

УДК 004.932.1:[069:004.032.6]:004.42

DOI: 10.31866/2617-796X.8.2.2025.347949

Світлана Поперешняк,

кандидат фізико-математичних наук, доцент,
доцент кафедри інформатики та програмної інженерії,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
Київ, Україна
spopereshnyak@gmail.com
<http://orcid.org/0000-0002-0531-9809>

Сергій Панченко,

магістрант,
кафедра інформатики та програмної інженерії,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
Київ, Україна
panchenko.serhii@iill.kpi.ua
<http://orcid.org/0009-0000-8897-8182>

КОРЕКЦІЯ ДИНАМІЧНИХ ВІДХИЛЕНЬ НАВЕДЕННЯ В ЛАЗЕРНИХ ПРОЕКЦІЯХ ДЛЯ МУЗЕЙНИХ ТА МУЛЬТИМЕДІЙНИХ ІНСТАЛЯЦІЙ

Забезпечення точності наведення лазерного випромінювання є ключовою умовою якості сучасних музейних та мультимедійних інсталяцій. Навіть незначні динамічні відхилення, зумовлені вібраціями чи тепловими деформаціями, призводять до втрати чіткості проєкції та зниження ефекту занурення.

Мета статті – розробити й апробувати вбудовану програмну систему для компенсації динамічних похибок наведення лазерних проєкцій у реальному часі для музейних і мультимедійних інсталяцій.

Методами дослідження є математичне моделювання динамічних відхилень, алгоритми комп'ютерного зору для виявлення та відстеження лазерних міток, сенсорне об'єднання даних з інерціальних вимірювальних блоків (IMU), а також модульна програмна реалізація на одноплатних комп'ютерах під керуванням Linux. У роботі застосовано системний аналіз для оцінки наявних підходів, експериментальне тестування для перевірки працездатності алгоритмів та порівняльні випробування з класичними методами стабілізації.

Новизна дослідження полягає у створенні доступної за вартістю та ресурсоощадної системи, що поєднує CMOS-сенсори, алгоритми виявлення світлових плям і кватерніонну інтеграцію даних IMU. Така архітектура забезпечує обробку потокового відео з частотою близько 90 кадрів/с за низьких апаратних вимог, дозволяючи отримати якісну компенсацію похибок без дорогого оптико-механічного обладнання.

Висновки. У статті визначено основні проблеми динамічної стабілізації лазерних проєкцій, проаналізовано сучасні апаратні та програмні рішення, розроблено й випро-

бувано авторську вбудовану систему корекції. Отримані результати підтверджують, що запропонований підхід дає змогу підвищити точність і стійкість проєкцій у музейних та мультимедійних застосуваннях, забезпечуючи поєднання економічності, масштабованості та технічної надійності.

Ключові слова: лазерні проєкції; динамічні відхилення; комп'ютерний зір; вбудовані системи; музейні та мультимедійні інсталяції; стабілізація в реальному часі.

Вступ. Лазерні проєкції частіше стають інструментом музейної експозиції та мультимедійної сценографії: ними підсвічують дрібні деталі експонатів, синхронізують світло з аудіо / відео, формують інтерактивні мапи простору. У таких застосуваннях ключовою вимогою є стала геометрична точність наведення. Навіть незначні зміщення променя помітні оком: контент «сповзає» з об'єкта, стики багатоканальних проєкцій стають видимими, порушується синхронізація з медіа.

Джерела цих відхилень добре відомі: мікровіббрації конструкцій і трибун, температурний дрейф оптики, затримки в замкнених контурах керування, а також мінливі умови експозиції – від людських потоків до коливань мікроклімату (Li et al., 2019; Liu et al., 2024). Типові засоби протидії – жорстка механічна стабілізація та періодичне ручне калібрування – збільшують бюджет, не масштабуються на багатоканальні інсталяції та не реагують на швидкі зміни під час показу (Mohammadnejad and Aasi, 2023).

Метою дослідження є розробка та експериментальна апробація вбудованої програмно-апаратної системи корекції динамічних відхилень наведення лазерних проєкцій у музейних та мультимедійних інсталяціях у режимі реального часу.

