

Олександр Белей¹, Олексій Джусь², Михайло Лобур³, Данило Голованчук⁴

¹ Кафедра систем автоматизованого проектування, Національний університет “Львівська політехніка”, вул. С. Бандери, 12, Львів, Україна, E-mail: oleksandr.i.belei@lpnu.ua, ORCID 0000-0003-4150-7425

² Кафедра систем автоматизованого проектування, Національний університет “Львівська політехніка”, вул. С. Бандери, 12, Львів, Україна, E-mail: oleksii.p.dzhus@lpnu.ua, ORCID <https://orcid.org/0009-0004-0030-6162>

³ Кафедра систем автоматизованого проектування, Національний університет “Львівська політехніка”, вул. С. Бандери, 12, Львів, Україна, E-mail: mykhaylo.v.lobur@lpnu.ua, ORCID 0000-0001-7516-1093

⁴ Кафедра систем автоматизованого проектування, Національний університет “Львівська політехніка”, вул. С. Бандери, 12, Львів, Україна, E-mail: danylo.holovanchuk.mknit.2024@lpnu.ua, ORCID 0009-0007-1825-7022

УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ ПОЗИЦІЮВАННЯ РОБОТИЗОВАНИХ ПРИСТРОЇВ НА ОСНОВІ АЛГОРИТМУ КОЛЬОРОВИХ МАЯКІВ

Отримано: Серпень 12, 2025 / Переглянуто: Серпень 25, 2025/ Прийнято: Вересень 15, 2025

© Белей О., Джусь О., Лобур М., Голованчук Д., 2025

<https://doi.org/10.23939/cds2025.02.014>

Анотація. Сьогодні розроблення систем позиціонування у приміщеннях є перспективним та актуальним, але складним завданням. Це потребує створення карт на основі планів поверхів, вибору ефективних алгоритмів локації та створення відповідної інфраструктури будівель для надійного визначення місцезнаходження. Під час дослідження розглянуто відомі системи позиціонування, що використовують радіоканали для навігації в приміщеннях на основі інфрачервоних та ультразвукових маяків. Встановлено, що використання радіоканалу в приміщенні є проблематичним через перешкоди та відбиття сигналів, що впливають на точність. Аналіз показав, що найнадійнішим каналом для використання в приміщенні є канал у видимому діапазоні електромагнітного спектра. Такі системи працюють із використанням відеокамер. Розглянуто системи, які відомі з відкритих джерел та використовують відеокамери і системи машинного зору. Основною проблемою наявних технологій позиціонування у приміщеннях на основі прикладних систем відеоспостереження є їх зв'язок з робочим фоном, таким як інтер'єр, або вимога однорідного фону для використання кольорових маяків. На основі аналізу запропоновано використання кольорових маяків як опорних точок та систему відеовимірювання для розрахунку відстаней до цих точок та навігації в приміщенні. Використовувати кольорові маяки запропоновано на підставі гіпотези, що вони можуть працювати в умовах неоднорідного фону, на відміну від наявних систем. Для підтвердження цих припущень виконано відповідні дослідження. Розроблено алгоритм розпізнавання кольорових маяків на вхідному відеозображенні, отриманому із відеокамери цифрового опрацювання зображень. Алгоритм ґрунтується на побудові “кольорової маски” із використанням гладкої неперервної логістичної сигмоподібної кривої та функції Гауса для вилучення колірної характеристики світлового сигналу. Розроблено алгоритм визначення координат точки розпізнавання маркера на основі розпізнаних кольорових маяків у кадрах вхідного відеозображення. Для визначення координат мобільної роботизованої системи на відео зображенні виконують вимірювання, визначаючи відносні координати маяків у системі координат камери. Формують відносну карту, яка перетворюється на абсолютні координати відеокамери у світовій системі координат за допомогою тривимірного перетворення. Це стає можливим завдяки заздалегідь визначеним абсолютним координатам кольорових маяків. Визначено параметри фільтрації для алгоритму

розпізнавання кольорових маяків, що дає змогу алгоритму підтримувати продуктивність в умовах неоднорідного фону. Використовуються такі параметри: дисперсія кривої Гауса для фільтрації відтінків, крива та логістичний зсув порога сигмоподібної кривої для насичення кольорів; логістична сигмоподібна крива та зсув порога яскравості. Ці параметри дають змогу класифікувати пікселі вхідного зображення за кольором, тим самим ідентифікуючи лише ті області, які відповідають значенням кольору відповідних частин маяка за змінних умов освітлення.

Ключові слова: місцезнаходження, кольорові маяки, сигмоподібна крива, цифрова обробка зображень, системи машинного зору, системи відеоспостережень.

Вступ

Розроблення систем позиціонування у приміщеннях з прийнятною точністю може значно просунути наявні технології та вирішити такі проблеми, як навігація у приміщеннях, надання користувачам контекстної інформації в текстовому, аудіо- або відеоформаті, автоматизація роботи та заміна людських ресурсів автономними мобільними платформами для виконання простих або небезпечних для життя завдань у приміщеннях. Наприклад, це може передбачати автоматизацію складських терміналів під час переміщення необхідних товарів з одного складу на інший. Отже, ця галузь науки і техніки пропонує великий потенціал для створення та розвитку систем позиціонування у приміщеннях.

Для вирішення проблем позиціонування у приміщеннях розроблено чимало систем, які працюють за різними принципами та використовують різні типи опорних точок. Позиціонування за допомогою точок доступу Wi-Fi та Bluetooth-маяків забезпечує високу точність визначення місцезнаходження об'єктів у приміщенні завдяки їх високій сприйнятливості до різних радіоперешкод від зовнішніх джерел, перешкод та перекриття сигналів.

Інформація про місцезнаходження використовується для вирішення як суто наукових та промислових завдань, так і повсякденних: пересічній людині вона допомагає орієнтуватися на місцевості, знаходити цікаві місця та планувати маршрути; для географа важливий зв'язок між об'єктом дослідження та його розташуванням у часі та просторі; Координовані дані є основою для побудови просторових моделей у геоінформаційних системах та використовуються для індексації даних у пошукових системах [1].

Протягом тисячоліть розроблено багато методів та технік позиціонування. Однак революція в позиціонуванні відбулася із появою глобальних навігаційних супутникових систем. Цьому сприяло глобальне покриття, висока точність та ефективність супутникового позиціонування [2]. Сьогодні спостерігається тенденція до збільшення кількості споживачів таких технологій через розширення ринку мобільних пристроїв. Наявність портативних приймачів у смартфонах привела не лише до широкого використання просторових додатків на основі даних, але й до створення вторинних продуктів: явище “краудсорсингу” відкрило нові можливості для картографування. Хоча геодезичні супутники охоплюють всю поверхню Землі, приймачі GNSS неможливо використовувати скрізь. Їх застосування в приміщенні обмежене через ослаблення сигналу через землю, стіни, воду та інші перешкоди. Хоча методи, основані на використанні ретрансляторів супутникового сигналу, існують, вони навряд чи забезпечать рішення через вартість встановлення дорогого обладнання та низьку точність позиціонування [3]. Тому необхідні альтернативні рішення для використання в приміщенні.

Приміщення є одним із прикладів обмежених просторів, у яких люди перебувають більшу частину свого часу, що зумовило інтерес до систем позиціонування. Такі системи застосовують у класичній навігації, картографії, розміщенні контекстної інформації, рекламі тощо, а також у специфічних сферах застосування, таких як безпека будівель, реагування на надзвичайні ситуації та дистанційне керування машинами / роботами [3].

