

УДК 004.93.12

Ю.В. Крак, С.В. Яременко

АЛГОРИТМІЧНІ ТА АПАРАТНІ ЗАСОБИ ДЛЯ ЗНАХОДЖЕННЯ РУХОМИХ ЦІЛЕЙ НА ПРОЕКЦІЙНОМУ ЗОБРАЖЕННІ ВІД ЛАЗЕРНОГО ВИПРОМІНЮВАЧА МУЛЬТИМЕДІЙНОГО ТРЕНАЖЕРА

Ключові слова: обробка зображень, апаратне забезпечення, бінаризація, мультимедійний симулятор, лазерний випромінювач, відеопотік, кластеризація, центроїди.

Keywords: image processing, hardware, two-stage binarization, multimedia simulator, laser emitter, video stream, clustering, centroids.

Вступ

Розвиток методів комп'ютерної графіки, обробки зображень у режимі реального часу та розробка технічних засобів для ефективної візуалізації динамічних процесів створили умови для нових систем навчання різним навичкам, використовуючи віртуальні середовища, що моделюють ту чи іншу предметну область такого навчання. У цьому дослідженні пропонуються математичні методи та алгоритмічна програмна реалізація створення мультимедійного тренажера з навчання правильного використання різної зброї для придбання навичок прицільної швидкісної стрільби. Зазначимо, що лазерний випромінювач прикріплений на реальній зброї та при натисканні на курок на екрані, як результат пострілу, з'являється пляма, що створює у користувача повне відчуття природності процесу навчання. Поряд із використанням реальної зброї засобами комп'ютерної графіки створюються відповідні віртуальні середовища та моделюються різні середовища, максимально наближені до реальних умов [1]. Такі мультимедійні навчальні системи лазерної стрільби можуть використовуватися для ефективного навчання та швидкого освоєння нових типів озброєнь. При цьому необхідно розробляти складніші моделюючі системи, що підтримують весь навчально-бойовий процес [2, 3].

Постановка задачі

Розглянемо принцип роботи мультимедійного тренажера зброї з лазерним випромінювачем (рис. 1). Проектор відтворює на екрані модель тренувального відеосюжету з рухомою ціллю (наприклад, танком). Потраплення в ціль визначається збігом центрального пікселя лазерного відображення (плями) на проекційному зображенні з одним із пікселів цілі. Приймальна камера-сенсор передає відеопотік на комп'ютер, де відповідна програма обробляє кожен кадр відеопотоку в реальному часі [4]. Залежно від результатів обробки може змінюватися відеосюжет, наприклад, відтворюватися вибух (рис. 2), який супроводжується відповідними звуками з динаміка комп'ютера.

© Ю.В. КРАК, С.В. ЯРЕМЕНКО, 2022

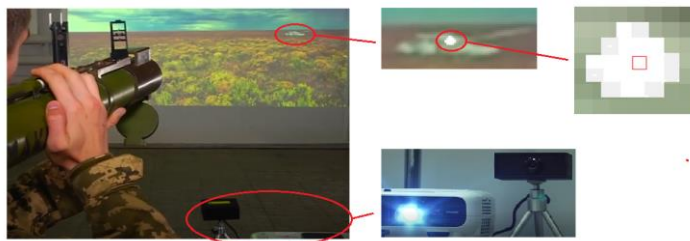


Рис. 1



Рис. 2

Важливою проблемою, вирішення якої пропонується у даній роботі, є розпізнавання положення центральної точки (піксела) плями відображення лазерного променя на екрані з високою швидкістю обробки кадру та достатньою точністю ($\Delta < 1\text{мм}$). Проблема ускладнюється тим, що розпізнавання проводиться на проекційних зображеннях зі складними текстурами фону (рельєфами місцевості, різними порами року) та кольірними ефектами типу вибуху.

