

УДК 004.896; 629.89; 681.5

А. Г. Ткачук¹, к.т.н., О. М. Безвесільна², д.т.н., О. О. Добржанський¹, к.т.н.¹Державний університет «Житомирська політехніка», м. Житомир²Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», м. Київ**АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА З АВТОНОМНОЮ СТАБІЛІЗАЦІЄЮ НА БАЗІ
МОБІЛЬНОЇ ПЛАТФОРМИ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ТЕПЛОВИХ ПОКАЗНИКІВ ОБ'ЄКТІВ**

У статті розглянуто нову автоматизовану систему з автономною стабілізацією на базі мобільної платформи для вимірювання теплових показників об'єктів. Приведено розроблену 3D модель мобільної платформи та встановленої на неї автоматизованої системи. Зосереджено увагу на виборі оптичних пристроїв для вимірювання теплових показників об'єктів, а саме, камері нічного бачення та тепловізійній камері. Приведено опис роботи камери день-ніч та проаналізовано галузі її застосування. Описано фізичний принцип роботи тепловізійних камер та галузі їх використання. Проаналізовано можливі похибки оптичних пристроїв: похибка калібрування, похибка зчитування, похибка від затримки відеозображення, інші інструментальні похибки. Проведено експериментальні дослідження автоматизованої системи для вимірювання теплових показників об'єктів з автономною стабілізацією на базі мобільної платформи.

Ключові слова: робототехніка, оптичні датчики, тепловізор, мобільна платформа, стабілізація, точність, вимірювання.

А. Н. Tkachuk, PhD, О. М. Bezvesilna, DSc, О. О. Dobrzhanskyi, PhD

**AUTOMATED SYSTEM BASED ON A MOBILE PLATFORM WITH AUTONOMOUS
STABILIZATION FOR MEASURING THERMAL INDICATORS OF OBJECTS**

Mobile robotic platforms are autonomous devices consisting of mechanical, electrical and electronic components that allow them to move on land, water or in the air. These platforms can be used in a variety of industries, including medicine, industry, research and intelligence, and military applications.

The article deals with a new automated system with autonomous stabilization based on a mobile platform for measuring the thermal indicators of objects. The developed 3D model of a mobile robotic platform for measuring the thermal performance of objects with an autonomous stabilization system is presented. Attention is focused on the choice of optical devices for measuring the thermal performance of objects, namely, a night vision camera and a thermal imaging camera. A description of the day-night camera operation is given, and its application areas are analyzed. The physical principle of operation of thermal imaging cameras and their applications are described. It is established that the image quality varies depending on whether the thermal imager is active or passive. The TELEDYNE FLIR TAU 2 thermal imaging camera was chosen for the new mobile platform, which uses infrared imaging technology to detect the thermal signatures of objects. Possible errors of optical devices were analyzed: calibration error, reading error, video image delay error, other instrumental errors (from the influence of temperature, lighting, orientation in space, noise, etc.). Experimental studies of the developed mobile robotic platform for measuring the thermal performance of objects with an autonomous stabilization system were carried out, having previously calibrated it, and their results are presented. It is determined to measure the surface temperature of an object using a thermal imaging camera; it is necessary to know its emission, which is determined by the properties of the material from which the object is made. This can be done using a calibrated infrared source, making it possible to measure the temperature of objects in the image accurately.

Keywords: robotics, optical sensors, thermal imaging camera, mobile platform, stabilization, accuracy, measurement.

DOI 10.32684/2412-5288-2023-1-22-36-44

Вступ

Мобільні роботизовані платформи – це автономні пристрої, що складаються з механічних, електричних та електронних компонентів, які дозволяють їм переміщуватись по землі, поверхні води або в повітрі. Ці платформи можуть бути використані в різноманітних галузях, включаючи медицину, промисловість, дослідження і розвідку, а також військові застосування. Наприклад, мобільні роботизовані платформи можуть використовуватись у виробничому середовищі для автоматизації процесів та зниження витрат на оплату праці. У медицині вони можуть бути використані для транспортування медичних інструментів та обладнання або для надання допомоги хворим. У дослідницькій сфері вони можуть використовуватись для дослідження складних середовищ, наприклад, для дослідження морського дна чи космосу.

Оскільки мобільні роботизовані платформи можуть працювати автономно, вони забезпечують високу ефективність та точність роботи, а також знижують ризик людських помилок та нещасних випадків на робочому місці. Вони також можуть бути дистанційно керовані, що дозволяє їх використовувати в умовах, коли пряма людська присутність небезпечна або неможлива.