Єдиного універсального методу позиціонування в приміщенні, як у випадку з ГНСС [4], поки що не існує. Навпаки, розробляють багато різних систем, і вибір конкретної з них часто залежить від просторової структури, об'єкта, місцезнаходження якого потрібно визначити, та необхідної точності [5]. Наявний набір методів ранжують за вартістю впровадження, яка також відіграє важливу, часто вирішальну роль. Залишається велика кількість сфер, де проблема визначення місцезнаходження залишається невирішеною.

Технології на основі інфрачервоних та ультразвукових маяків забезпечують високу точність позиціонування, але дуже чутливі до перешкод: для інфрачервоного діапазону це сонячне випромінювання, люмінесцентні лампи та відбиття сигналу; для ультразвукового діапазону – відбиття та перешкоди від високочастотних джерел звуку.

Аналіз наявних систем показав, що найперспективнішою технологією є використання прикладних систем відеоспостереження. Такі системи працюють у видимому діапазоні електромагнітного спектра, що зручно для практичного застосування у межах прямої видимості, забезпечує точну просторову орієнтацію, добру завадостійкість і, як правило, не виникає проблем із відбиттям сигналу. Крім того, для роботи в цьому діапазоні можна використовувати просту та недорогу відеокамеру.

Постановка проблеми

Метою цього дослідження є розроблення алгоритмів опрацювання цифрового відеоспостереження в системах позиціонування мобільних роботизованих пристроїв у приміщенні з використанням кольорових маяків для роботи в умовах неоднорідного фону та змінної освітленості.

Для досягнення цієї мети поставлено завдання розробити такі алгоритми:

- реального часу для виявлення ділянок заданого кольору на відеозображенні з використанням методів цифрового опрацювання в умовах змінної освітленості;
- розпізнавання кольорових маяків в умовах неоднорідного фону для роботи в реальному часі;
- цифрового опрацювання монокулярних відеозображень для розрахунку відстані до кольорових маяків для роботи в реальному часі.

Огляд сучасних джерел інформації за тематикою публікації

У дослідженні [6] наведено підхід до автоматизованих вимірювань ключових показників ефективності телевізійної системи. Запропонована система зменшує ймовірність помилок, які можуть виникнути під час ручного вимірювання відповіді на запит користувача. Вона використовує новий блоковий алгоритм для оцінювання подібності зображення та вимірює час, необхідний телевізійній системі для оброблення та виконання команд, надісланих із різних пристроїв.

Мережеве вбудоване програмне забезпечення, тісно поєднане із апаратними пристроями, має складне інтерактивне середовище та кількість категорій інтерфейсів разом із високими вимогами до реального часу. Питання створення ефективного, автоматичного та інтегрованого середовища тестового моделювання для вбудованого програмного забезпечення уже стали дослідницькою темою. У статті [7] розроблено тестову платформу для апаратного моделювання в циклі, основу на спільному моделюванні програмного та апаратного забезпечення, для вбудованого програмного забезпечення. Результати застосування показують, що така платформа забезпечує вигідну універсальність, високу ефективність тестування та хорошу продуктивність у реальному часі, яка здатна досягти рівня сотень мікросекунд.

Для вирішення проблем низької продуктивності та незручного розширення інтерфейсу традиційної платформи тестування на основі апаратного забезпечення у статті [8] використано концепцію “ієрархічного” + “розподіленого” проєктування для розроблення платформи тестування на основі апаратного забезпечення на основі ієрархічної моделі. Платформа використовується для тестування систем вимірювання та керування, а також оцінка оцінки в режимі реального часу.

Результати застосування та оцінювання в режимі реального часу засвідчили високу універсальність та ефективність тестування платформи та її продуктивність у режимі реального часу на рівні 100 мкс.

Автори роботи [9] прагнуть врахувати проблеми комунікації в реальному часі, такі як збій мережі, з якими стикаються придбані агентні системи, за допомогою моделювання апаратного забезпечення в циклі (HIL) з використанням операційних систем робіт, Gazebo та готових комунікаційних модемів. Розроблено наземну станцію керування для моніторингу та контролю місії автономних БПЛА. Багатоплатформна HIL повністю емулює багатоагентну систему та комунікацію між агентами, тим самим зменшуючи ризик збою.

У дослідженні [10] запропоновано метод розрахунку обмеження напруги СК для системи HIL зменшення масштабу. Результати моделювання підтверджують, що пропонується конструкція СК належно імітує повномасштабну систему.

У [11] запропоновано дослідницький підхід до оптимізації апаратно-контурної системи генератора статичної змінної напруги (SVG) за допомогою Simulink. Використовуючи Simulink, автори досліджували методи моделювання та керування SVG відповідно до реальних вимог моделювання енергосистеми, а також перевіряли експлуатаційні результати моделі для підтвердження її надійності.

Розглянуто проблему керування трифазним шунтуючим активним фільтром потужності за наявності нелінійних навантажень. Автори [12] пропонують керувати рівномірністю трифазного шунта активного фільтра потужності на основі п'ятирівневого інвертора, що стискає нейтральні точки. Цілі керування двоякі: спочатку відбувається компенсація конденсаційного струму та реактивної потужності, що поглинається нелінійними навантаженнями, відтак застосовується регулювання напруги постійного гармонічного струму інвертора. Для досягнення цих цілей розроблено два каскадні контури: зовнішній контур для регулювання напруги постійного струму, а внутрішній контур призначений для компенсації гармонічного струму. Результати моделювання отримано в середовищі Matlab / Simulink для підтвердження характеристик запропонованого контролера.

У дослідженні [13] наведено новий розроблений метод керування реактивною потужністю для однофазних фотоелектричних (ФЕ) інверторів. Керування зосереджено на простоті застосування та автономних діях. Регулювання розроблено з урахуванням ефективної роботи мережі та економічної реактивної потужності з функціональною напругою та оптимізацією активних втрат.

Телевізійні вимірювальні системи (ТВС) використовують інформацію, що збирають відеокамери, для опрацювання відеосигналів із залученням отриманої інформації про об'єкти в полі зору датчиків відеоспостереження, для моніторингу, контролю та управління. ТВС призначені для дистанційного автоматичного моніторингу стану простору в полі зору ТВС, вимірювання параметрів набору об'єктів у контрольованому просторі та, за необхідності, контролю стану та взаємодії цих об'єктів. Це дає змогу ТВС охоплювати широкий спектр пристроїв та обладнання, що використовується в прикладному та промисловому телебаченні для збирання та опрацювання різноманітної інформації, а також для моніторингу та керування технологічними процесами в межах роботизованих систем.

На рис. 1 подано структурні схеми двох типів ТВС, що відрізняються технологічною складністю виконання завдань вимірювання та контролю параметрів об'єктів або процесів.

Система реєстрації та вимірювання (СРВ) складається із вимірювального блока, пристрою, що вимірює параметри об'єкта, який перебуває у полі зору об'єктива, та пристрою, що відображає та записує результати вимірювання. Для успішної роботи цієї СРВ достатньо розмістити вимірюваний об'єкт у полі зору СРВ та створити відповідні умови вимірювання. Як правило, алгоритм вимірювального блока, крім вирішення завдань вимірювання, автоматично шукає та виявляє об'єкт.

