначення другої похідної сигналу зі згладжуванням Гаусом можна скомбінувати і апроксимувати в оператор LoG (Laplacian of Gaussian):

$$\nabla^2 [f(x, y) \times G(x, y)] = \nabla^2 G(x, y) \times f(x, y),$$

$$\nabla^2 G(x, y) = -\frac{1}{\pi\sigma^4} \left(1 - \frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2} \right) e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \rightarrow \sigma=1.4 \rightarrow \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 2 & 1 & 0 \\ 1 & 2 & -16 & 2 & 1 \\ 0 & 1 & 2 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Використовуючи безпосередньо лише класичні алгоритми знаходження контурів, отримують подібні результати, які дають змогу здійснювати подальше оброблення. Зауважимо, що градієнтні методи є малочутливими до шумів та контрастності зображення, але не гарантують замкнутості контурів, що потребує застосування алгоритму об'єднання граничних точок.

Зазначимо, що зображення за базовим алгоритмом визначення центроїда обробляють у два етапи. На другому етапі можна підвищувати роздільність не всього фрейму, а лише виділеного фрагмента зображення з плямою. Це здійснюють шляхом інтерполяції нових точок — будують нові точки даних у діапазоні дискретного набору відомих точок даних. Від якості інтерполяції може суттєво залежати точність визначення контуру і відповідно точність визначення положення центроїда.

Застосовано чотири методи інтерполяції (NEAREST, LINEAR, CUBIK, LANCZOS4) (рис. 2), які забезпечує бібліотека OpenCV [4]. Для оцінювання впливу, зумовленого збільшенням масштабу фрагмента зображення положення центроїда, координати центроїда C_x, C_y визначено через моменти M_{ij} дискретного зображення з інтенсивністю пікселів $I(x, y)$:

$$M_{ij} = \sum_x \sum_y x^i y^j I(x, y), \quad M_{00} = \sum_x \sum_y I(x, y), \quad \{C_x, C_y\} = \left\{ \frac{M_{10}}{M_{00}}, \frac{M_{01}}{M_{00}} \right\}. \quad (5)$$

Розрахунки виконано для оригінального зображення та зображення, збільшеного у 20 разів, а потім зменшеного до початкового масштабу (див. рис. 2).

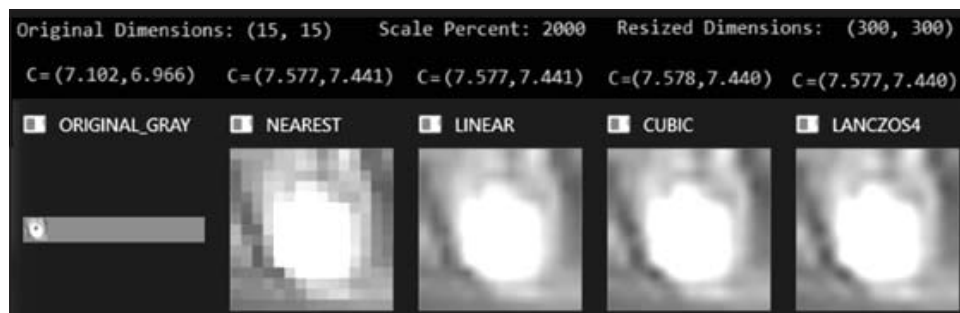


Рис. 2. Оцінювання впливу, зумовленого збільшенням масштабу зображення, на положення центроїда плями

Результати проведеного тестування свідчать про те, що координати центра (7.5, 7.4), отримані після збільшення фрагмента зображення, суттєво не відрізняються від координат центра (7.102, 6.966), отриманих без цього збільшення. Розкид координат знаходиться в межах 0.5 пікселя. Отже, можна дійти висновку, що масштабування фрагмента зображення з подальшим відповідним обробленням дає змогу уточнити краї плями, визначені шляхом бінаризації зображення, та більш точно визначити координати центроїда плями.