Мобільні роботизовані платформи широко застосовуються в розвідці, оскільки вони можуть допомогти збирати інформацію з небезпечних та важкодоступних місць, а також зменшити ризик для життя людей, що займаються розвідкою. В основному в розвідці використовуються безпілотні літальні апарати (БПЛА) та колісні або гусеничні наземні роботизовані платформи. Ці платформи зазвичай складаються з базової колесної або гусеничної платформи, на якій розміщені різні сенсори, виконавчі механізми та системи керування. Вони можуть бути обладнані камерами, лазерними сканерами, радарми, мікрофонами та іншими сенсорами, що дозволяють їм збирати інформацію про оточуюче середовище.

Важлива відмінна якість гусеничних мобільних роботів полягає в їх маневровості. Володіючи незалежним приводом для кожної з гусениць, мобільний робот може легко змінювати напрямок власного руху. Завдяки тому, що швидкість кожної з гусениць регулюється окремо, досить легко управляти рухом мобільного робота. Для завдання будь-якого напрямку руху необхідно змінити відносну швидкість приводів. Гусеничні роботи є найбільш ефективними внаслідок більш високих

можливостей з подолання перешкод.

Вимірювання теплових показників об'єктів може проводитися за допомогою тепловізійних камер, термометрів та інших приладів, які вимірюють температуру поверхонь об'єктів.

Один з найбільш поширених методів вимірювання теплових показників – це застосування інфрачервоного зображення. Такі зображення створюються за допомогою тепловізійної камери, яка реєструє інфрачервоне випромінювання з поверхні об'єктів. За допомогою цієї камери можна отримати детальне зображення теплових показників об'єктів, таких як температура поверхні, тепловий потік, термічні втрати тощо. Тепловізійні камери можуть бути портативними або встановленими на різних платформах, таких як дрони або роботи.

Вимірювання теплових показників об'єктів має важливе значення в багатьох галузях, включаючи промисловість, будівництво, медицину, безпеку, науку та інші. Ці дані можуть допомогти відслідковувати стан обладнання, контролювати температуру в різних процесах, виявляти небезпечні ситуації та забезпечувати безпеку.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У роботі [1] розглянуто застосування тепловізійних камер в різних галузях та описуються переваги використання цих приладів.

Статті [2-3] надають загальну інформацію про тепловізійні камери, включаючи те, як вони працюють та чому вони важливі в різних сферах.

У статтях [4-5] приведено основні технічні характеристики, які слід враховувати при виборі тепловізійної камери під конкретний тип задач дослідження.

У роботах [6-7] приведено загальний огляд мобільних роботів, їхніх типів та застосувань в різних сферах, включаючи промисловість, медицину та науку.

Метою статті є дослідження мобільної роботизованої платформи для вимірювання теплових показників об'єктів з автономною системою стабілізації.

Проектування мобільної платформи з автономною стабілізацією

Науковцями Державного університету «Житомирська політехніка» розроблено мобільну роботизовану платформу з автономною системою стабілізації для вимірювання теплових показників об'єктів (рис. 1-2) [8-9].

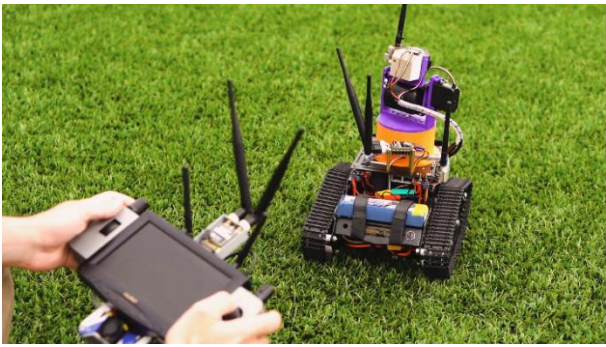


Рисунок 1 – Мобільна платформа з автономною системою стабілізації для вимірювання теплових показників об'єктів



Рисунок 2 – 3D модель мобільної платформи з автономною стабілізацією для вимірювання теплових показників об'єктів

Мобільна роботизована платформа побудована на базі малошумного гусеничного шасі. Гусениці платформи зроблені з інженерного пластика, який забезпечує еластичність, демпфуючий ефект і зчеплення шасі з дорогою. На шасі розміщені аналогова камера нічного бачення та тепловізор. Обидва оптичні сенсори закріплені на спеціалізованій рухомій башті з власною системою стабілізації.

Камера нічного бачення використовується для керування рухом мобільної платформи, а тепловізор – для вимірювання теплових показників об'єктів.

Для спрощення процесу конструювання та виготовлення прототипу було вирішено використати технологію 3D друку. Такий метод проектування потребує значно менших витрат часу та коштів у порівнянні з іншими методами. Найбільш зручним матеріалом для 3D друку є PLA пластик, він виділяється міцністю,

порівняно низькою температурою плавлення і малою токсичністю.