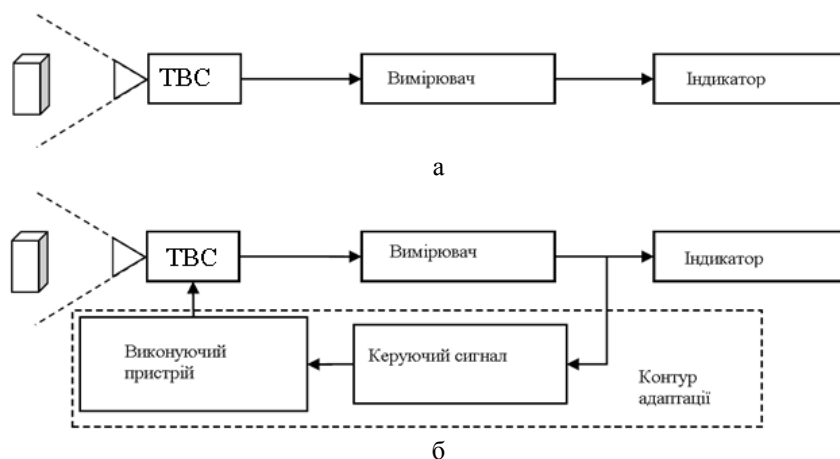


Рис. 1. Структура телевізійних вимірювальних систем: а – тип запису; б – з адаптацією

Для складніших умов експлуатації, коли можуть змінюватися зовнішні умови, такі як освітленість об'єкта, розташування та інші параметри, використовується відеовимірювальний пристрій з адаптацією. Порівняно з попередньою конструкцією, ця система вводить додаткову схему адаптації, яка містить генератор керуючого сигналу та виконавчий механізм, що змінює параметри телевізійного вимірювального пристрою для оптимізації умов вимірювання об'єкта спостереження.

Важливо розуміти, що телевізійні вимірювальні системи та системи мовлення мають принципові відмінності. Характеристикою, яка відрізняє обидва типи систем від відеосистем, є наявність телевізійного вимірювального пристрою, що пов'язано із однаковим методом перетворення оптичного зображення об'єкта спостереження на відеосигнал. Однак основна відмінність між системами полягає у призначенні та подальшому використанні відеосигналу. У системах мовлення обов'язковою завершальною операцією є перетворення відеосигналу на зображення, а якість системи оцінюється ступенем відповідності відеозображення на екрані телевізійного пристрою його оптичному оригіналу. Принципово важливою відмінною рисою СРВ є наявність вимірювального блока, призначеного для опрацювання відеосигналу з метою вилучення інформації про об'єкт спостереження та вимірювання його контрольованих параметрів. Ще однією відмінною рисою СРВ є спосіб подання інформації на виході системи. На відміну від систем мовлення, в яких інформація подається у вигляді відеозображення на екрані пристрою відеоспостереження та призначена для візуального сприйняття, у СРВ вихідна інформація у вигляді цифрових та аналогових сигналів подається на пристрій запису та відображення або використовується в каналі керування. Характерною особливістю цих сигналів є залежність параметра інформаційного сигналу від параметра вимірюваного об'єкта. Тому, вивчаючи СРВ точності результатів вимірювань, можна розробити об'єктивний кількісний критерій якості СРВ. Запропонувати такий критерій для систем телевізійного мовлення, як ми уже зазначали, складно через відсутність узагальненого кількісного критерію оцінювання якості зображення.

Вимірювальні можливості відеосистем визначаються кількістю неспотвореної інформації про об'єкт. Формування відеосигналу складається з двох етапів. На першому етапі в площині фотоелектричного перетворювача (ФЕП) будується оптичне зображення об'єкта, а на другому етапі воно перетворюється на відеосигнал за допомогою телевізійної розгортки. Оптична система (лінза) ФЕП призначена для формування оптичного зображення на вході ФЕП. Це зображення, ігноруючи спотворення, які вносять лінза та волокно, можна вважати центральною проєкцією об'єкта на площину.

Властивості центральної проєкції дають змогу розглядати зображення об'єкта як масштабовану копію самого себе, зберігаючи інформацію про об'єкт. Тому його параметри можна обчислити, відповідно перераховуючи виміряні параметри оптичного зображення. Серед тих, що можна визначити за його оптичним зображенням, можна виділити три групи параметрів об'єкта: геометричні, енергетичні та кольорові.

Виклад основного матеріалу

Великий масив практично корисних просторових перетворень можна подати як добуток точкових матриць у рівномірних координатах. Одним із найпоширеніших перетворень є масштабування. Рівномірне масштабування однаково змінює значення всіх координат, тобто розміри всіх об'єктів змінюються однаково. Тому його можна подати як суму членів, що описують застосування масштабного коефіцієнта до двох базисних векторів двовимірного евклідового простору. Наприклад, $[1, 2] = 1[1, 0] + 2[0, 1]$ та $2[1, 2] = 2(1[1, 0] + 2[0, 1]) = 2[1, 0] + 4[0, 1] = [2, 4]$.

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c & 0 \\ 0 & c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} cx \\ cy \end{bmatrix} = c \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_x & 0 \\ 0 & c_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_x x \\ c_y y \end{bmatrix}. \quad (2)$$

У рівнянні (1) масштабування двовимірної точки представлено як добуток координат початку координат та матриці, що містить значення масштабних коефіцієнтів у діагональних елементах. Рівняння (2) є загальним масштабним перетворенням, в якому одиничні вектори в напрямках x та y можуть масштабуватися по-різному.

Перехід від координат у реальній системі координат зображення, що вимірюється в міліметрах, до координат у растровій системі координат, що вимірюється в пікселях, здійснюють за допомогою масштабування. У разі використання камер із квадратними пікселями значення масштабних коефіцієнтів однакові: $c_x = c_y = c$. Для стандартних відеокамер співвідношення масштабних коефіцієнтів повинно становити $4/3$.

Ще одне відоме перетворення на площині – це обертання навколо точки. На рис. 2 подано двовимірну точку $P = [x, y]$, повернуту проти годинникової стрілки навколо початку координат на кут θ . Це приводить до нової точки $P' = [x', y']$.

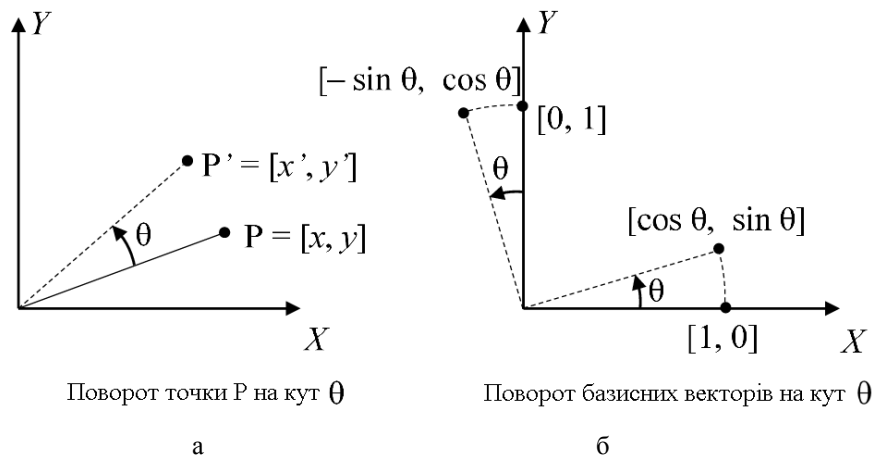


Рис. 2. Обертання довільної точки на площині можна подати як комбінацію обертань базисних векторів

Перетворення обертання двовимірної точки відносно початку координат записується як рівняння (3). Як і будь-яке лінійне перетворення, стовпці матриці обертання можна визначити, застосувавши це перетворення до базисних векторів. Перетворення будь-якого іншого вектора можна подати як лінійну комбінацію базисних векторів.

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \cos \theta - y \sin \theta \\ x \sin \theta + y \cos \theta \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Перетворення обертання зберігають довжину та ортогональність базисних векторів. Це можна перевірити геометрично або алгебраїчно.