Крім того, час обробки кадру має бути меншим за проміжок часу між кадрами. Зазвичай відеозйомка проводиться із частотою 25 кадрів за секунду, тобто кадри змінюються через 40 мс. За цей час необхідно обробити зображення в кадрі і за результатами обробки прийняти рішення, можливо, змінити відеосюжет. Надалі безпосередню обробку кадру здійснюватимемо за 30 мс. Зазначимо, що вимоги щодо точності та швидкості алгоритмів обробки зображень суперечливі, оскільки для високої точності потрібна більш детальна обробка зображення, що зазвичай досягається зі зменшенням швидкості обробки. Тому необхідно розробляти оптимальні алгоритми вирішення поставленої проблеми з урахуванням цих вимог та обмежень з обробки кадрів та прийняття рішень у режимі реального часу.

Апаратна та алгоритмічна складові похибки стрільби

Лазерне випромінювання відображається у вигляді плями розміром близько 8–10 мм. Точність стрільби зі зброї з лазерним випромінювачем залежить від похибки визначення та розмірів центрального піксела цієї плями [5].

Розглянемо дві складові похибки стрільби:

- апаратна — залежить від параметрів лазерного випромінювача, розмірів та характеристик проекційного екрану, роздільної здатності та характеристик приймальної камери-сенсора;

- алгоритмічна — залежить від алгоритму та методів обробки кадру.

Ці похибки взаємопов'язані. Алгоритмічна обробка пікселів плями визначає координати центру дійсних чисел, які округляються до дискретних значень координат центрального піксела плями. Від точності алгоритму залежить точність вибору центрального піксела плями. З іншого боку, точність визначення алгоритмічної складової певною мірою залежить від кількості пікселів, що характеризують пляму, тобто від роздільної здатності зображення [6].

На рис. 3 показано зображення однієї й тієї ж плями при різній чіткості зображення, що відбивається на приймальній камері-сенсорі.

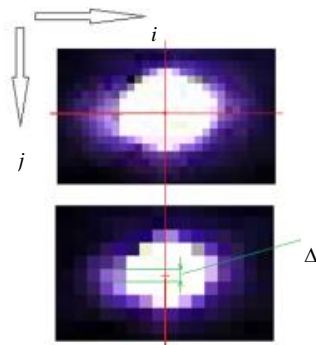


Рис. 3

Зазначимо, що центр плями при чіткості кадру (у верхній частині рисунка розмір кадру 1280 пікселів (i) на 720 пікселів (j), на нижній — 640 на 360 відповідно).

Отже, на рис. 3 для кадру з роздільною здатністю (1280*720) координати центрального пікселя плями визначені порівняно точно. Після зменшення роздільної здатності до 640*360 виникло питання, який із сусідніх пікселів вибрати як центроїд плями — з координатами (i, j) чи з координатами ($i, j+1$). У обох випадках отримуємо похибку у визначенні центра, що дорівнює $\Delta/2$, де Δ — розмір пікселя. Зазначимо, що $\Delta/2$ — максимально можлива похибка визначення центроїда, яка залежить від спроможності приймальної камери-сенсора. При роздільній здатності 1280*720 та розмірах екрана 1670 мм*940 мм максимально можлива апаратна похибка в мм дорівнює $0,5 * 1670 / 1280 = 0,7$ мм (або $0,5 * 940 / 720 = 0,7$ мм). При роздільній здатності 640*360 і тих же розмірах екрана (1670 мм*940 мм) вона збільшується вдвічі ($\Delta/2 = 1,4$ мм).

Звідси можна дійти невтішного висновку: апаратна похибка занадто низька, тому треба істотно збільшувати точність алгоритмічним шляхом, оскільки після такого визначення координат центра плями зрештою вибирається найближчий до цього центра піксел, тобто похибка визначатиметься розміром пікселя. Тому одна з важливих вимог до точності алгоритму — вибір найближчого пікселя до центра плями [7, 8].

Аналіз плям від лазерного випромінювача на проєкційному зображенні

На всіх кадрах відеозображень зазвичай є різного роду дефекти та шуми. Це зумовлено як апаратною складовою (абераціями), так і впливом зовнішніх чинників, при цьому компоненти шуму зображень поєднуються з корисним сигналом.