Камера нічного бачення

У процесі вибору камери для слабкого освітлення або камери з нічним баченням необхідно мати розуміння різних методів, які роблять можливим відеозапис при слабкому освітленні та в темряві.

Поняття спостереження при слабкому освітленні, зазвичай, відноситься до камер здатних отримувати зображення задовільної якості при поганому освітленні, без необхідності використання додаткових джерел світла. Фактори, що впливають на ефективність роботи, містять комбінований вплив датчиків, блоку обробки зображень, ISP/DSP і оптики об'єктива, налаштування камери нічного бачення.

У камерах з низькою освітленістю і високою чутливістю, також відомим як повнокольоровий режим слабкого освітлення, використовуються датчики Super HAD, Ex-view/EXTRA-View CCD або CMOS-сенсори з заднім підсвічуванням.

Ці датчики добре працюють в умовах низького освітлення з хорошою видимістю та реакцією у ближньому ІЧ-діапазоні. Камери, що використовують цю технологію, зазвичай добре працюють у різних погодних умовах і функціонують як денні/нічні камери, оскільки вони здатні відтворювати кольорові зображення як вдень, так і в умовах низького освітлення. Низька освітленість може досягати 0,1 люкс у кольоровому режимі та 0,01 люкс у чорно-білому режимі. ІЧ-підсвічування у ближньому ІЧ-діапазоні можна використовувати за умов освітленості 0 люкс, але це, як правило, не вказано у специфікаціях для слабкого освітлення та кольорового режиму.

У більшості камер цього типу використовується технологія Ex-view-HAD, що працює в умовах освітленості від 0,01 до 0,001 люкс. Такі камери не тільки здатні знімати чіткі зображення, але також можуть обмежувати рівень шуму на кольорових зображеннях, знятих за умов низького освітлення, без необхідності зменшувати швидкість затвора або збільшувати діаметр діафрагми. Отже, вважається, що вони здатні забезпечувати спостереження за низької освітленості.

Камери з режимами день/ніч використовують механічні принципи перемикання між режимами. Такі пристрої бувають кольоровими та чорно-білими. Ці камери використовують ближній ІЧ-діапазон для отримання чорно-білих зображень, коли освітленість зменшується до певного рівня. Камера перемикається в інфрачервоний режим

або в чорно-білий режим після виявлення нижчих рівнів інфрачервоного випромінювання через інфрачервоний фільтр, і зображення перетворюються з кольорових в чорно-білі.

Однак при видаленні інфрачервоного фільтра під час перетворення фокус зображення зміщується. Отже, ІЧ-лінзи зазвичай використовуються для запобігання зміщенню фокусу або неточної передачі кольору, а також для забезпечення узгодженості зображень, знятих вдень і вночі. Недоліком цього є більш висока вартість ІЧ-об'єктивів. Іншими словами, вони можуть бути не ідеальним вибором для умов з низькою освітленістю.

Крім денних/нічних камер, ІЧ-камери є одним з кращих рішень для умов низького освітлення. ІЧ-підсвічування може бути додатковим модулем до камери, або бути вбудованим в корпус камери. Оскільки датчики CCD і CMOS вже мають високу світлочутливість і здатні захоплювати більшу частину видимого світла та ІЧ-спектру, ІЧ-підсвічування покращує отримуване зображення в умовах поганого освітлення, що дозволяє датчикам відтворювати більш чіткі зображення.

Більш чіткі зображення також виходять у темних умовах, оскільки світлочутливість у Ч/Б режимі вище, ніж у кольоровому режимі.

ІЧ-підсвічування дозволяє встановлювати системи спостереження за умов 0 люкс. Функція автоматичного виявлення світла також дозволяє використовувати це рішення із чорно-білими або денними/нічними камерами для розширення можливостей спостереження в умовах низького освітлення та нічного бачення.

Ще один спосіб запису при слабкому освітленні – уповільнення швидкості електронного затвора камери. Це дозволяє продовжувати вплив світла на матрицю для більш яскравих зображень. Режим накопичення кадрів використовує цифрову технологію повільного затвора для електронного накопичення кадрів, знятих при недостатньому освітленні, для створення чіткішого зображення. Наприклад, при значенні діафрагми від 1,2 до 1,4 в умовах слабого освітлення можна отримати достатньо кадрів, щоб досягти освітленості 0,001 люкс. Це простий, але надійний спосіб досягти результатів в умовах низького освітлення. Проте зображення можуть бути із затримкою або виглядати розмитими, тому технологію цифрового повільного затвора (DSS) найкраще використовувати в умовах низького освітлення з фіксованими камерами, в умовах із мінімальними змінами освітлення та мінімальним рухом, а також там, де

використання ІЧ або допоміжного освітлення неможливе.