Досягнення мети передбачає виконання таких завдань:

- сформувані математичну модель просторової геометрії та динамічних відхилень променя для подальшої алгоритмічної корекції;
- спроектувати модульну архітектуру із сенсорним злиттям IMU і відеопотоку (модулі Finder / Matcher) та кватерніонною стабілізацією;
- реалізувати прототип на одноплатній платформі під Linux із використанням CMOS-камери;
- розробити й верифікувати алгоритми детекції / відстеження плями, тесту перетину сферичних проєкцій та розпізнавання модуляційних шаблонів;
- провести експериментальну оцінку точності, латентності та робастності в динамічних сценаріях і продемонструвати роботу в реальному часі.

У статті розглянуто підхід до корекції динамічних відхилень наведення в реальному часі, який спирається на поєднання математичної моделі просторової геометрії з вбудованим ПЗ. Ядро рішення – аналіз зображення для виявлення й відстеження лазерної плями в поєднанні з даними інерціальних датчиків (IMU) та CMOS-сенсорів, що дедалі активніше застосовуються у візуальних системах і системах нагляді (Sukhavasi et al., 2021; Cao et al., 2023; Yuan and Li, 2025). Використання кватерніонних перетворень забезпечує стабілізацію у світовій системі координат, а малозатримковий контур генерує коригувальні дії без дорогих оптико-механічних модулів (Biglari and Wei, 2023; Poperehnyak et al., 2024).

Результати дослідження. Зростання складності мультимедійних інсталяцій і музейних експозицій з використанням лазерних проєкцій супроводжується підвищеними вимогами до точності систем наведення. Навіть незначні відхилення лазерного променя призводять до спотворення зображення, втрати синхронізації з іншими медіаелементами та зниження якості сприйняття. Це зумовлює потребу в пошуку рішень, що забезпечують компенсацію динамічних відхилень за доступної вартості та з можливістю роботи в реальному часі.

Наявні методи стабілізації базуються переважно на механічних засобах демпфування, періодичному калібруванні або застосуванні спеціалізованих оптико-механічних модулів. Хоча вони демонструють певну ефективність у промислових і військових системах, у сфері культурних чи освітніх інсталяцій ці рішення часто виявляються надмірно дорогими, складними в експлуатації та недостатньо гнучкими.

Альтернативний напрям пов'язаний із використанням CMOS-сенсорів для реєстрації положення лазерної плями. Висока роздільна здатність, можливість одночасного відстеження кількох джерел випромінювання та гнучка програмна обробка зображень роблять їх привабливими для побудови систем корекції. Водночас стандартні CMOS-камери мають обмеження щодо роботи в умовах низької освітленості та вимагають високоефективних алгоритмів обробки, здатних працювати на вбудованих платформах у режимі реального часу.

У цій роботі наведено архітектуру програмно-апаратної системи, що інтегрує CMOS-сенсори, інерціальні вимірювальні блоки та модулі комп'ютерного зору. Використання алгоритмів фільтрації, сегментації та стабілізації зображень у поєднанні з методами математичного моделювання дає змогу досягти корекції відхилень лазерного променя в динамічних умовах. Система орієнтована на забезпечення високої точності наведення, масштабованості для багатоканальних інсталяцій та економічної доступності завдяки застосуванню поширених апаратних компонентів і відкритих програмних бібліотек.

Варто проаналізувати відоме на сьогодні алгоритмічне забезпечення в цій сфері й технічні рішення, що допоможуть у реалізації системи коригування динамічних дефектів прицілювання.

Одним із найпоширеніших рішень для виявлення та відстеження лазерних сигналів є використання квадрантних фотодетекторів. Такі детектори, як правило, складаються з чотирьох фотодіодів, розташованих у квадратній конфігурації, що дає змогу визначати не лише наявність сигналу, але й його положення у двовимірній площині.

Основний принцип роботи квадрантного детектора полягає в порівнянні інтенсивності сигналу, що потрапляє на кожен із чотирьох сегментів. Як зазначено у роботі (Cao et al., 2023), для визначення напрямку на джерело відбитого лазерного випромінювання використовують такі формули:

$$\begin{aligned}\text{Pitch Guidance} &\approx \frac{(P_1 + P_2) - (P_3 + P_4)}{P_{\text{total}}}, \\ \text{Yaw Guidance} &\approx \frac{(P_1 + P_3) - (P_2 + P_4)}{P_{\text{total}}}, \\ P_{\text{total}} &= P_1 + P_2 + P_3 + P_4,\end{aligned}$$

де P_1, P_2, P_3, P_4 – потужність сигналу, зареєстрована на відповідних квадрантах детектора.