Залежно від природи походження аберації поділяються на колірні (хроматичні) та геометричні (називають дїсторсією). Хроматичні аберації — це оптичні спотворення, спричинені різними кутами заломлення світлових хвиль різної довжини. До аберацій оптичних систем також відносяться шуми, зумовлені властивостями чутливих елементів камер, наприклад, темні точки на світлому фоні (чорний дефект) через пікселі, що не працюють, які виникають при виробництві фотосенсорів.

Зовнішні фактори обумовлені зв'язком між освітленістю відеооб'єктиву (корисний сигнал) та світловим потоком, відображеним від місцевих об'єктів (шум), нечіткість зображення за рахунок руху об'єкта зйомки та ін.

Нижче наводяться кадри (рис. 4), отримані на проєкційному зображенні з точковими відображеннями лазерного випромінювача.

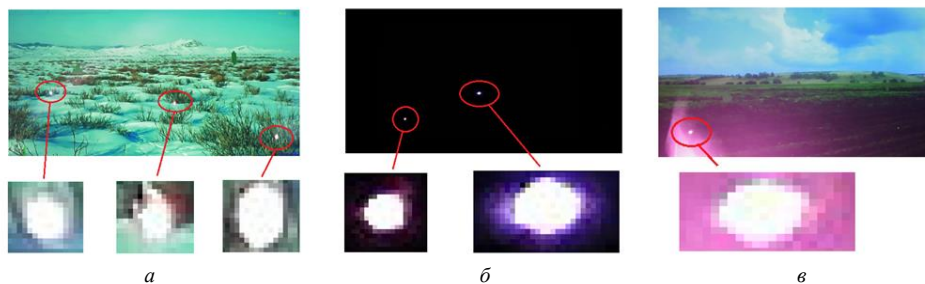


Рис. 4

На рисунках помітні дефекти, які можуть вплинути на точність розв'язання задачі:

- на рис. 4, *а* форма плями, що посередині, спотворюється під впливом точок фону, але в плямі справа виділяється темний піксел на світлому фоні (чорний дефект) — крайній піксел у лівому верхньому кутку;
- на рис. 4, *б* плями на чорному тлі, однак, колір пікселів країв плями спотворений внаслідок хроматичних аберацій, надлишок фіолетового кольору;
- на рис. 4, *в* яскравість крайніх пікселів та форма плями спотворені зовнішнім фактором (відблиск на кадрі).

Аналізуючи зображення в цілому, зазначимо важливі для розв'язання задачі ознаки плям.

1. Інтенсивність (яскравість) пікселів плям близька до максимальної (255, 255, 255) та добре контрастує з фоном.
2. На краях плями спостерігається різкий перепад інтенсивності.
3. Інтенсивність пікселів збільшується у напрямку центра плями, особливо це помітно з обох боків.
4. Градієнт зміни інтенсивності крайніх точок істотно залежить від розмаїття з точками навколишнього фону.
5. Розмір плям різний: від 6 до 12 мм (10–20 пікселів для роздільної здатності зображення 1280*720), при цьому розмір характеристичної області приблизно на 10 % більший.

6. Плями краплеподібні, близькі за формою до кола або еліпса.

Проаналізуємо ці ознаки. Перші дві дозволяють вважати, що з певним ступенем точності центральний піксел плями може бути визначений як центр мас яскраво виражених світлих пікселів. Третя ознака показує, що центр плями можна визначити через залежність зміни інтенсивності точок до центра. Четверта ознака свідчить, що у визначенні центра плями через зміну інтенсивності точок слід враховувати, що інтенсивність точок за зовнішнім контуром плями істотно відрізняється. При цьому дві останні ознаки вказують на необхідність визначати розмір і форму характеристичної області обробки пікселів кожної плями.