Одним із важливих параметрів, на який варто звернути увагу є апертура камери. Розмір апертури визначає кількість світла, яке може пройти через об'єктив та досягти датчика зображення. Велика апертура забезпечує більшу експозицію, а менша – меншу. Також варто звернути увагу на об'єктив, оскільки фокусна відстань та розмір діафрагми зворотно пропорційні. Наприклад, об'єктиви 4 мм можуть забезпечити апертуру від $f1,2$ до $f1,4$, а об'єктиви 50-200 мм можуть забезпечити максимальну апертуру лише від $f1,8$ до $f2,2$. Отже, це впливає на експозицію світла і при спільному використанні з інфрачервоним фільтром може вплинути на точність кольору.



Рисунок 3 – Приклад використання кольорової камери відеоспостереження нічного бачення

Швидкість затвора також впливає на кількість світла, що потрапляє на сенсор. Швидкість затвора для нічного бачення слід підтримувати на рівні $1/30$ або $1/25$ для нічного спостереження. Повільніша швидкість призведе до розмитості і зробить зображення непридатним для використання. Об'єктиви з автоматичними режимами діафрагми можуть підлаштовуватися під різницю у освітленні вдень та вночі.

Чутливість камери відеоспостереження визначає найнижчий поріг умов освітлення, коли вона може записувати відеозображення прийнятної для перегляду якості. Виробники камер вказують найменшу діафрагму для різних апертур, що є мінімальною освітленістю або рівнем чутливості камери. Потенційна проблема може виникнути, якщо мінімальний показник освітленості камери вищий за спектр ІЧ-підсвічування. В цьому випадку буде порушена ефективна відстань, і результуюче зображення матиме яскравий центр, оточений темрявою.

Кількість світла, що отримується камерою, є ще одним фактором, який може сильно вплинути на дальність дії камери з режимом нічного бачення. Як правило, чим більше світла, тим

краще зображення. Це стає актуальнішим на великих відстанях. Для отримання зображення доброї якості потрібна достатня кількість вбудованих джерел інфрачервоного підсвічування.

Технологія нічного бачення. Ключовою відмінністю поколінь камер нічного бачення є технологія підсилювача. Пристрій Gen1 вперше був розроблений у В'єтнамі, і тепер він визнаний початковим рівнем приладів нічного бачення. Пристрої Gen1 використовують підсилювальну трубку, яка підсилює навколишнє світло шляхом прискорення електронів, які потрапляють на поверхню зеленого люмінофора (як телевизор). Gen1, який використовується в оптимальних умовах, забезпечує видимість 68,58 — 91,44 м. В пристрої Gen2 додано мікроканальну пластину, яка збільшує кількість електронів до того, як вони контактують з люмінофорним екраном (таким чином підвищуються чіткість, якість і яскравість). Пристрої Gen2 можуть випускатися у варіантах з білим або зеленим люмінофором. Білі люмінофори зазвичай працюють довше, оскільки вони забезпечують підвищену чіткість, а також меншу втоми очей. Пристрої Gen2 в оптичних умовах можуть мати видимість у 137,16 — 182,88. Збройні сили США наразі використовують Gen3, у який додано фотокатод із арсеніду галію, що створює значно більше фотоелектронів, ніж у пристрої Gen2, і є ефективнішим у посиленні існуючого світла чи ІЧ-освітлення. Зображення отримані у пристрої Gen3 значно яскравіші та мають кращу оптичну чіткість, ніж попередні покоління приладів, і за оптимальних умов забезпечують видимість до 320,04 — 365,76 м. Нарешті, цифрове нічне бачення було започатковане на початку 2000-х років. Воно працює за тим же принципом, що й режими NV в цифрових камерах. Digital NV використовує CCD (пристрої зарядженого зв'язку) для обробки світла перед надсиланням на дисплей. Завдяки використанню цієї технології, Digital NV не пошкоджується великою кількістю світла і може використовуватися як вночі, так і вдень.

Нічне бачення за слабого освітлення покладається на технологію посилення зображення (аналогову), щоб забезпечити отримання кольорового зображення нічного бачення в атмосфері дуже слабого освітлення. Коли навколишнє світло потрапляє на заряджену пластину фотокатода, електрони випромінюються через вакуумну трубку і потрапляють на пластину мікроканалів, змушуючи висвітлювати на екрані зображення у такому ж шаблоні, що й світло, яке потрапляє на

фотокатод, і в діапазоні частот, що є видимими для людського ока. Аналогові системи відображатимуть зображення або у відтінках зеленого, або як біло/чорне, залежно від використовуваного електронно-оптичного перетворювача ЕОП (зелений або білий фосфор). Оскільки ця технологія використовує оптичний перегляд, а не цифровий підсилювач, чіткість і роздільна здатність аналогових пристроїв зазвичай набагато вища, ніж цифрових. Слід звернути увагу на світлочутливу трубку, потрібен ІЧ-фільтр або додатковий запобіжний захід, щоб обмежити вплив світла протягом дня. Існує ймовірність пошкодження внутрішньої підсилюючої трубки під впливом надто великої кількості навколишнього видимого світла (сонячне світло, фари автомобіля, прожектори).