Попри ефективність, квадрантні детектори мають низку істотних недоліків: низьку роздільну здатність і можливість відстеження лише однієї цілі; обмежене поле зору та динамічний діапазон; високу вартість і складність налаштування; обмежену підтримку програмної обробки сигналів.

У дослідженні наведено застосування доступних CMOS-сенсорів замість квадрантних детекторів. Вони забезпечують високу роздільну здатність, здатність відстежувати кілька цілей, широкий динамічний діапазон, підтримку складних алгоритмів обробки та використання розвиненої екосистеми бібліотек.

Моделювання та аналіз програмного забезпечення. Використано BPMN для формалізації архітектури програмної системи пошуку модульованої лазерної плями. На основі аналізу компонентів системи пошуку модульованої лазерної плями розроблено BPMN-діаграму, яка відображає взаємодію основних компонентів системи та потоки даних між ними на рисунку 1.

Центральним елементом діаграми є послідовність процесів, що починається з отримання кадрів з камери. Камера функціонує як постачальник вхідних даних, передаючи чорно-білі кадри до компонента *пошукача*. Паралельно з цим процесом модуль вимірювання інерції (MBI) (Інерційний вимірювальний пристрій) безперервно надає інформацію про поточну орієнтацію дрона у вигляді кватерніонів.

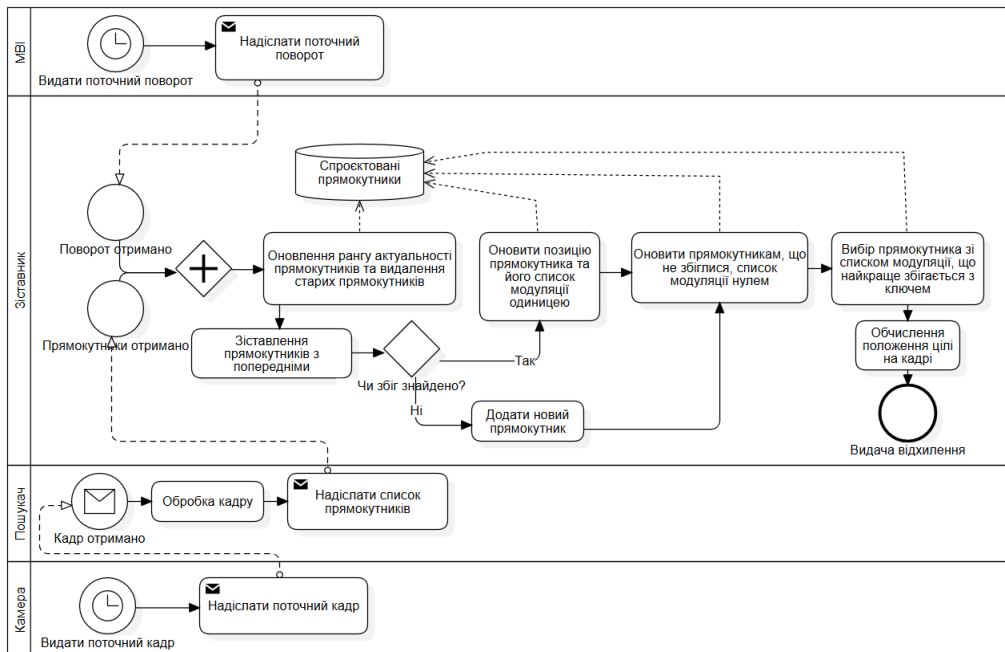


Рис. 1. Схема бізнес-процесу
Джерело: авторська розробка

Пошукач, отримавши кадр, починає виявлення пікселів, яскравість яких перевищує встановлений числовий поріг, а також об'єднання суміжних пікселів у регіони. У кінці пошукач формує обмежувальні прямокутники навколо виявлених регіонів та передає їх до зіставника.

Зіставник отримує на вхід два потоки даних: список прямокутників від пошукача та кватерніон поточного повороту дрона від МВІ. Далі він виконує складний підпроцес проєкції прямокутників у тривимірний простір на сферу та їх подальшого повороту відповідно до кватерніона. Наступним кроком є зіставлення поточних спроектованих прямокутників з тими, що були виявлені раніше. У цьому підпроцесі відбувається оновлення позицій уже відстежуваних прямокутників або додавання нових у список спостереження.