Алгоритм визначення центроїда плями від лазерного випромінювача

Термін «центроїд» використовується, в основному, як заміна фізичних термінів — «центр тяжіння» і «центр мас», коли необхідно підкреслити саме геометричні аспекти цього поняття, зокрема на зображеннях. У цьому випадку центроїд фрагмента дискретного напівтонового зображення визначається за аналогією до центра ваги фізичних об'єктів, де замість ваги кожної точки (x, y) береться інтенсивність $I(x, y)$. Координати центроїда C_x, C_y визначалися через моменти M_{ij} дискретного зображення з інтенсивністю пікселів $I(x, y)$:

$$\{C_x, C_y\} = \left\{ \frac{M_{10}}{M_{00}}, \frac{M_{01}}{M_{00}} \right\},$$

$$M_{00} = \sum_x \sum_y I(x, y),$$

$$M_{ij} = \sum_x \sum_y x^i y^j I(x, y).$$
(1)

Важливі властивості фрагментів зображення, отримані з моментів, включають:

- площу (для бінарних зображень) або суму рівнів кольору (для напівтонових зображень);
- центроїд з координатами C_x, C_y .

Для визначення центроїда плями від лазерної плями необхідно:

- 1) знайти точки плями;
- 2) за точками плями визначити його центроїд.

Визначення центроїда плями вирішується у два етапи (рис. 5):

- 1) приблизно визначається положення кількох точок плями через бінаризацію зображення максимально можливого нижнього порога, який відсікає шумові ефекти;
- 2) розмір плями уточнюється бінаризацією, виділеної навколо виявлених точок плями, фрагмента зображення з меншим порогом, і з цього фрагмента визначаються координати центроїда.

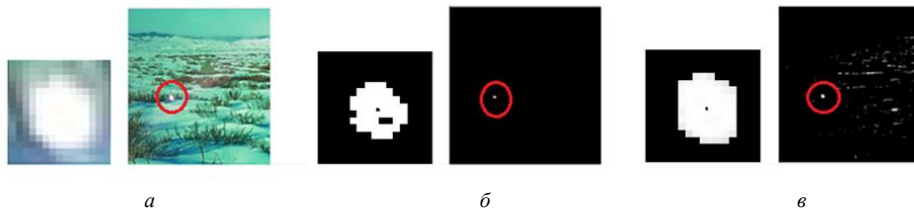


Рис. 5

Значення верхнього порога на обох етапах обробки дорівнює 255, оскільки інтенсивність центральних пікселів плями близька до максимальної.

Алгоритм визначення центроїда плями складається з таких кроків.

1. З вихідного кольорового зображення виділяється один сигнал, зазвичай RGB (Red, Green, Blue), зображення перетворюється на півтонове. Можуть бути інші варіанти, детальніше див. нижче.

2. Згладжування зображення не потрібно, оскільки на цьому етапі слід лише знайти кілька яскравих точки плями, а при згладжуванні їх інтенсивність зменшується.

3. Наведено типи порогів бінаризації для першого (BINARY) та другого (TOZERO) етапів алгоритму (рис. 6). Поріг вибирається приблизно від 246 до 254, див. тестові приклади нижче. Зазначимо, що надто високий поріг залишає мало крапок плями, а надто низький залишає на зображенні піксели фону.

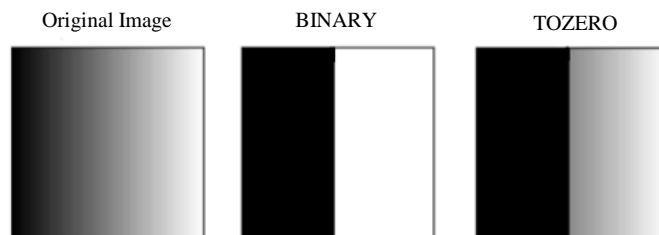


Рис. 6

4. Усі розташовані точки в радіусі 20 мм (35 пікселів) групуються в плями, відкидаються випадкові плями з числом пікселів до 3.

5. Визначаються «центри мас» знайдених плям через моменти (1).

6. По центру мас визначається фрагмент зображення навколо центра плями — квадрат, розмір якого перевищує розміри плями на першому етапі приблизно вдвічі.