Отже, відстань між двома перетвореними точками дорівнює відстані між вихідними точками. Це властивість жорсткого перетворення, яке можна подати як композицію перетворення обертання та перетворення зсуву.

Жорсткі перетворення часто використовують в операціях з твердотілими тілами для переміщення між системами координат. Рівномірне масштабування з коефіцієнтом, відмінним від одиниці, не зберігає довжину, але зберігає кут між векторами. Властивості перетворень важливі для вибору властивостей об'єкта, які не залежать від положення камери або об'єктів у сцені.

Часто необхідно змістити точки на задану відстань. Це перетворення еквівалентне зміні початку координат. Зокрема, перетворення зсуву може знадобитися для перетворення координат пікселя зображення в координати на карті. Перетворення не відображає початок координат $[0, 0]$ на себе, тому його не можна подати матрицею 2×2 , як роблять для масштабування та обертання. Інакше кажучи, перетворення не є лінійним перетворенням. Для поадання перетворення та деяких інших операцій у матриці можна використовувати матриці 3×3 . Тому до двовимірних координат точки необхідно додати додаткову координату. Для цього використовують однорідні координати. Додана координата зазвичай дорівнює одиниці, але іноді використовують й інші значення.

Типовий приклад використання цих перетворень показано на рис. 3. Зображення $I[r, c]$ отримано за допомогою камери з квадратними пікселями. Оптична вісь камери перпендикулярна до площини робочої області $W[x, y]$. Потрібна формула для перетворення координат пікселя $[r, c]$ на координати $[x, y]$, виміряні, наприклад, у міліметрах. Це перетворення можна виразити за допомогою комбінації матриці обертання R , матриці масштабування S та матриці перетворення D . Відображення координат пікселя у координати $[x, y]$ на площині в робочій області визначається чотирма параметрами. Це кут повороту θ , коефіцієнт масштабування s для перетворення одиниць пікселя на міліметри та два параметри перетворення x_0 та y_0 . Значення цих чотирьох параметрів можна розрахувати за координатами двох контрольних точок P_1 та P_2 . Контрольні точки відповідають певним, чітко видимим та легко виявленим ознакам у робочій зоні.

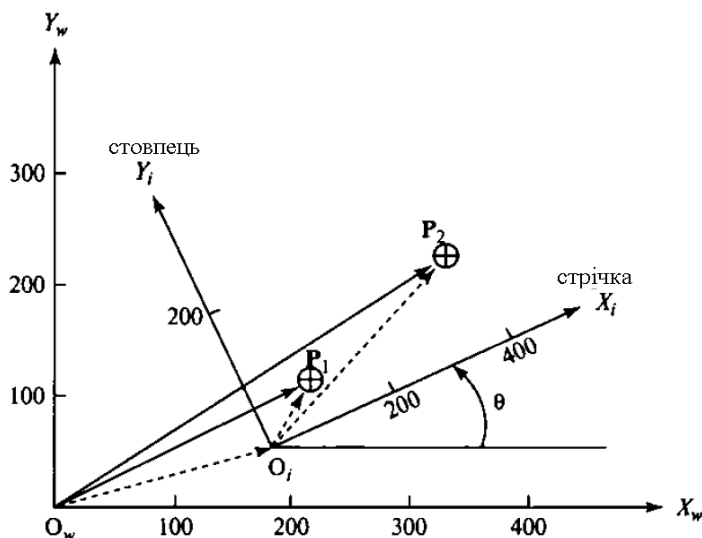


Рис. 3. Перехід від піксельної системи координат зображення до світової системи координат

Опрацьовуючи фотографії земної поверхні, як контрольні точки часто вибирають перехрестя доріг, кути будівель, різкі вигини річок тощо. Важливо зазначити, що ту саму ключову точку, наприклад, P_1 , можна подати двома різними векторами. Наприклад, один з них представляє піксельні координати точки на зображенні I , а другий – координати $[x, y]$ у світовій системі координат W , виміряні в міліметрах. Позначимо ці точкові представлення як iP_1 та wP_1 відповідно.

Точка P_2 дає змогу вивести ще два рівняння. Щоб визначити значення чотирьох параметрів формули перетворення координат, необхідно розв'язати отриману систему із чотирьох рівнянь. Кут θ легко обчислити незалежно від інших параметрів. Залишаються три рівняння з трьома невідомими, які легко розв'язати відносно невідомих s , x_0 та y_0 . Афінні перетворення в тривимірному просторі широко використовуються не тільки в тривимірному комп'ютерному зорі, але й у робототехніці та системах віртуальної реальності. Основні перетворення – трансляція, обертання, масштабування та зсув. Для зручності розрахунків використовують однорідні координати, тобто замість тривимірних координат точки $[P_x, P_y, P_z]$ ми працюємо з її однорідними координатами $[sP_x, sP_y, sP_z, s]$, де s – ненульовий коефіцієнт масштабування, зазвичай $s = 1$.

Системи координат необхідні для введення кількісних характеристик положення точок у просторі. На рис. 4 наведено сцену, в якій визначено чотири різні системи координат.

Отже, точка P , вершина піраміди, має чотири різні представлення координат. Спочатку точка описується в системі координат моделі M як $MP = [MP_x, MP_y, MP_z] = [b/2, b/2, 2/2b]$, де b – сторона основи піраміди. Положення піраміди у світовому просторі подано на рис. 4. Координати вершини піраміди у світовій системі координат можна записати так:

$${}^wP = [{}^wP_x, {}^wP_y, {}^wP_z] = TR \left[\frac{b}{2}, \frac{b}{2}, \frac{\sqrt{2}}{2}b \right], \quad (4)$$

де TR – комбінація обертання та переміщення системи координат M відносно системи координат W . Нарешті, якщо два датчики C та D спрямовані до піраміди з різних боків робочого стола, то лівопрохідне відношення між точками P та Q у двох системах координат буде різним.

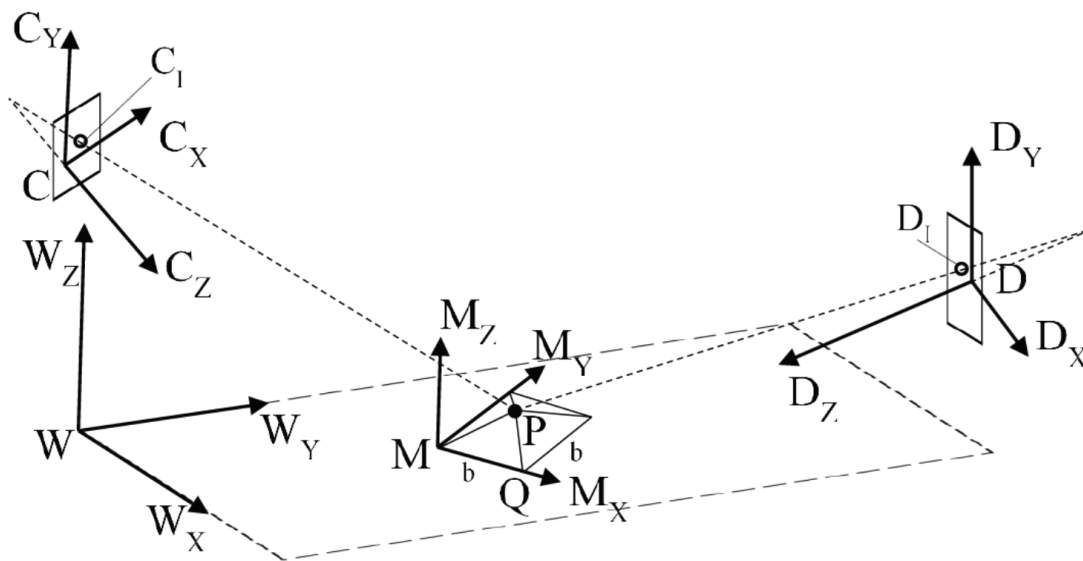


Рис. 4. Точка P має різні координати у чотирьох різних системах координат

Визначення положення датчиків одного відносно іншого та до 3D-об'єктів у сцені, а також написання правил для маніпулювання їхніми координатами потребує математичних методів для роботи з координатами точок у різних системах координат. Ці ж методи дають нам змогу описувати рух об'єкта в просторі. Іноді використовуватимемо зручні позначення для позначення системи координат, в якій описується точка, та “напряму” перетворення координат. Зокрема, перетворення точки в MP -моделі з модельної системи координат у світову систему координат WT позначається як $WP = WM T MP$.