Важливою функцією зіставника є аналіз модуляції. Для кожного спроектованого прямокутника формується бінарна послідовність, де 1 відповідає наявності перетину з новими прямокутниками, а 0 – відсутності такого перетину. Підпроцес порівняння цих послідовностей з еталонним ключем модуляції дає змогу виявити прямокутник, що з найбільшою ймовірністю відповідає шуканій лазерній плямі.

Завершальним процесом є обчислення положення цілі на кадрі, тобто центра виявленого прямокутника. Це є кінцевим результатом роботи системи та використовується для коригування напрямку руху дрона. Для кращого розуміння архітектури побудовано діаграму компонентів. На рисунку 2 наведено схему архітектури.

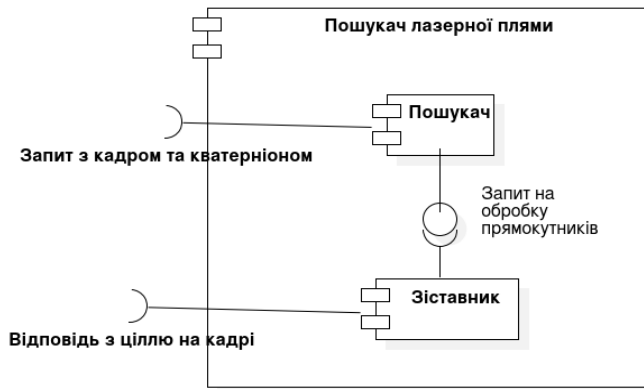


Рис. 2. Діаграма компонентів
Джерело: авторська розробка

Перший модуль «Пошукач» займається первинною обробкою вхідних даних, отриманих з камери, та виявленням потенційних лазерних плям на кадрі. Другий модуль «Зіставник» відповідає за аналіз знайдених прямокутників, їх проєкцію у тривимірний простір, зіставлення із шаблоном модуляції та визначення кінцевого положення цілі.

На вході системи є «Запит з кадром та кватерніоном», що містить необхідні вхідні дані для роботи алгоритму. Між пошукачем та зіставником відбувається обмін даними у вигляді «Запиту на обробку прямокутників», що передає результати первинної обробки для подальшого аналізу. Кінцевим результатом роботи системи є «Відповідь з ціллю на кадрі», що містить інформацію про положення виявленої модульованої лазерної плями.

Алгоритмічний опис пошукача. Результатом роботи пошукача є пошук пікселів на картинці, які більші за певний поріг, та їхнє об'єднання в групи, обмежені прямокутним периметром. На рисунку 3 можна поглянути на роботу пошукача.

Алгоритм пошуку модульованої лазерної плями працює за принципом послідовного сканування зображення та ідентифікації яскравих областей. Основна мета алгоритму – виявити на чорно-білому зображенні пікселі, яскравість яких перевищує заданий поріг, і об'єднати їх у прямокутні зони, що охоплюють потенційні лазерні плями.



Рис. 3. Виявлення пошукачем засвічених регіонів
Джерело: авторська розробка

Проекція пікселя на сферу. Нехай діагональний кут огляду камери дорівнює α , ширина та довжина сенсора камери в пікселях w та h відповідно. Тоді нехай буде піраміда $SABCD$, де S – вершина піраміди і центр координат; $ABCD$ – прямокутник і основа піраміди, де $AB = CD = h$, $BC = AD = w$. O – точка перетину діагоналей AC та BD , а також проекцією точки S на площину ABC є точка O . Кут BSD дорівнює α , тоді довжину SO можна розрахувати за формулою:

$$SO = \frac{BO}{\tan(\frac{\alpha}{2})} = \frac{\frac{BD}{2}}{\tan(\frac{\alpha}{2})} = \frac{\sqrt{AB^2 + BC^2}}{2\tan(\frac{\alpha}{2})} = \frac{\sqrt{w^2 + h^2}}{2\tan(\frac{\alpha}{2})}.$$

На рисунку 4 зображено піраміду.