7. Повертаємось до обробки напівтонового зображення. Згладжується фрагмент зображення, виділений на попередньому етапі. Згладжування реалізується з дискретним наближенням ядра Гаусса $\sigma = 1$. Використовувати більше значення σ недоцільно із-за втрати інформації про реальну інтенсивність точок плями, що важливо для вирішення задачі. Згладжування фільтрами великого радіуса пригнічує шум, але розмиває зображення.

8. Бінаризація фрагмента напівтонового зображення (другий етап обробки) із типом порога TOZERO (див. рис. 6). Цей тип порога дозволяє обнулити зовнішні пікселі плями та залишити інтенсивність пікселів усередині та по краях плями у градаціях сірого кольору. Значення нижнього порога вибирається таким, щоб у межах фрагмента зображення залишилися лише точки, що характеризують пляму, інші точки стають чорними (інтенсивність дорівнює нулю). У результаті зображення ділиться на точки, які відображаються з відтінками сірого кольору з градацією в межах від 180 до 255 (див. результати тестів нижче), і чорні точки поза плямою, які відсікаються порогом до 180.

9. Визначається положення центра тяжіння фрагмента зображення через моменти (1). Після бінаризації ті пікселі, які стали чорними, не враховуються при розрахунку центра тяжіння фрагмента зображення, оскільки їх інтенсивність дорівнює нулю. Отже, центр тяжіння визначається лише за точками, що характеризують пляму.

Вихідне зображення може бути однією з кольірних моделей (RGB, HSV (Hue, Saturation, Value) та ін.).

При використанні моделі зображення RGB віддати перевагу якомусь із сигналів складно. Зазвичай зображення перетворюється на напівтонове за формулою

$$Y' = 0,299R + 0,578G + 0,114B. \quad (2)$$

Недолік такого перетворення в тому, що різні за кольором сигнали можуть отримати однакову інтенсивність після перетворення на напівтонове зображення і після перетворення може втрачатися частина інформації, необхідної для визначення меж градієнтними методами.

При визначенні центроїда моделі HSV можна віддати перевагу сигналу H (яскравість), оскільки точки лазерної плями характеризуються високою яскравістю. Однак яскравість точок плями істотно залежить від зовнішнього освітлення. Тому діапазон градації сигналу на гістограмі може зменшитись при надто яскравому освітленні — погіршується контрастність зображення. При цьому обчислити градієнтні точки складніше. Зазначимо також, що корекцію контрастності зображення можна здійснити за допомогою лінійного розтягання гістограми.

Тестування алгоритму, аналіз та обговорення результатів

Вищеописаним алгоритмом передбачається призначення порогів бінаризації зображення у два етапи:

- 1) визначення положення плями;
- 2) виділення всіх точок плями та визначення за ними положення центроїда.

З метою визначення оптимальних нижніх порогів бінарizaції зображень на першому та другому етапах обробки зображень, а також оцінки точності визначення координат центроїда, що отримується при цьому, проводиться експериментальне тестування алгоритму. Для цього вибирається зображення максимально можливої складності — плями від лазера і натомість — снігового покриву (див. рис. 4, *a*). Перед бінарizaцією за типом BINARY (див. рис. 6) кольорове зображення (модель RGB) перетворюється на відтінки сірого (GRAY) за формулою (2).

На першому етапі (див. рис. 5) повне відсікання шумів (крапок, які не належать лазерним плямам) починається з порога бінарizaції 248 (рис. 7). Після визначення порога бінарizaції (перший етап обробки) на зображенні залишаються тільки точки лазерної плями.

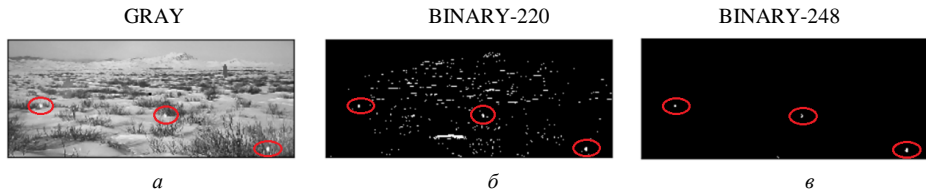


Рис. 7

На другому етапі (див. рис. 5) відсікання шумів (крапок, які не належать лазерним плямам) також може бути необхідним. Ця проблема вирішується, як і на першому етапі, вибором нижнього порога бінарizaції. При цьому значення порога на другому етапі може бути значно нижчим порівняно з порогом бінарizaції на першому етапі, оскільки площа фрагмента зображення, що виділяється, істотно менша і тому ймовірність появи шумових точок в межах фрагмента зображення навколо плями незначна.