Основні похибки камери нічного бачення:

1. Обмежена дальність зору камери нічного бачення, що може призвести до недостатнього видимого поля або недостатньої роздільної здатності.

2. Помилки калібрування: неправильне калібрування камери може призвести до некоректного відображення об'єктів та їхньої положення в зображенні. Калібрування камери повинно бути проведено з використанням еталонних джерел світла.

3. Обмежені можливості розпізнавання: камери нічного бачення можуть мати обмежені можливості розпізнавання об'єктів, особливо за умов великої дальності спостереження або низької освітленості.

4. Вплив погодних умов: камери нічного бачення можуть бути чутливими до погодних умов, таких як дощ, туман, сніг, хмарність тощо, що можуть спотворювати зображення та знижувати їхню чіткість.

5. Перешкоди: перешкоди, такі як дерева, будівлі, автомобілі тощо, можуть заважати правильному відображенню об'єктів у камері нічного бачення та знижувати її ефективність.

У якості камери нічного бачення для спроектованої системи обрано камеру переднього огляду з діодним підсвічуванням (рис. 4). Камера має середні габарити, міцний корпус та багатофункціональне кріплення з комірцем. Діодне інфрачервоне підсвічування дозволяє освітлити область на відстані до 5 м.

Модель представлена з виходом під AV кабель.

Технічні характеристики:

- напруга живлення: DC 9V-35;
- датчик зображення: 1/3 "CMOS / CCD;
- система сканування: PAL/NTSC;
- ефективні пікселі: 648x488 пікселів;

- роздільна здатність TV сигналу: 480 TV-ліній;
 - відеовихід: cvbs 1.0VP.P.75ohm;
 - тип управління чутливістю: AGC (Automatic Gain Control) auto/n;
 - співвідношення сигнал/шум: краще 48 дБ;
 - електронний затвор: 1/60 ~ 1/100,0 с;
 - робоча температура: – 40 °С ~ 80 °С;
 - температура та вологість зберігання: – 40 °С ~ 105 °С, rh 95 %;
 - кут огляду: 120 просторових градусів.
- Виконання корпусу: всепогодне і водостійке виконання (IP 68/69).



Рисунок 4 – Камера нічного бачення

Тепловізор – це портативний або стаціонарний пристрій, здатний реєструвати тепловий розподіл температури об'єкта, що досліджується, в інфрачервоному діапазоні. Дані реєстрації прилад в режимі онлайн передає на дисплей, де оператор бачить у видимому спектрі даний розподіл. Зображення на екрані забарвлюється в різні кольори залежно від температурні ділянки об'єкта.

Області застосування приладу можуть бути різними:

1. насамперед для військових цілей, а також для охорони особливих територій та об'єктів;
2. будівництво, а також ефективна експлуатація будівель – визначення рівня тепловтрат;
3. медичне використання для діагностики деяких захворювань;
4. для швидкої діагностики та контролю справності роботи обладнання;
5. під час роботи рятувальних служб;
6. у промисловості та металургії;
7. для полювання, як прилади нічного бачення;
8. наука, зокрема, астрономія і астрофізика;
9. інші цілі.

Залежно від призначення такі прилади матимуть різну ціну та спеціалізацію. Матеріали, що в них використовуються, можуть відрізнятися, що впливає на чіткість зображення, точність роботи, дальність дії та вартість.

Якщо розглядати принцип роботи тепловізорів, то вони є реєстраторами інфрачервоного випромінювання. При цьому прилад має можливість перетворювати прийняте в ІЧ-діапазоні довжин хвиль зображення у видимий для людського ока спектр. Якщо температура на поверхні об'єкту має нерівномірний розподіл, різні ділянки на дисплеї будуть підсвічуватися різним кольором.

У загальному спрощеному випадку тепловізор складається з таких робочих частин:

1. вікно прийому ІЧ-випромінювання;
2. спеціальна лінза, чутлива до такого типу випромінювання;
3. датчик реєстратор чи сенсор;
4. контролер приладу;
5. дисплей для відображення отриманого результату сканування;
6. система керування пристроєм.