Нехай напрямок вектора $\overline{SO}$ збігається з напрямком вісі x . Тоді точки A, B, C, D мають такі координати:

$$A = (|\overline{SO}|, -\frac{w}{2}, -\frac{h}{2}), B = (|\overline{SO}|, -\frac{w}{2}, \frac{h}{2}), C = (|\overline{SO}|, \frac{w}{2}, \frac{h}{2}), D = (|\overline{SO}|, \frac{w}{2}, -\frac{h}{2}).$$

Нехай буде одиничний кватерніон q , на який повернено точки A, B, C, D :

$$A_q = qA\bar{q}, B_q = qB\bar{q}, C_q = qC\bar{q}, D_q = qD\bar{q}.$$

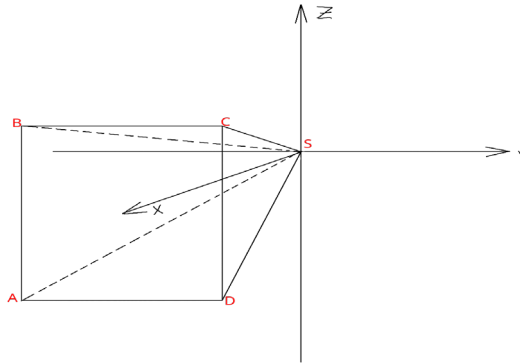


Рис. 4. Піраміда камери
Джерело: авторська розробка

Нехай буде довільний піксель P з координатами (P_x, P_y) , тоді його відносні координати обчислюються:

$$P_{\text{відносне}} = \begin{bmatrix} P_{\text{відносне},x} \\ P_{\text{відносне},y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{P_x}{h} \\ \frac{P_y}{h} \end{bmatrix}.$$

Тоді проєкція пікселя P у простір обраховується: $P_{\text{простір}} = \overline{B_q C_q} \cdot P_{\text{відносне},x} + \overline{B_q A_q} \cdot P_{\text{відносне},y}$.

Якщо цікавить саме проєкція на сферу, то потрібно обрахувати положення точки $P_{\text{сфера}}$, що є вектором $\overline{SP_{\text{сфера}}}$, за формулою: $\overline{SP_{\text{сфера}}} = \frac{\overline{SP_{\text{простір}}}}{|\overline{SP_{\text{простір}}}|}$.

Проекція точки на сфері на піксель у кадрі. Потрібно повернути вектор $\overline{SP_{\text{сфера}}}$ на кватерніон p , який є спряженим до кватерніона q , тоді можна отримати вектор $\overline{SG}$ за формулою: $\overline{SG} = p\overline{SP_{\text{сфера}}}p$.

Точка перетину з площиною $x = |\overline{SO}|: I = (|\overline{SO}|, \frac{SG_y \cdot |\overline{SO}|}{SG_x}, \frac{SG_z \cdot |\overline{SO}|}{SG_x})$.

Для того щоб була знайдена проєкція, вектори $\overline{IS}$ та $\overline{SG}$ мають бути співнапрямлені за умовою: $\overline{IS} \cdot \overline{SG} > 0$, $BI_y \in [0, w] \wedge BI_z \in [0, h]$. Тоді піксель P має координати (BI_y, BI_z) .

Визначення перетину спроектованих прямокутників. На рисунку 5 показано два спроектовані на сферу прямокутники. Завдання полягає у визначенні того, чи перетинаються вони.

Площини AOB та COD проходять через центр координат O . Звідси випливає, що в лінії перетину OP напрямок колінеарний з векторним добутком m та n , які є нормальними до AOB та COD відповідно.

Тепер потрібно зрозуміти, чи лежить вектор OP у межах секторів OAB та OCD . Необхідно розкласти вектор OP у базис векторів OA , OB та OC , OD :

$$\overline{OP} = a_1 \overline{OA} + b_1 \overline{OB} = a_2 \overline{OA} + b_2 \overline{OB}.$$

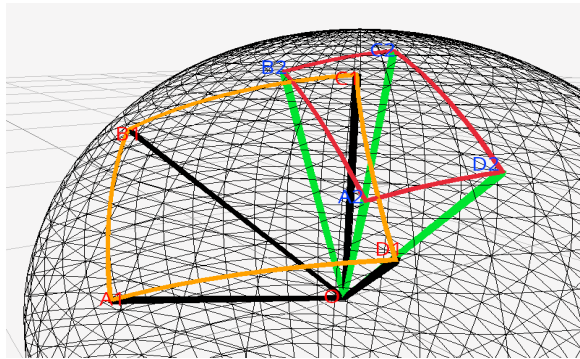


Рис. 5. Перетин двох спроектованих прямокутників

Джерело: авторська розробка

Умову належності сектору наведено нижче:

$$(a_1 > 0 \wedge b_1 > 0 \wedge a_2 > 0 \wedge b_2 > 0) \vee (a_1 < 0 \wedge b_1 < 0 \wedge a_2 < 0 \wedge b_2 < 0).$$

Модуль «Пошукач» реалізовано у вигляді класу *Finder*, що відповідає за аналіз зображень і виявлення ділянок з інтенсивністю вище заданого порогу. Для оптимізації обробки використано структури даних: *Vector* (координати), *Rect* (прямокутники), *LineSegment* (сегменти яскравих пікселів), а також контейнери *BoundedVector* та *LineBoundedVectorIndexed*.