На рис. 8 показані результати тестів із фрагментом зображення лівої плями (див. рис. 7, *a*), збільшеного в масштабі. Вони дозволяють оцінити, як змінюється положення центра мас за різних значень нижнього порога бінарizaції (перший етап обробки).

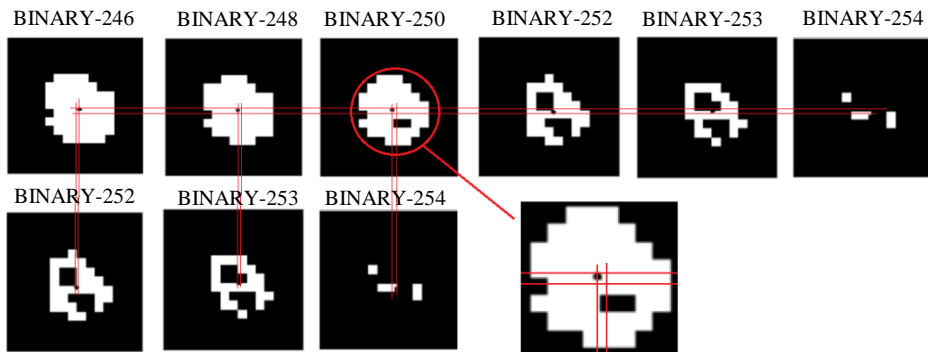


Рис. 8

На рис. 9 показано, як значення нижнього порога бінарizaції (другий етап обробки) впливає на положення центроїда.

У верхньому ряду (див. рис. 9) відображені результати тестів визначення центроїда для фрагмента зображення з відтінками сірого і низькими нижніми порогоми інтенсивності (130–180). Тут точність визначення координат центроїда виходить за межі одного пікселя. Розкид координат пояснюється тим, що інтенсивні точки фрагмента зображення включають разом із точками плями та точки фону.

У середньому ряду рисунка відбито результати тестів з порогамі інтенсивності від 180 до 220. Як видно з малюнка, положення центроїда практично не змінюється при різних порогах. Тут порогові оптимальні — залучені всі крапки плями і, в основному, відтягті точки фону. Точки фону все ж таки залишаються на фрагменті зображення, але їх вплив на положення центра незначний через нижчу інтенсивність порівняно з центральними точками плями.

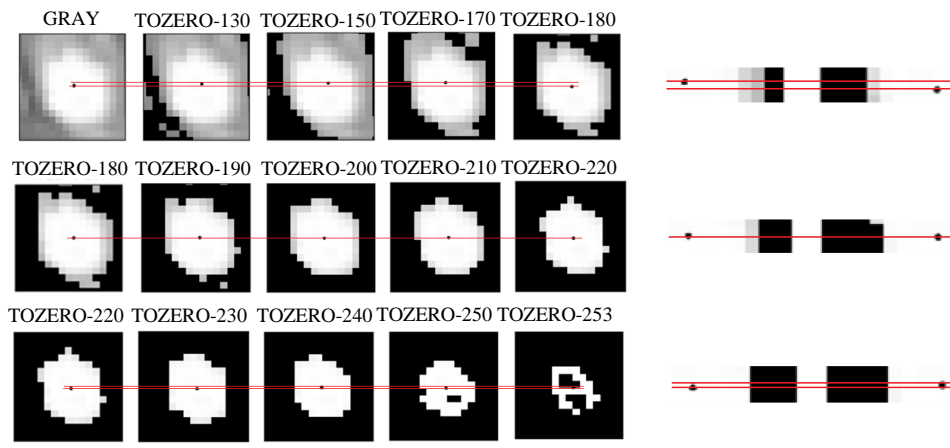


Рис. 9

У нижньому ряду наведено результати тестів із порогамі інтенсивності від 220 до 253. Тут точність визначення координат центроїда знаходиться в межах одного пікселя. Розкид координат пояснюється тим, що не враховуються інтенсивності крайніх точок плями. Крім цього, форма плями при високих порогах спотворюється через випадковий розкид інтенсивностей по центру плями.