Одним з важливих методів оброблення цифрового зображення є згортка з використанням фільтрів для зниження частот чи смуги частот у заданому діапазоні. Оригінальне зображення I_o можна представити як згортку фільтром W_{ap} , який пропускає всі частоти:

$$I_o = W_{ap} \times I_o, \quad W_{ap} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Згортка фільтром W_{lp} пропускає нижні частоти:

$$I_{lp} = W_{lp} \times I_o, \quad W_{lp} = \frac{1}{9} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Фільтр для високих частот I_{hp} можна отримати шляхом віднімання зображення, обробленого фільтром W_{lp} , від оригінального зображення:

$$I_{hp} = I_o - I_{lp} = W_{ap} \times I_o - W_{lp} \times I_o = (W_{ap} - W_{lp}) \times I_o = W_{hp} \times I_o, \\ W_{hp} = W_{ap} - W_{lp} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} - \frac{1}{9} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} = \frac{1}{9} \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & 8 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

У випадку згортки високочастотного ядра з ділянкою зображення, де всі пікселі мають однаковий рівень інтенсивності, результат дорівнює нулю, тобто фільтр високих частот повністю пригнічує нульову складову.

Отже, можна дійти важливого висновку, що центр плями на додаток до найбільшої інтенсивності характеризується ще й однорідністю інтенсивності і вона збільшується у напрямку до центра плями. Отже, шляхом виділення однорідної ділянки можна визначити і самі точки плями [7–11], відфільтрувавши точки фону і видаливши шуми навколо плями.

Ще одним підходом до оброблення зображень є морфологічна фільтрація, що використовується для розширення (дилатації) або звуження (ерозії) елементів бінарного зображення. У цьому дослідженні для ефективного виділення контурів плями застосовано операцію ерозії для зменшення шуму, що залишається після оброблення з використанням LoG. Слід зазначити, що операція ерозії разом із шумами може видалити і саму пляму. Тому, щоб зберегти вихідні розміри плями, замість операції ерозії слід застосовувати її різновид — операцію cv2.MORPH_OPEN [4], безпосередньо за якою слідує операція розширення.

МОДИФІКОВАНИЙ АЛГОРИТМ ВИЗНАЧЕННЯ ЦЕНТРОЇДА З ВИДІЛЕННЯМ КОНТУРІВ ПЛЯМИ

На основі результатів аналізу різних методів оброблення зображень, виділення країв і контурів [12–15] та з урахуванням їхніх переваг запропоновано алгоритм визначення центроїда, який складається з таких етапів.

1. Вхідне RGB зображення перетворюють на напівтонове.

2. Визначають положення точок плями шляхом бінаризації зображення з високим порогом (нижній поріг становить 245). За такого значення порогу відсікаються пікселі фону, залишаються лише пікселі плями.
3. Визначають центр мас знайдених плям через моменти (5).
4. За центром мас визначають фрагмент зображення навколо центра плями — квадрат, розмір якого перевищує розміри виявленої плями приблизно у два рази.
5. Збільшують роздільну здатність фрагмента зображення, виділеного на попередньому етапі (масштаб збільшення $M = 20$ для роздільної здатності вихідного зображення $1280 * 720$).
6. Згладжують фрагмент зображення, збільшений на попередньому етапі. Згладжування реалізують з дискретним наближенням ядра Гауса ($\sigma = 24$ для $M = 20$).
7. Виконують згортку фрагмента зображення оператором Лапласа з посиленням сигналу, яке становить 100.
8. Бінаризують зображення з інвертуванням інтенсивності (бінаризацією типу `BINARY_INV`)
9. Здійснюють морфологічне оброблення фрагмента зображення (виконання операції `cv2.MORPH_OPEN`).
10. Зменшують роздільну здатність фрагмента зображення, виділеного на попередньому етапі (масштаб зменшення $M = 1 / 20$).
11. Отримане зображення (маску) накладають на фрагмент оригінального зображення (виконання операції `BITWISE_AND`).
12. Визначають центроїд плями як центр тяжкості з використанням виразів (5).

ОЦІНЮВАННЯ ТОЧНОСТІ АЛГОРИТМУ

Для тестування алгоритму використано фрагмент плями з кадру (рис. 3) з роздільною здатністю фотосенсора $1280 * 720$. Оцінювання точності здійснено шляхом зіставлення результатів, одержаних з використанням базового та запропонованого алгоритмів.