Основний алгоритм, реалізований у методі *process()*, виконує построговий перегляд зображення, знаходить яскраві сегменти та формує навколо них прямокутники, які можуть розширюватися або об'єднуватися залежно від нових даних.

Налаштування класу здійснюється через параметри конструктора (ширина зображення, поріг яскравості, максимальна кількість прямокутників, зсув рядків). Результатом роботи є структура *FinderResult*, яка містить список виявлених прямокутників і сегментів, що передаються модулю «Зіставник» для подальшої обробки.

Зіставник (*Matcher*) є центральним компонентом системи виявлення модульованої лазерної плями. Він аналізує прямокутники, які визначив пошукач, та ідентифікує серед них ті, що відповідають шуканій плямі.

Основу становить клас *Matcher*, який підтримує набір об'єктів *Holder*, що представляють потенційні цілі, відстежувані в часі. На основі списку прямокутників і даних орієнтації камери у вигляді кватерніонів виконується проєкція координат у тривимірний простір за допомогою класів *CameraSnapshot* та *CameraSnapshotDeprojector*, що забезпечує коректність відстеження під час зміни положення камери.

Алгоритм зіставлення порівнює нові об'єкти з наявними, оновлюючи їх характеристики або створюючи нові. Аналіз патернів модуляції реалізовано через *PacketDescriptor*, що дає змогу визначати найбільш імовірну ціль. Видалення застарілих об'єктів здійснюється механізмом *Overdue*. Вихідним результатом

є координати виявленої цілі у вигляді структури *RectResult*, які передаються для подальшої обробки в системі.

Інтеграція даних інерціального сенсора (IMU). Модуль IMU побудований на основі сенсора *MPU6050*, що забезпечує зчитування даних акселерометра та гіроскопа через інтерфейс I²C. Орієнтація описується нормалізованими кватерніонами, які інтегруються в роботу *Matcher*. Такий підхід дає змогу компенсувати вібрації платформи та забезпечувати стабільне позиціонування лазерної плями в динамічних умовах, що є критичним для музейних і мультимедійних інсталяцій.

Розроблена система реалізує поєднання аналізу зображень (модуль *Finder*) та кватерніонного злиття даних (модуль *Matcher*) у модульній архітектурі. Це забезпечує роботу в режимі реального часу на вбудованих пристроях, дозволяючи ефективно коригувати динамічні відхилення лазерного наведення.

Експериментальна перевірка. Для перевірки IMU реалізовано візуалізацію його орієнтації в середовищі *Raylib*. Візуалізація у вигляді сектору сфери підтвердила правильність обробки кватерніонних даних. Порівняння орієнтації штатива з результатами відображення показало повну відповідність (наприклад, yaw=0°, pitch=0°, roll=0°), а подальші тести при yaw=180°, pitch=±45° і roll=45° підтвердили коректність роботи алгоритмів.

Ключовим етапом була перевірка алгоритму визначення перетину спроектованих прямокутників, що моделюють кандидати на лазерні плями на сферичній поверхні. Спеціально створений застосунок (*Raylib + ImGUI*) дав змогу варіювати параметри прямокутників та перевіряти точність роботи алгоритму (рис. 6). У всіх випадках система коректно фіксувала перетини та підтвердила правильність реалізації.