Під час руху компоненти вектора руху x_0 , y_0 та z_0 додають до координат точки $1P$ у системі координат 1, щоб отримати координати точки $2P$ у системі координат 2. На рис. 5 наведено приклад,

де відображено рухи та обертання, необхідні для зв'язку точки в модельній системі координат із її світовими координатами:

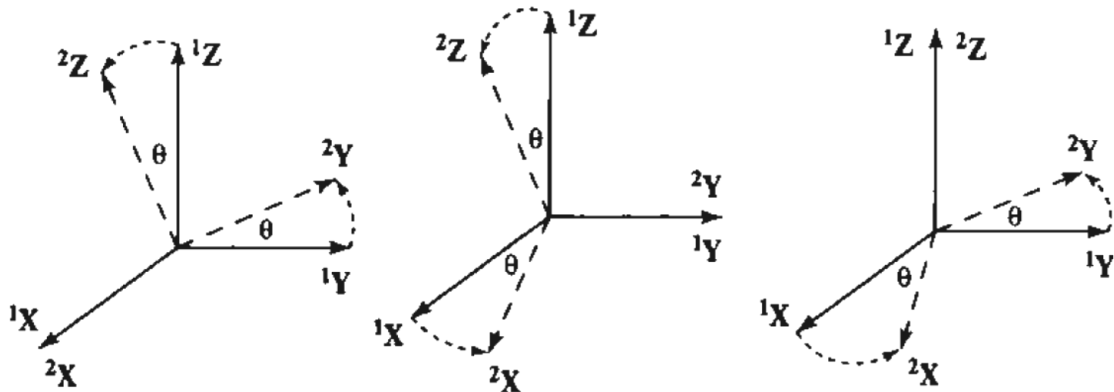


Рис. 5. Обертання на кут θ навколо осей OX (ліворуч), OY (центр) та OZ (праворуч)

Використовуючи 3D-матрицю масштабування, можна задати різні коефіцієнти масштабування в кожному напрямку системи координат. Іноді вони всі однакові, наприклад, у разі зміни одиниць вимірювання або рівномірного масштабування для отримання екземпляра моделі заданого розміру.

Найпростіший спосіб записати матрицю обертання – відносно однієї з осей координат. Вектори-стовпці цієї матриці будуть компонентами перетворених одиничних векторів (тобто після обертання). Будь-яке 3D-лінійне перетворення повністю визначається результатами перетворення трьох базисних векторів. Обертання навколо осі z подібне до 2D-перетворення, за винятком того, що тепер воно зберігає координату z 3D-точки. На рис. 6 обертання навколо осі z подібне до 2D-перетворення, за винятком того, що тепер воно зберігає координату z 3D-точки. На рис. 6 показано, як одиничні вектори перетворюються елементарними обертаннями навколо осей координат.

Поворот на кут θ навколо осі OY:

$${}^2P = R({}^2X, \theta)P \quad (4)$$

Обертання на кут θ навколо осі OZ:

$${}^1P = R({}^1Y, \theta)P \quad (5)$$

Обертання навколо довільної осі можна подати як рівняння. Матриця коефіцієнтів rij є ортонормованою: всі її рядки і стовпці – взаємно ортогональні одиничні вектори. Усі матриці елементарних обертань навколо осей координат також мають цю властивість. Будь-яке обертання в тривимірному просторі можна подати як обертання на деякий кут θ навколо деякої осі A. Це може бути довільна вісь, яка не обов'язково збігається із однією з осей координат. Щоб перевірити це, припустимо, що базисний вектор 1X перетворюється на інший вектор 2X. Вісь обертання A можна знайти, обчисливши векторний добуток 1X та 2X. Якщо вектор 1X не змінюється під час обертання, цей вектор збігається з віссю обертання.

Отже, можна зазначити, що результат руху твердого тіла від часу t_1 до t_2 можна подати одним вектором трансляції та однією матрицею обертання, незалежно від форми траєкторії тіла між цими моментами часу. Для зберігання параметрів трансляції та обертання достатньо однієї матриці перетворення в однорідних координатах: дев'ять елементів цієї матриці визначають обертання, а три елементи – трансляцію:

Розглянемо задачу вирівнювання модельного трикутника із трикутником, побудованим за даними вимірювань. Завдання полягає в тому, щоб знайти перетворення $WM T$, яке перетворює вершини модельного трикутника A, B та C на вершини конгруентного трикутника D, E у робочій області.

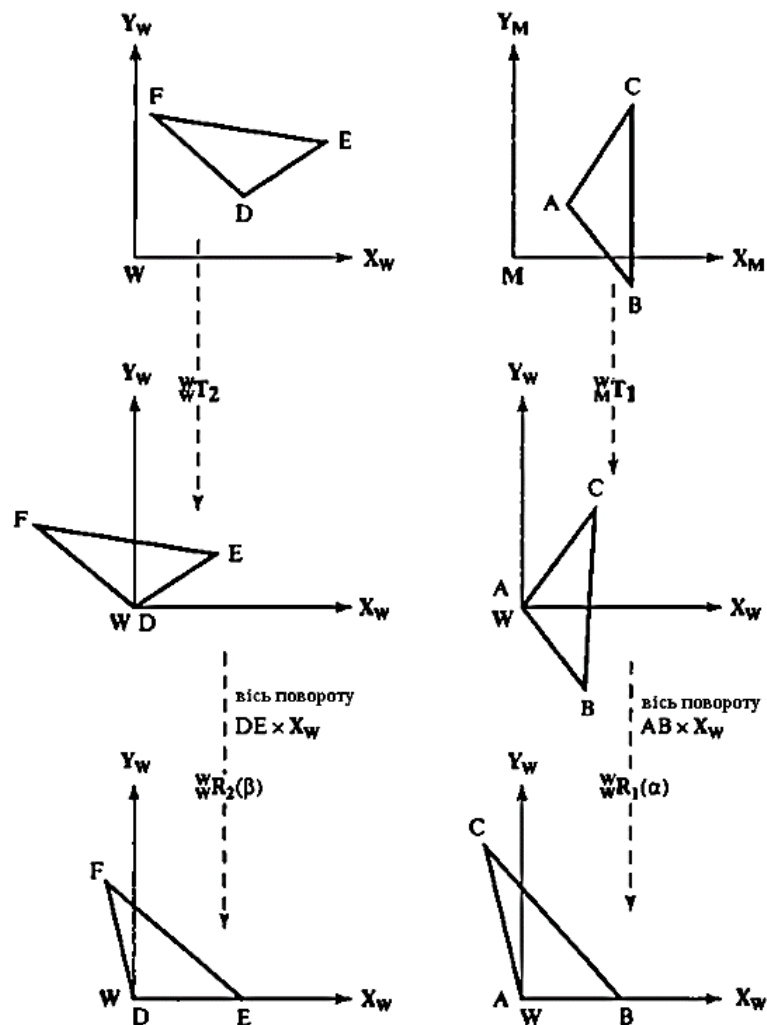


Рис. 6. Поєднання двох конгруентних трикутників.