Всі об'єкти випромінюють інфрачервону енергію, відому як тепла сигнатура. Інфрачервона камера (також відома як тепловізор) виявляє та вимірює інфрачервону енергію об'єктів. Камера перетворює ці інфрачервоні дані в електронне зображення, яке показує вимірний розподіл температур на поверхні об'єкта.

Інфрачервона камера містить оптичну систему, що фокусує інфрачервону енергію на спеціальний чіп детектора (матрицю датчиків), який містить тисячі пікселів детектора, розташованих у сітці.

Кожен піксель матриці датчиків реагує на сфокусовану на ньому інфрачервону енергію та виробляє електронний сигнал. Процесор камери отримує сигнал від кожного пікселя та застосовує до нього математичні розрахунки, щоб створити колірну карту видимої температури об'єкта. Кожне значення температури позначається окремим кольором. Отримана матриця кольорів надсилається в пам'ять і на дисплей камери як зображення температури (теплове зображення) цього об'єкта.

Багато інфрачервоних камер також містять камеру видимого світла, яка автоматично фіксує стандартне цифрове зображення при необхідності. Змішуючи ці зображення, легше співвіднести проблемні зони на інфрачервоному зображенні з фактичним обладнанням або областю, що перевіряється.

Оскільки інфрачервона камера призначена для захоплення теплової енергії в навколишньому середовищі, її основні компоненти призначені для обробки інфрачервоного випромінювання. Особливо це стосується блоку введення. Мова йде про лінзи та датчики, канал, через який має проходити інфрачервоне випромінювання.

Хоча тепловізійні камери є важливими приладами для виявлення теплових випромінювань, які є невидимими для ока, але вони можуть вносити деякі помилки та мати недоліки. Основні похибки тепловізійних камер викликані наступними факторами:

1. Недостатня роздільна здатність: може призвести до помилкових відображень об'єктів на зображенні. Це особливо важливо для вимірювання температури на поверхні об'єкта.

2. Вплив зовнішніх факторів: тепловізійні камери можуть бути чутливими до зовнішніх факторів, таких як сонячна радіація, вітер, дощ, туман тощо. Ці фактори можуть спотворювати зображення і знижувати точність вимірювання температури.

3. Помилки калібрування: неправильне калібрування тепловізійної камери може призводити до похибок вимірювання температури. Калібрування повинно бути проведено з використанням еталонних джерел температури.

4. Нерівномірна чутливість по всьому зображенню: це може призводити до спотворень у відображенні температури та інші.

Тепловізійна камера TELEDYNE FLIR TAU 2

Тау 2 (рис. 5) є серією тепловізійних камер, вироблених компанією FLIR Systems. Ці камери використовують технологію відтворення інфрачервоних зображень для вимірювання теплових сигнатур об'єктів. З їх допомогою можна виявляти термічні витіки, проводити дослідження теплового випромінювання об'єктів, контролювати процеси нагріву та охолодження, а також виявляти різні небезпечні ситуації.

Тау 2 пропонується в різних моделях з різними роздільними здатностями і чутливостями. Вони можуть бути встановлені на різних платформах, таких як дрони, роботи, автомобілі тощо. Покращена електроніка забезпечує реалізацію потужних режимів обробки зображення, які значно покращують деталізацію та контрастність. Параметри камери включають повну радіометрію, підвищену чутливість (<30 мК) і частоту кадрів 640/60 Гц. Оскільки конфігурації Тау 2 640 і 336 мають спільні електричні функції, можна створити

загальні інтеграції, які бездоганно працюватимуть з обома форматами.



Рисунок 5 – Тепловізійна камера

Експеримент з використанням тепловізійної камери TELEDYNE FLIR TAU 2 може включати в себе різноманітні завдання, пов'язані з вимірюванням теплових показників об'єктів та аналізом зображень, отриманих з камери.

Одним з можливих експериментів є вимірювання температури поверхонь різних матеріалів з використанням тепловізійної камери, що було виконано за допомогою розробленої системи (рис. 6). Для цього можна використовувати каліброване інфрачервоне джерело, щоб точно виміряти температуру об'єктів на зображенні.

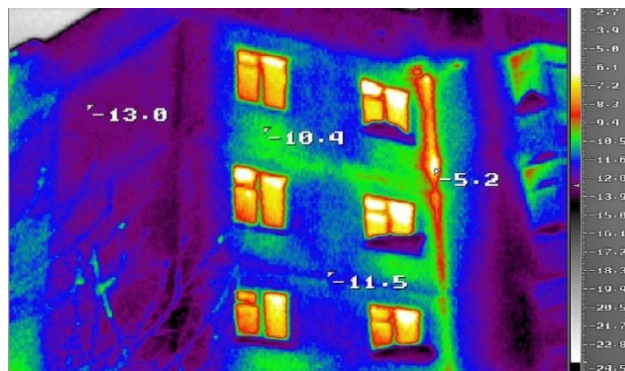


Рисунок 6 – Експериментальні дослідження тепловізійної камери Тау 2

Іншим експериментом може бути аналіз динаміки теплових процесів на поверхнях об'єктів. Наприклад, тепловізійна камера може використовуватися для визначення ступеня теплового випромінювання елементів космічного апарату або дослідних зразків, які перебувають в умовах вакууму.