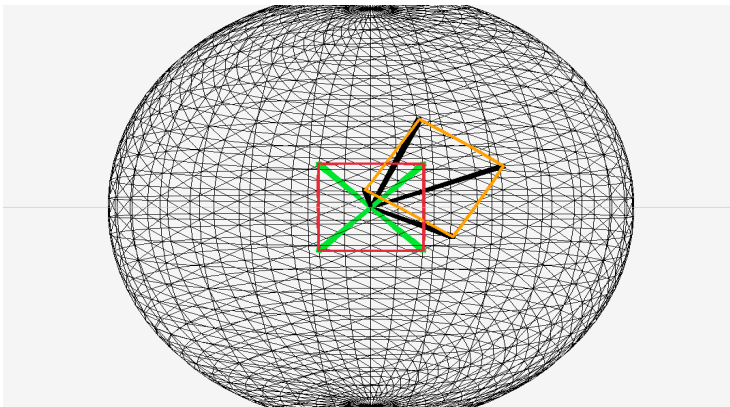


Рис. 6. Вікно *raylib*
Джерело: авторська розробка

Додатково перевірено модуль аналізу модуляційних патернів: система надійно розпізнавала цілі з попередньо заданими послідовностями та відокрем-

лювала їх від фонових джерел світла (таблиця 1). Продуктивність залишалася стабільною для різних роздільностей (1280×720, 640×480), забезпечуючи обробку ~90 кадрів/с у разі споживання менше ніж 2 ГБ пам'яті.

Таблиця 1

Приклад параметрів тестування для двох прямокутників

Параметр	Прямокутник 1	Прямокутник 2
Напрямок осі (x, y, z)	(0, 0, 2, 1)	(0, 0, 1)
Кут повороту (°)	58,5	0
Координати центра (пікселі)	(960, 540)	(960, 540)
Ширина × висота (пікселі)	200 × 200	200 × 200
Очікуваний результат	Виявлено перетин	Виявлено перетин

Експерименти підтвердили:

- інтеграцію IMU та узгодженість реальних і віртуальних орієнтацій;
- коректність алгоритму перетину прямокутників;
- високу точність розпізнавання модуляційних сигналів;
- здатність працювати в реальному часі на вбудованих платформах з обмеженими ресурсами.

Запропонована система є функціонально надійною та обчислювально ефективною. Вона забезпечує корекцію динамічних відхилень наведення лазерних проєкцій, що робить її придатною для практичного застосування в музейних і мультимедійних інсталяціях, де необхідна висока точність та стабільність візуальних ефектів.

Висновки. У роботі представлено підхід до корекції динамічних відхилень наведення лазерних проєкцій, орієнтований на застосування в музейних та мультимедійних інсталяціях. Запропонована система інтегрує аналіз зображень із CMOS-сенсорів та інерціальні вимірювальні модулі з кватерніонним представленням орієнтації, що дає змогу компенсувати вібрації та нестабільності в режимі реального часу.

Розроблена архітектура модульна: пошукач виявляє яскраві зони та формує кандидатів лазерних плям, тоді як зіставник здійснює їх проєкцію в тривимірний простір, аналізує модуляційні патерни та визначає кінцеве положення цілі. Інтеграція даних від IMU забезпечує узгодженість відстеження незалежно від змін орієнтації пристрою. Експериментальні результати підтвердили:

- коректність інтеграції IMU та відповідність реальних і віртуальних орієнтацій;
- точність алгоритму визначення перетину спроектованих прямокутників;
- надійність розпізнавання модульованих сигналів серед фонових джерел;

– здатність системи функціонувати в реальному часі на вбудованих платформах з обмеженими ресурсами.

Отже, запропоноване рішення поєднує функціональну надійність і обчислювальну ефективність, що робить його придатним для практичного використання в культурних і мультимедійних просторах. Система забезпечує високу точність та стабільність лазерних проєкцій, знижуючи потребу в дорогих оптико-механічних модулях і відкриваючи можливість масштабованого впровадження в інтерактивних інсталяціях.