Таким чином, проведені тести дозволяють оцінити точність, яка досягається на першому та другому етапах обробки зображень.

На першому етапі положення центра мас змінюється в межах одного пікселя (див. рис. 8) — при виборі нижнього порога інтенсивності від 246 до 254. Похибка в один піксел відповідає похибці 1,4 мм при роздільній здатності 1280*720 та розмірах екрана 1670 мм*.

На другому етапі положення центра тяжіння залишається стабільним при порозі інтенсивності від 180 до 220. Отже, алгоритмічна складова похибки не впливає на точність стрільби, оскільки розкид дійсних значень координат центроїда значно менший за розмір пікселя. Зрештою, завдання зводиться не до пошуку значень координат центроїда в дійсних числах (x, y) , а до пошуку відповідних їм індексів (i, j) центрального пікселя плями, які визначаються через операцію математичного округлення: $i = \text{Round}(x/w)$, $j = \text{Round}(y/w)$, де w — розмір пікселя.

Отже, враховуючи можливість вибору широкого діапазону порогів як для першого, так і другого етапів обробки зображень, а також те, що тести проводилися для зображення зі складною текстурою фону, можна зробити висновок, що точність визначення центроїда за запропонованим алгоритмом досить висока і істотно не залежить від зовнішніх факторів (текстури фону, освітлення та ін.).

Висновок

Проведено оцінку апаратних та алгоритмічних складових похибок розпізнавання центроїда плями від лазерного випромінювача тренажера стрілецької зброї.

Досліджено методи обробки зображень, що стосуються проблеми розпізнавання плям та визначення їх характеристик. Розроблено та протестовано алгоритм визначення центроїда плями двоетапною бінарizaцією зображення, визначено оптимальні для вирішення задачі пороги бінарizaції. Точність алгоритму достатня — у межах апаратної складової похибки. Швидкодія алгоритму висока завдяки його простоті. Надалі планується доопрацювати алгоритм, забезпечивши адаптивний вибір порогів для бінарizaції, і навіть визначення контурів плями через градієнтні методи.

Ю.В. Крак, С.В. Яременко

АЛГОРИТМІЧНІ ТА АПАРАТНІ ЗАСОБИ ДЛЯ ЗНАХОДЖЕННЯ РУХОМИХ ЦІЛЕЙ НА ПРОЕКЦІЙНОМУ ЗОБРАЖЕННІ ВІД ЛАЗЕРНОГО ВИПРОМІНЮВАЧА МУЛЬТИМЕДІЙНОГО ТРЕНАЖЕРА

Досліджено проблеми створення мультимедійного тренажера з лазерним випромінювачем для навчання правильному використанню різноманітної зброї з метою набуття навичок прицільної швидкісної стрільби. Спеціалізоване програмне забезпечення призначене для навчання стрільців-початківців та вдосконалення рівня вогневої підготовки при навчанні прийомам та правилам стрільби зі стрілецької зброї. Програмна складова складається з окремих програмних модулів, які надають можливість користувачу налаштувати інтерактивний тир, створювати та запускати вправи стрільб. Попадання в ціль визначається збігом центрального пікселя лазерної реакції (плями) на проекційному зображенні з одним із пікселів цілі. Зазначимо, що лазерний випромінювач прикріплений на реальній зброї та при натисканні на курок на екрані з'являється пляма, як результат пострілу. Поряд із використанням реальної зброї засобами комп'ютерної графіки створюються відповідні віртуальні середовища та здійснюється моделювання в ній різної обстановки, максимально наближеної до реальних умов. Досліджено апаратні та алгоритмічні помилки зйомки та розроблено методи їх зменшення. Апаратна — залежить від параметрів лазерного випромінювача, розмірів та характеристик проекційного екрану, роздільної здатності та характеристик приймальної камери-сенсора. Алгоритмічна — залежить від обраних алгоритму та методів обробки кадру. Проводиться аналіз плям від лазерного випромінювача на проекційному зображенні та пошук центроїда плями. Розроблено та апробовано алгоритм визначення центроїда плями за допомогою двоетапної бінарizaції зображення, визначено оптимальні для вирішення задачі пороги бінарizaції. Результати тестування показали, що отримана точність знаходиться в межах апаратної складової помилки, а швидкість прийняття рішень здійснюється в режимі реального часу.