ABC – модельний трикутник, DEF – трикутник, отриманий у результаті вимірювань

Трикутник перетворюється так, що сторона AB потрапляє на вісь $WOWX$, а весь трикутник міститься у площині XY світової системи координат W . У цій конфігурації вершини A та D .

Кожен трикутник повертається так, щоб він перебував у площині XY . Вісь обертання – вісь OX ; те саме стосується B, E, C та F . Рівняння перетворення, яке виконує задане вирівнювання вершин, можна переписати, щоб отримати бажане перетворення $WM T$, яке відображає точки MPi у відповідні точки WPi .

Розрахунок параметрів перетворення $WM T$, яке вирівнює точки моделі A, B, C з вимірними точками у світовій системі координат D, E, F , передбачає такі кроки:

- введення тривимірних координат трьох точок моделі A, B, C та відповідних вимірних точок D, E, F ;
- побудова перетворення $WM T1$, яке вирівнює точку моделі A з початком світової системи координат W ;
- побудова перетворення $WW T2$, яке вирівнює виміряну (у світовій системі координат) точку D із початком світової системи координат. Отже, на цьому етапі точки A та D вирівнюються у системі координат W ;
- побудова обертальних перетворень $WW R1$ та $WW R2$ для вирівнювання сторін AB та DE з віссю X . Отже, сторони AB та DE вирівнюються в системі координат W ;
- побудова обертальних перетворень $WW R3$ та $WW R4$ для розміщення точок C та F на площині XY . Тепер усі три пари точок вирівнюються у системі координат W ;

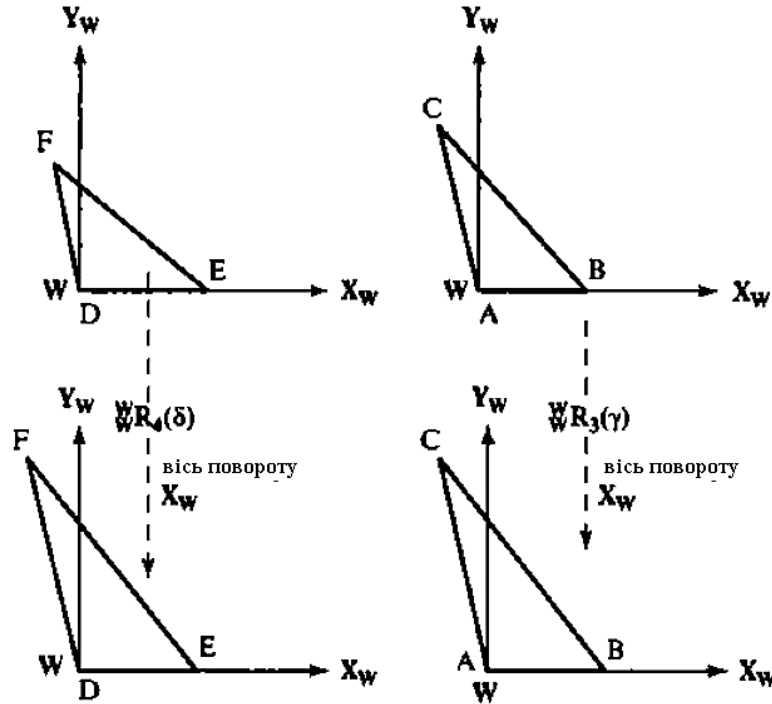


Рис. 7. Продовження процедури вирівнювання двох конгруентних трикутників

– вирівнювання модельного трикутника та трикутника, побудованого на підставі результатів вимірювань, у світовій системі координат. Це виражається рівнянням:

$${}^w P_i = (T_2^{-1} R_2^{-1} R_4^{-1} R_3 R_1 T_1)^M P_i; \quad (6)$$

– алгоритм повертає перетворення як результат:

$${}^w T_M = (T_2^{-1} R_2^{-1} R_4^{-1} R_3 R_1 T_1). \quad (7)$$

Зрозуміло, що будь-яку функцію можна виконати, і кожна функція має обернену функцію. Теоретично, будь-які два конгруентні тіла можна збалансувати, збалансувавши будь-які три відповідні точки. На практиці помилки вимірювання та оцінювання можуть призвести до значних помилок. Зазвичай для виправлення ситуації використовують метод оптимізації великих точок.

Результати та обговорення

Система позиціонування мобільного роботизованого пристрою складається з кількох ключових процесів: виявлення вибраного кольору на зображенні, розпізнавання маячків, визначення відносного положення кольорових маячків і, нарешті, визначення абсолютного положення камери. Всі ці компоненти протестовано із використанням різних параметрів та умов роботи.

Для частини алгоритму, пов'язаної з розпізнаванням кольорів, знайдено відповідні параметри, які дають змогу розпізнавати колір за різних умов освітлення. Зокрема, протестовано розпізнавання відтінку (крива Гауса) та насиченості / яскравості (логістика подвійної сигмоподібної кривої) кольору, що дало можливість однозначно розпізнавати колір без змішування кольорів із сусідніми кольорами. Якщо значення розсіювання, кривизни та зміщення кривих вибрані неправильно, кольорова область з'являється на задньому плані, у чорній області зображення або взагалі не видно. Отже, для визначення відтінку колірної моделі HSV використано гаусів розподіл:

$$f(x) = 255 \exp\left(-\frac{(x-m)^2}{2D}\right). \quad (8)$$

У цьому випадку значення дисперсії визначено як $D = 10$. На прикладі зеленого кольору зі значеннями HSV (120, 70 %, 50 %), гаусів розподіл для відтінку ($m = 120$) подано на (рис. 8).

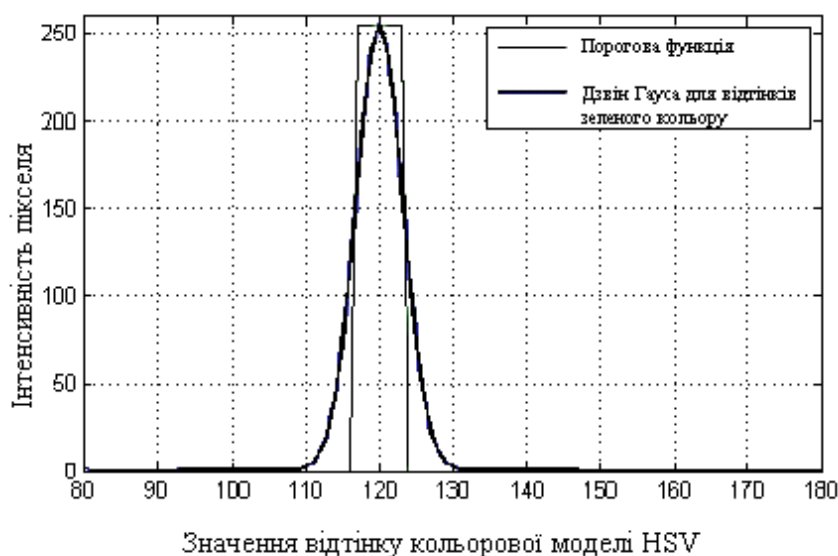


Рис. 8. Крива розподілу Гауса зі скоригованими параметрами для відтінку

Варто зазначити, що традиційно значення каналу H містяться у діапазоні 0–360, S – 0–100 та V – 0–100. Працюючи з бібліотекою OpenCV, всі значення каналу нормалізують до діапазону 0–255 для максимального використання розмірності одного байта. Для логістичної сигмоподібної функції, що використовується для насичення:

$$f(x) = \frac{255}{1 + \exp(-k(x - m + \Delta))}. \quad (9)$$

Для (9) визначено такі параметри:

- логістична кривина сигмоподібної кривизни $k = 0,3$;
- зміщення порога логістичної сигмоподібної кривизни $\theta = 30$.