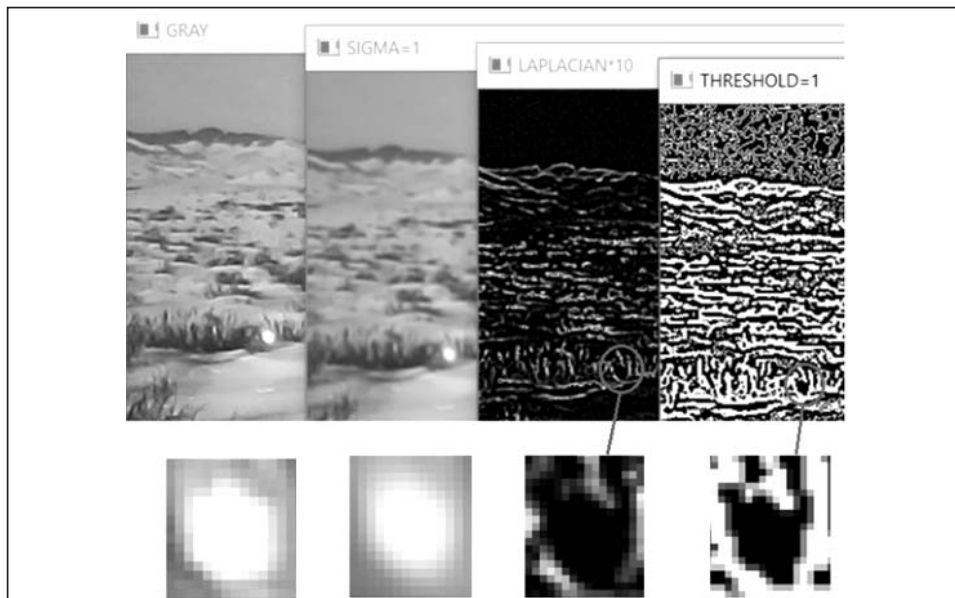


Рис. 3. Результати оброблення зображення різними методами


Розрахуємо похибки координат центроїда (C_{x_i}, C_{y_i}) для різних порогів бінаризації ($150 < T < 250$), визначених на основі базового алгоритму [13, 16] відносно координат центроїда ($C_{x_0} = 7.123, C_{y_0} = 7.621$), визначених на основі модифікованого алгоритму. Для цього скористаємося формулами

$$D_i = \sqrt{(d^2 X_i + d^2 Y_i)}, \quad dX_i = C_{x_i} - C_{x_0}, \quad dY_i = C_{y_i} - C_{y_0}. \quad (9)$$

У табл. 1. наведено результати розрахунків для однієї з плям, виділеної в результаті оброблення зображень. (Стовпці позначають номер результатів тестування для різних порогових значень. Рядки позначають i — номер тестування, T — порог бінаризації, dX — похибка визначення координат центроїда по осі X , dY — похибка визначення координат центроїда по осі Y , D — Евклідова відстань).

Результати тестування показали, що точками з порогамі бінаризації $T < 200$ (точки 1 і 2) можна знехтувати, оскільки вони різко відхиляються від інших точок. Ці порогові значення не рекомендується застосовувати у базовому алгоритмі внаслідок підвищеного впливу на результат точок фону [12, 13, 17]. Інші точки рівномірно розподіляються навколо центроїда, який визначають на основі модифікованого алгоритму (рис. 4). Це дає змогу припустити випадковий характер розкиду координат центроїда, що відповідає нормальному закону розподілу. Це також свідчить про те, що модифікований алгоритм є точнішим порівняно з базовим алгоритмом. Експериментальні дослідження з іншими фрагментами зображення плям (див. рис. 4) підтверджують це припущення.

Таблиця 1. Розкид положень центроїда, що визначаються за базовим алгоритмом, від положення центроїда, що визначається за модифікованим алгоритмом

i	1	2	3	4	5	6	7	8	
T	150	180	200	210	220	230	240	250	
dX	0.60	0.05	0.20	0.05	-0.01	0.03	-0.12	-0.07	$dX_m = 0.05$
dY	-0.84	-0.70	-0.15	0.20	-0.07	0.09	-0.11	0.13	$dY_m = 0.09$
D	1.03	0.71	0.25	0.21	0.07	0.10	0.17	0.15	$D_m = 0.16$