REFERENCES

- Biglari, A. and Wei, T., 2023. A Review of Embedded Machine Learning Based on Hardware, Application, and Sensing Scheme. *Sensors*, [e-journal] 23 (4), 2131. <https://doi.org/10.3390/s23042131>
- Cao, J., Chen, Y., Yu, D., Xu, Z., Hu, X., Liang, Y., Pan, S. and Wu, D., 2023. Real-time laser spot detection and tracking system based on parallel multi-target detection and determination algorithm. *Review of Scientific Instruments*, [e-journal] 94, 095007. <https://doi.org/10.1063/5.0157141>
- Li, Q., Xu, S., Yu, J., Yan, L. and Huang, Y., 2019. An Improved Method for the Position Detection of a Quadrant Detector for Free Space Optical Communication. *Sensors*, [e-journal] 19 (1), 175. <https://doi.org/10.3390/s19010175>
- Liu, Z., Gao, S., Wu, J., Chen, Y., Ma, L., Yu, X., Wang, X. and Li, R., 2024. Research on the NI-MLA Method for Enhancing the Spot Position Detection Accuracy of Quadrant Detectors Under Atmospheric Turbulence. *Sensors*, [e-journal] 24 (20), 6684. <https://doi.org/10.3390/s24206684>
- Mohammadnejad, S. and Aasi, M., 2023. Analysis of structures and technologies of various types of photodetectors used in laser warning systems: a review. *Optical Engineering*, [e-journal] 62 (9), 090901. <https://doi.org/10.1117/1.OE.62.9.090901>
- Popereshnyak, S., Skoryk, R., Kuptsov, D. and Kravchenko, R., 2024. Software tool for recognition of human face in video stream. In: *Proceedings of the 14th International Scientific and Practical Programming Conference (UkrPROG 2024)*, Kyiv, Ukraine, May 14-15, 2024, Kyiv, Ukraine, May 14-15, 2024. Kyiv: CEUR Workshop Proceedings, 3806, pp.325-336. Available at: <http://ceur-ws.org/Vol-3806/S_57_Popereshnyak_Skoryk_Kuptsov_Kravchenko.pdf> [Accessed 10 August 2025].
- Sukhavasi, S.B., Sukhavasi, S.B., Elleithy, K., Abuzneid, S. and Elleithy, A., 2021. CMOS Image Sensors in Surveillance System Applications. *Sensors*, [e-journal] 21 (2), 488. <https://doi.org/10.3390/s21020488>
- Yuan, K. and Li, L., 2025. Application and algorithm design of multi-channel sensor fusion technology for laser spot detection. *Journal of Combinatorial Mathematics*

and *Combinatorial Computing*, [e-journal] 127b, pp.893–909.
<https://doi.org/10.61091/jcmcc127b-050>

UDC 004.932.1:[069:004.032.6]:004.42

Svitlana Popereshniak,

*PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Informatics
and Software Engineering,
National Technical University of Ukraine
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute",
Kyiv, Ukraine,
spopereshnyak@gmail.com
<http://orcid.org/0000-0002-0531-9809>*

Serhii Panchenko,

*Master's Student,
Department of Informatics and Software Engineering,
National Technical University of Ukraine
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute",
Kyiv, Ukraine,
panchenko.serhii@iit.kpi.ua
<http://orcid.org/0009-0000-8897-8182>*

CORRECTION OF DYNAMIC GUIDANCE DEVIATIONS IN LASER PROJECTIONS FOR MUSEUM AND MULTIMEDIA INSTALLATIONS

Ensuring the accuracy of laser beam guidance is a key condition for the quality of modern museum and multimedia installations. Even minor dynamic deviations caused by vibrations or thermal deformations lead to a loss of projection clarity and a decrease in the immersion effect.

The purpose of the article is to develop and test an embedded software system to compensate for dynamic errors in laser projection guidance in real time for museum and multimedia installations.

The research methodology is mathematical modelling of dynamic deviations, computer vision algorithms for detecting and tracking laser marks, sensor fusion of data from inertial measurement units (IMUs), as well as modular software implementation on single-board computers running Linux. The work uses system analysis to evaluate existing approaches, experimental testing to verify the performance of algorithms, and comparative tests with classical stabilisation methods.

The novelty of the research lies in the creation of an affordable and resource-saving system that combines CMOS sensors, light spot detection algorithms and quaternion integration of IMU data. Such an architecture enables the processing of streaming video at a frequency of approximately 90 frames/s, with low hardware requirements, allowing for the

high-quality compensation of errors without the need for expensive opto-mechanical equipment.

The conclusion of the research. The article identifies the main problems of dynamic stabilisation of laser projections, analyses modern hardware and software solutions, and develops and tests the author's built-in correction system. The results obtained confirm that the proposed approach enables the enhancement of accuracy and stability in projections for museum and multimedia applications, offering a combination of cost-effectiveness, scalability, and technical reliability.

Keywords: laser projections; dynamic deviations; computer vision; embedded systems; museum and multimedia installations; real-time stabilisation.

Надійшла 29.08.2025

Прийнята 06.10.2025

Стаття була вперше опублікована онлайн 29.12.2025



This is an open access journal, and all published articles are licensed under a Creative Commons Attribution 4.0.