Вигляд логістичної сигмоподібної функції для насичення на прикладі зеленого (HSV: 120, 70 %, 50 % – $m = 180$) подано на рис. 9. Для яскравості визначено умови, відмінні від насичення, оскільки цей канал простору HSV найменше впливає на хроматичність: логістична сигмоподібна кривина $k = 0,1$; зміщення порога $\theta = 50$ для $m = 125$. Це мінімізує вплив можливої низької освітленості сцени.

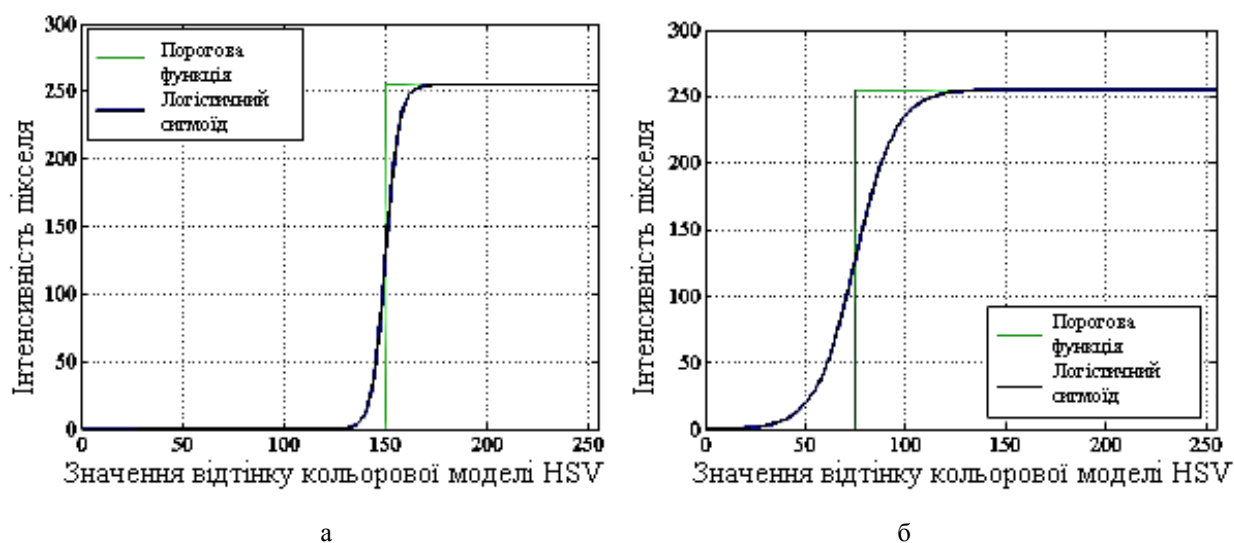


Рис. 9. Логістична сигмоподібна функція із налаштованими параметрами для (а) насиченості та (б) яскравості

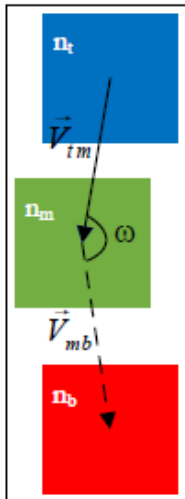


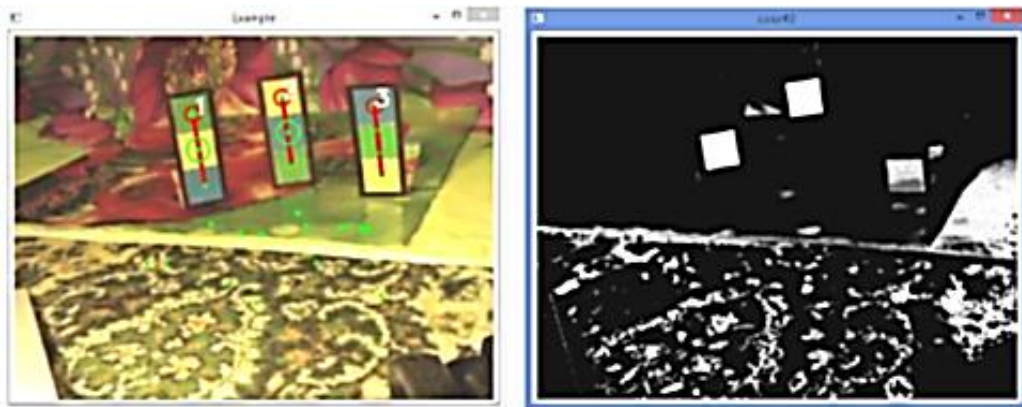
Рис. 10. Вибір параметрів векторів між кольоровими областями маяка

Для другої частини алгоритму, що відповідає за розпізнавання маяків, визначили порогові значення для відстаней між кольоровими областями та кутів між векторами, що їх з'єднують, щоб мінімізувати ймовірність хибних виявлень, тим самим зберігаючи продуктивність алгоритму розпізнавання маяків за наявності неоднорідного різнокольорового фону. Ці параметри вибрано тому, що занадто низькі пороги (тобто невелике відхилення від ідеальної форми маяка) збільшують ризик відмови маяка, навіть за незначних візуальних спотворень через спотворення або кривизну самого маяка. Занадто високі пороги збільшують ймовірність розпізнавання непов'язаної кольорової області як належної до маяка. Емпірично підібрані порогові значення мінімізують похибку розпізнавання маяка.

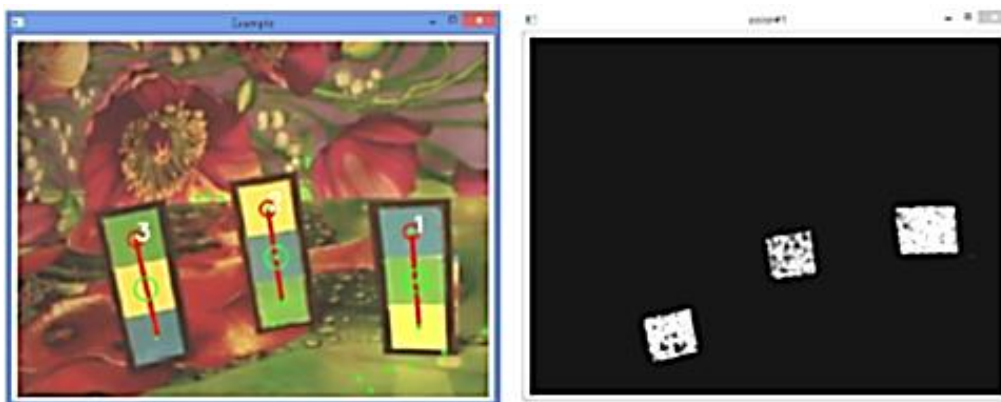
Різниця між довжинами векторів V_{tm} та V_{mb} не повинна перевищувати 10%; кут ω між векторами визначено як 7° (рис. 10).

Точність вимірювання відстані до маяка залежить, передусім, від точності розпізнавання маяка, тобто від точності визначення координат його геометричного центра. Вона також залежить від правильного налаштування кута об'єктива камери, встановленого на MRP, що, як правило, є постійним. Інші фактори, що впливають на точність обчислення відносних координат, зазвичай відсутні.