Ya.V. Krak, S.V. Yaremenko

ALGORITHMIC AND HARDWARE TOOLS FOR MOVING TARGETS DETECTION ON THE PROJECTION SCREEN FROM THE LASER EMITTER OF THE MULTIMEDIA TRAINER

The paper investigates the problems of creating a multimedia simulator with a laser emitter for training the correct use of various weapons in order to acquire the skills of targeted high-speed shooting. Specialized Software is designed to train novice shooters and improve the level of fire training in learning the techniques and rules of

small arms shooting. The software component consists of separate software modules that allow the user to configure the interactive shooting range, create and run shooting exercises. Hitting the target is determined by the coincidence of the central pixel of the laser response (spot) on the projection image with one of the target pixels. Note that the laser emitter is attached to a real weapon and when you pull the trigger, a spot appears on the screen as a result of the shot. Along with the use of real weapons, computer graphics tools are used to create appropriate virtual environments and simulate a variety of situations in it, as close as possible to real conditions. Hardware and algorithmic shooting errors have been studied and methods for their reduction have been developed. Hardware depends on the parameters of the laser emitter, the size and characteristics of the projection screen, resolution and characteristics of the receiving camera-sensor. Algorithmic depends on the selected algorithm and frame processing methods. The hardware and algorithmic errors of shooting have been investigated and methods have been developed to reduce them. The analysis of the spots from the laser emitter on the projection image and the search for the centroid of the spot are carried out. An algorithm for determining the centroid of a spot through two-stage binarization of the image has been developed and tested, the thresholds of binarization that are optimal for solving the problem have been determined. The test results showed that the obtained accuracy is within the hardware component of the error, and the speed in decision-making is performed in real time.

1. Крак Ю.В., Яременко С.В. Інтерактивний стрілецький тренажер. Патент на корисну модель № 149406 від 07.11.2021р.
2. Jedrasiak K., Daniec K., Sobel D., Bereska D., Nawrat A. The concept of development and test results of the multimedia shooting detection system. *Future Technologies Conference (FTC)*, San Francisco, CA, USA. 2016. P. 1057-1064. Doi: 10.1109/FTC.2016.7821734.
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. **9**, N 2. P. 99–110. DOI: 10.5604/01.3001.0012.1104. <http://www.lasershot.com/government-military>.
4. Zakaria N. F., Zulkifley M. A., Mustafa M. M., Abdul Karim R. A review on laser spot detection system based on image processing techniques. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*. 2014. **70**, N 2. P. 333–344.
5. Singh R., Hattuniemi J. M., Mäkynen A. J. Analysis of accuracy of laser spot centroid estimation. *Proc. SPIE 7022, Advanced Laser Technologies*. 2007. 702216 (5 June 2008); <https://doi.org/10.1117/12.804104>.
6. Fujii Y., Miyatake K., Haruna M., et al. Centroid calculation algorithm using weight table to increase accuracy of center position detection. *Trans. JSASS Aerospace Tech. Japan*. 2012. **10**, N 28. P. 1–8.
7. Vyas A., Roopashree M.B., Prasad B.R. Centroid detection by gaussian pattern matching in adaptive optics. <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/0910/0910.3386.pdf>.
8. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифрова обробка зображень. М. : Техносфера, 2012. 1104 с. <https://docs.opencv.org>.

Отримано 13.01.2022