Також можна провести експерименти з використанням тепловізійної камери для дослідження теплового випромінювання людського тіла та його змін при фізичних

навантаженнях.

Усі ці експерименти можуть бути корисні для науково-дослідних робіт, а також для різних галузей промисловості, включаючи автомобільну, авіаційну та космічну промисловість, медицину, будівництво та енергетику.

Зображення об'єкта, отримане з тепловізійної камери, містить різні кольори, які відповідають різним температурам поверхні об'єкта. Для вимірювання температури поверхні об'єкта з використанням тепловізійної камери потрібно знати його емісію, яка визначається властивостями матеріалу, з якого виготовлений сам об'єкт. Це можна зробити з використанням каліброваного інфрачервоного джерела, що дає змогу точно вимірювати температуру об'єктів на зображенні.

Подібний експеримент з вимірювання температури поверхні об'єктів з використанням тепловізійної камери та його результати можуть бути корисними в різних галузях, таких як медицина, будівництво, енергетика, автомобільна і космічна промисловість тощо.

Висновки

Досліджено автоматизовану систему з автономною стабілізацією на базі мобільної платформи для вимірювання теплових показників об'єктів. Розроблену 3D модель мобільної платформи для вимірювання теплових показників об'єктів з автономною системою стабілізації. Здійснено вибір оптичних пристроїв для вимірювання теплових показників об'єктів, а саме, камеру нічного бачення для керування рухом платформи та тепловізійну камеру для безпосереднього вимірювання теплових показників об'єктів. Приведено опис роботи камери день-ніч та проаналізовано галузі її застосування. Описано фізичний принцип роботи тепловізійних камер та галузі їх використання. Показано, що якість зображення змінюється залежно від того активний чи пасивний тепловізор. Проведено експериментальні дослідження розробленої мобільної роботизованої платформи для вимірювання теплових показників об'єктів з автономною системою стабілізації та наведено їх результати.

Список використаних джерел

1. Аналіз розвитку та застосування тепловізорів. URL: <http://surl.li/ghwrb>.
2. Неня О. В. Відмінності й особливості пристроїв нічного бачення та тепловізорів. *Сучасна спеціальна техніка*. 2017. № 3(50). С. 75-86. URL: <http://surl.li/ghwqf>.

3. How Thermal Cameras Work and Why They're So Important. Advantages. URL: <http://surl.li/ghwqk>.

4. Неня О. В. Сучасні тепловізори для спеціального та повсякденного застосування. *Сучасна спеціальна техніка*. 2016. № 4(47). С. 108-120. URL: <http://surl.li/tgop>.

5. На що звернути увагу під час вибору тепловізора. URL: <https://gre4ka.info/zhyttia/69389-na-sho-zvernuti-uvagu-pid-chas-viboru-teplovizora>.

6. Francisco, R., Francisco, V., Carlos, L. (2019, March-April). A review of mobile robots: Concepts, methods, theoretical framework, and applications. *International Journal of Advanced Robotic Systems*. 16(2), 1-22. URL: <http://surl.li/ghwri>.
<https://doi.org/10.1177/1729881419839596>.

7. Mobile Robotics: A Brief Overview. URL: <http://surl.li/ghwqz>.

8. Ткачук А. Г., Добржанський О. О., Богдановський М. В., Кравчук А. Р. Проектування інформаційно-вимірювальної системи для моніторингу наявності шкідливих та вибухонебезпечних газів на базі роботизованої гусеничної платформи. *Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2022. Т. 33(72), № 2. С. 108-113.

9. Ткачук А. Г. Градувальна характеристика чутливого елемента системи стабілізації оптичних пристроїв на базі роботизованої платформи. *Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2022. Т. 33(72), № 5. С. 159-163.

10. Mohd, J. H., Mohd, M. (2017). Night Vision Technology: An Overview. *International Journal of Computer Applications*, 167(13), 37-42. <https://doi.org/10.5120/ijca2017914562>.

11. New Aerial Solar Farm Inspection Takes Off for Wesii. URL: <http://surl.li/ghwqs>.

12. High Performance, Reliable LWIR Thermal Imaging with Teledyne FLIR Tau 2 Series. URL: <https://www.flir.com/oem/tau-series/>.