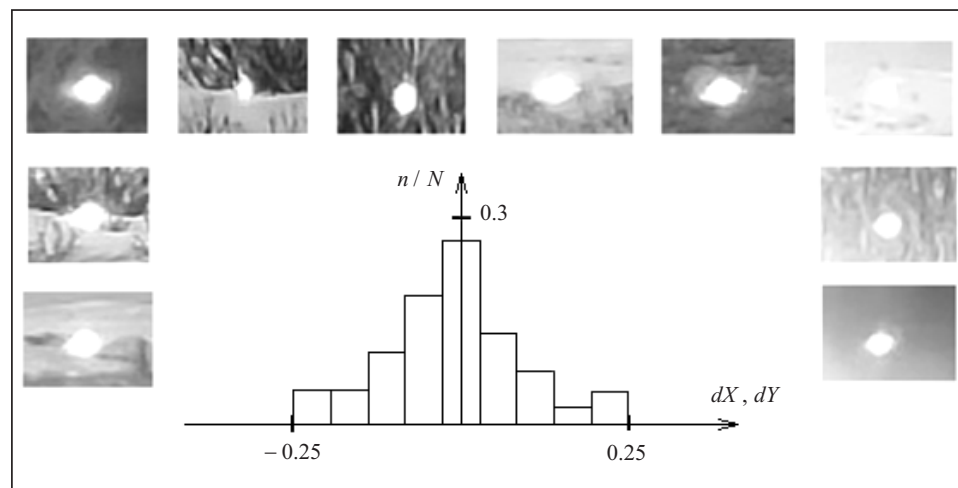


Рис. 4. Гістограма розкиду відхилень координат центроїда, визначеного на основі базового алгоритму, відносно центроїда, визначеного на основі модифікованого алгоритму

На основі результатів експериментів, проведених з різними фрагментами зображень плям (див. рис. 4), та з використанням формули (9) обчислено відстані Евкліда від положення основного центроїда. Середнє арифметичне значення відстаней становило 0.15 пікселя, що відповідає 30 % точності базового алгоритму (0.5 пікселя) [13, 18].

Підвищення точності визначення центроїда плями досягнуто за рахунок того, що модифікований метод надав змогу явно знайти контури плями. Водночас зменшився вплив пікселів фону під час визначення центроїда порівняно з виділенням країв плями за заданими порогами бінаризації.

ВИСНОВКИ

Досліджено можливості підвищення точності знаходження центроїда шляхом виділення контурів плями з використанням переваг різних методів інтерполяції та фільтрації фрагмента зображення.

На основі проведених досліджень розроблено модифікований алгоритм, що забезпечує явне виділення контурів лазерної плями.

Проведено порівняльне оцінювання точності базового та модифікованого алгоритмів. Показано, що точність модифікованого алгоритму є більшою на 30 %.

У межах подальших комплексних досліджень потрібно з'ясувати, як точність визначення центроїда у площині фотосенсора впливає на точність стрільби загалом з урахуванням взаємного розміщення екрана проєктора та камери, спотворень у камері та інших факторів. Це дасть змогу визначити оптимальний підхід до вибору алгоритму з міркувань точності, надійності та швидкодії.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Jedrasiak K., Daniec K., Sobel D., Bereska D., Nawrat A. The concept of development and test results of the multimedia shooting detection system. *Proc. 2016 Future Technologies Conference (FTC) (6–7 December 2016, San Francisco, CA, USA)*. San Francisco, 2016. P. 1057–1064. <https://doi.org/10.1109/FTC.2016.7821734>.
2. Laser Shot, Inc. URL: <http://www.lasershot.com/government-military>.
3. Świdorski W., Glogowski T., Hlosta P., Stepniak S. IR detection of impact places of projectiles in the training system “ŚNIEŻNIK”. *Problems of Mechatronics. Armament, Aviation, Safety Engineering*. 2018. Vol. 9, Iss. 2. P. 99–110. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0012.1104>.
4. OpenCV team. URL: <https://docs.opencv.org>.
5. Zakaria N.F., Zulkifley M.A., Mustafa M.M., Rohana A.K.. A review on laser spot detection system based on image processing techniques. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*. 2014. Vol. 70, Iss. 2. P. 333–344.
6. Fadhil A.F., Fatih M.M. Laser spot detection and tracking. *ZANCO Journal of Pure and Applied Sciences*. 2016. Vol. 28, Iss. 2. P. 615–623.
7. Aguilar W.G., Castro P., Caballeros J., Segarra D. Homography and morphological detection-based virtual shooting range. In: Ubiquitous Networking. UNet 2018. Boudriga N., Alouini M-S., Rekhis S., Sabir E., Pollin S. (Eds.). *Lecture Notes in Computer Science*. 2018. Vol. 11277. P. 267–272. https://doi.org/10.1007/978-3-030-02849-7_24.
8. Wang H., Hui L., Zhang J. Research on spot of CCD subdivided locating methods in laser triangulation displacement measurement. *Proc. SPIE*. 2017. Vol. 10256. <https://doi.org/10.1117/12.2257635>.