13. Teledyne FLIR Releases Tau2+ Longwave Infrared Thermal Camera Module with Enhanced Performance and Increased Sensitivity. URL: <http://surl.li/ghwqx>.

14. High Performance, Reliable LWIR Thermal Imaging with Teledyne FLIR Tau 2 Series. Indian Defence Review. URL: <http://surl.li/ghwpy>.

15. Rupesh, P. R., Swapnil, S. R., Manisha, P. W. (2013). Night Vision Techniques and Their Applications. *International Journal of Modern Engineering Research*. 3(2), 816-820. URL: <http://surl.li/ghwoy>.

References

1. Analiz rozvytku ta zastosuvannia teplovizoriv [Analysis of the development and application of thermal imagers]. URL: <http://surl.li/ghwrb>.
2. Nenia, O. V. Vidminnosti y osoblyvosti prystroiv nichnoho bachennia ta teplovizoriv [Differences and features of night vision devices and thermal imagers]. *Suchasna spetsialna tekhnika – Modern special equipment*. 2017. # 3(50). P. 75-86. URL: <http://surl.li/ghwqf>.
3. How Thermal Cameras Work and Why They're So Important. Advantages. URL: <http://surl.li/ghwqk>.
4. Nenia, O. V. Suchasni teplovizory dlia spetsialnoho ta povsiakdennoho zastosuvannia [Modern thermal imaging cameras for special and everyday use]. *Suchasna spetsialna tekhnika – Modern special equipment*. 2016. # 4(47). P. 108-120. URL: <http://surl.li/tgop>.
5. Na shcho zvernuty uvahu pid chas vyboru teplovizora [What to pay attention to when choosing a thermal imager]. URL: <https://gre4ka.info/zhyttia/69389-na-sho-zvernuti-uvagu-pid-chas-vyboru-teplovizora>.
6. Francisco, R., Francisco, V., Carlos, L. (2019, March-April). A review of mobile robots: Concepts, methods, theoretical framework, and applications. *International Journal of Advanced Robotic Systems*. 16(2), 1-22. URL: <http://surl.li/ghwri>. <https://doi.org/10.1177/1729881419839596>.
7. Mobile Robotics: A Brief Overview. URL: <http://surl.li/ghwqz>.
8. Tkachuk A. H., Dobrzhanskyi O. O., Bohdanovskyi M. V., Kravchuk A. R. Proektuvannia informatsiino-vymiriuvalnoi systemy dlia monitorynhu naiavnosti shkidlyvykh ta vybukhonebezpechnykh haziv na bazi robotyzovanoi husenychnoi platformy [Designing an information and measuring system for monitoring the presence of harmful and explosive gases based on a robotic tracked platform]. *Vcheni zapysky TNU imeni V. I. Vernadskoho. Seriya: Tekhnichni nauky. Scientific Notes of V. I. Vernadsky Taurida National University. Series: Technical sciences*. 2022. Vol. 33(72), # 2. P. 108-113.
9. Tkachuk A. H. Hraduiuvalna kharakterystyka chutlyvoho elementa systemy stabilizatsii optychnykh prystroiv na bazi robotyzovanoi platformy [Graduation characteristic of the sensing element of the optical device stabilisation system based on a robotic platform]. *Vcheni zapysky TNU imeni V. I. Vernadskoho. Seriya: Tekhnichni nauky. Scientific Notes of V. I. Vernadsky Taurida National University. Series: Technical sciences*. 2022. Vol. 33(72), # 5. P. 150-163.
10. Mohd, J. H., Mohd, M. (2017). Night Vision Technology: An Overview. *International Journal of Computer Applications*, 167(13), 37-42. <http://doi.org/10.5120/ijca2017914562>.
11. New Aerial Solar Farm Inspection Takes Off for Wesii. URL: <http://surl.li/ghwqs>.
12. High Performance, Reliable LWIR Thermal Imaging with Teledyne FLIR Tau 2 Series. URL: <https://www.flir.com/oem/tau-series/>.
13. Teledyne FLIR Releases Tau2+ Longwave Infrared Thermal Camera Module with Enhanced Performance and Increased Sensitivity. URL: <http://surl.li/ghwqx>.
14. High Performance, Reliable LWIR Thermal Imaging with Teledyne FLIR Tau 2 Series. Indian Defence Review. URL: <http://surl.li/ghwpy>.
15. Rupesh, P. R., Swapnil, S. R., Manisha, P. W. (2013). Night Vision Techniques and Their Applications. *International Journal of Modern Engineering Research*. 3(2), 816-820. URL: <http://surl.li/ghwoy>.

Надійшла до редакції: 07.05.2023