9. Guthe S.A., Soni P.M. Target shooting training and instructive system model using Python. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*. 2016. Vol. 5, Iss. 05. P. 594–597. <http://dx.doi.org/10.17577/IJERTV5IS050902>.
10. Barmak A.V., Krak Iu.V., Manziuk E.A., Kasianiuk V.S. Information technology of separating hyperplanes synthesis for linear classifiers. *J. Autom. Inf. Sci.* 2019. Vol. 51, Iss. 5. P. 54–64. <https://doi.org/10.1615/JAutomatInfScien.v51.i5.50>.
11. Krak Iu.V., Kudin G.I., Kulyas A.I. Multidimensional scaling by means of pseudoinverse operations. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2019. Vol. 55, N 1. P. 22–29. <https://doi.org/10.1007/s10559-019-00108-9>.
12. Abdulrahman H., Magnier B., Montesinos P. From contours to ground truth: How to evaluate edge detectors by filtering. *Journal of WSCG*. 2017. Vol. 25, Iss. 2. P. 133–142.
13. Yaremenko S., Krak Iu. Determination of the position of the laser spot in the plane of the photo sensor of the multimedia shooting gallery. *Proc. EUROCON 2021 — 19th IEEE International Conference on Smart Technologies (6–8 July 2021, Lviv, Ukraine)*. Lviv, 2021. P. 531–536. <https://doi.org/10.1109/EUROCON52738.2021.9535549>.
14. Chen Q., Sun Q., Heng P., Xia D. A double-threshold image binarization method based on edge detector. *Pattern Recognition*. 2008. Vol. 41, Iss. 4. P. 1254–1267. <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2007.09.007>.
15. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. Москва: Техносфера, 2012. 1104 с.
16. Freedman G., Fattal R. Image and video upscaling from local self-examples. *ACM Trans. Graph.* 2011. Vol. 30, Iss. 2. P. 1–11. <https://doi.org/10.1145/1944846.1944852>.
17. Prasad R., Sresh S. A review on edge detection algorithms. *International Journal of Mechanical Engineering and Computer Applications*. 2016. N 1. P. 7–11.
18. Balabantaray B.K., Sahu O.P., Mishra N. A quantitative performance analysis of edge detectors with hybrid edge detector. *Journal of Computers*. 2017. Vol. 12, N 2. P. 165–173.

S. Yaremenko, Iu. Krak

DETERMINING THE CENTROID OF A LASER SPOT IN THE PLANE OF A MULTIMEDIA SHOOTING GALLERY SENSOR BASED ON THE METHODS OF INTERPOLATION AND FILTERING OF THE IMAGE FRAGMENT

Abstract. The authors consider the problem of determining the position of the centroid of a laser spot on the plane of the photosensor in a multimedia shooting gallery. A two-stage approach to solving this problem is proposed. The possibilities of increasing the accuracy of determining the centroid by explicitly highlighting the contours of the spot (2nd stage of processing) instead of determining the boundaries of the laser spot through threshold binarization are investigated. The approaches to determining the contours of the spot are analyzed. To solve the problem, the scale of the image fragment was increased through the interpolation of new points. The possibilities of highlighting the contour of the spot by processing a fragment of the image with filters of low and high frequencies are investigated. A comparative assessment of the accuracy of the basic algorithm and that of the modified version was carried out, which showed that the modified algorithm increases the accuracy of determining the centroid by 30%. Higher accuracy was achieved because the modified method made it possible to find the explicit contours of the spot.

Keywords: multimedia shooting range, laser spot, contour, centroid, digital image filters.

Надійшла до редакції 24.12.2021