Для демонстрації можливостей алгоритму зображення з камери були отримані за різних умов освітлення на неоднорідному кольоровому фоні (рис. 11).



а



б

Рис. 11. Методи ідентифікації кольорових маячків на неоднорідному кольоровому фоні за різних умов освітлення: а – побудова кольорової маски для жовтої області; б – для синього простору

Удосконалення системи позиціонування роботизованих пристроїв на основі...

У цьому прикладі показано, що алгоритм класифікує непов'язані області в кадрі камери, які за кольором схожі на маяк. Однак, аналізуючи структуру потенційного маяка, система відфільтровує ці непов'язані області через невідповідність довжин векторів та кута між ними.

Система позиціонування передбачає використання відеокамери на мобільному роботизованому пристрої, призначеному для позиціонування у приміщенні. У систему входить відеокамера, пристрій для передавання даних з відеокамери на комп'ютерний модуль (канал Wi-Fi), комп'ютерний модуль (ПК) та попередньо встановлене програмне забезпечення для аналізу відеозображення (програмне забезпечення системи позиціонування).

Система призначена для використання у приміщенні. Розміри камери порівнянні з розмірами стандартної офісної вебкамери (приблизно $5 \times 5 \times 5$ см). Споживана потужність камери з модулем передавання даних становить 6 Вт.

Введення цієї системи в мобільну систему позиціонування є простим. Основні вимоги до реалізації передбачали спосіб інтеграції камери в установку та розміщення ПК для зручності використання. Основним недоліком цієї системи є необхідність створення зв'язку між розробленою системою позиціонування у приміщенні та мобільною (або автоматичною) системою керування платформою. Ця тема стосується робототехніки та її систем керування. Крім того, під час впровадження систем позиціонування потрібно враховувати необхідність розміщення маяків у приміщенні. Для точної орієнтації необхідно визначити декартову систему координат, яка тісно пов'язана зі структурою камери. Базовою одиницею такої системи зв'язку є вимірювач. Маяки потрібно розміщувати в приміщенні на відстанях та із розмірами, що враховують поле зору камери та розмір використовуваних маяків. Для належної роботи системи база даних маяків містить координати кожного маяка, його унікальний колір та набір кольорів HSV, що використовують для маяків у цьому приміщенні. Основні характеристики системи для створення індивідуального рішення відповідають характеристикам системи, застосованої в якісному дослідженні.

Висновки

У задачах позиціонування в приміщенні мобільна роботизована система демонструє алгоритми опрацювання зображень за допомогою нової відеосистеми. Позиціонування ґрунтується на кольорових маяках.

Розроблено алгоритм розпізнавання кольорових маяків із використанням методів цифрового опрацювання зображень. Цей алгоритм попередньо обробляє зображення, будує кольорову маску для кожного кольору зображення та аналізує структуру виявлених областей для ідентифікації маяків. Це дає алгоритму змогу працювати на нерівномірному фоні та за змінного навколишнього освітлення.

Розроблено алгоритм позиціонування в приміщенні на основі кольорових маяків за допомогою телевізійної вимірювальної системи. Алгоритм ґрунтується на перспективній проєкційній моделі, після чого створюють тривимірні координати. Такий підхід дає змогу позиціонувати з точністю до $2,8 \pm 0,6$ мм. Точність порівнянна з використанням лазерних та інфрачервоних опорних міток, що значно економить час та ресурси на етапі управління системою.

За результатами дослідження вдосконалено алгоритм виявлення маяків, щоб зменшити вплив низької освітленості сцени та неоднорідності кольору фону. Встановлено такі параметри фільтрації: для насичення HSV: сигмоподібна кривина $k = 0,3$; порогове зміщення сигмоподібної кривої = 30; для яскравості HSV: крива $k = 0,1$; зміщення = 50; для кольору дисперсію встановлено на $D = 10$. Параметри детектування світла були такими: поріг різниці довжин світлових векторів – 10 %, максимальний кут між векторами – 7° .

Досліджено вплив зовнішнього освітлення на роботу алгоритму детектування світла. Під час першої спроби дослідити вплив різних типів зовнішнього освітлення в дослідженні використано: люмінесцентну лампу, лампу розжарювання, ртутно-кварцову лампу, пряме сонячне світло та природне світло в хмарну погоду. Алгоритм зберігав працездатність з усіма джерелами світла.

Під час експериментів, що досліджували вплив рівня освітленості, виявлено, що зі зменшенням рівня освітленості на цілі значення каналів насичення S та яскравості V для кольорових областей маяка зменшуються, а коли ці значення стають нижчими від порогових значень, кольорова область відхиляється. Під час дослідження поріг яскравості було встановлено на рівні 22 люкс.

Досліджено залежність алгоритму розпізнавання від кута повороту маяка. Поріг продуктивності визначається як зменшення відносної площі цільової кольорової області на вхідному зображенні нижче від порогового значення 100 пікселів. Цей поріг встановлено для фільтрації спотворень, спричинених невеликими кольоровими областями на фоні.

Перелік використаних джерел

- [1] B. Kovacevic, M. Kovacevic, V. Pekovic and Z. Radonjic, "Automatic key performance indicator measurements of television system using black box testing solution", 2014 IEEE Fourth International Conference on Consumer Electronics Berlin (ICCE-Berlin), Berlin, Germany, 2014, pp. 173–175, <https://doi.org/10.1109/ICCE-Berlin.2014.7034225>.
- [2] F. Gao and F. Deng, "Design of a Networked Embedded Software Test Platform Based on Software and Hardware Co-simulation", 2016 IEEE International Conference on Software Quality, Reliability and Security Companion (QRS-C), Vienna, Austria, 2016, pp. 375–381, <https://doi.org/10.1109/QRS-C.2016.57>.
- [3] F. Deng and F. Gao, "Design of High Confidence Embedded Software Hardware-in-Loop Simulation Test Platform Based on Hierarchical Model", 2018 IEEE International Conference on Software Testing, Verification and Validation Workshops (ICSTW), Västerås, Sweden, 2018, pp. 163–168, <https://doi.org/10.1109/ICSTW.2018.00046>.
- [4] Robin, C., Lacroix, S. (2016). Multi-robot target detection and tracking: taxonomy and survey. *Autonomous Robots*, 40 : 729–760.
- [5] Zou, L. Y., Zhang, M. Z., Rong, M. (2019). Analysis of intelligent unmanned aircraft systems swarm concept and main development trend. *Tactical Missile Technology*, 5 : 1–11.
- [6] Khaliq, S., Ahsan, S., Nisar, M. D. (2021). Multi-platform hardware in the loop (hil) simulation for decentralized swarm communication using ros and gazebo. In: 2021 IEEE 22nd International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM). Pisa pp. 310315.
- [7] Beijing Links Tech (2023). Semi physical experimental platform for unmanned aerial vehicle formation flight control Hardware-in-the-Loop Simulation Systems. <http://www.linkstech.com.cn/edu/detail?id=524>.
- [8] Ma J., Li, Y. (2024). Application of Artificial Intelligence in the Field of UAV. *Radio Engineering*, 54 (3): 759–764.
- [9] L. Vu-Ngoc, B. -H. Nguyễn, T. Vo-Duy, M. C. Ta and J. P. F. Trovão, "Power Hardware-in-the-loop Simulation of Hybrid Energy Storage System Considering Supercapacitor Voltage Limitation", 2022 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), Merced, CA, USA, 2022, pp. 1–6, <https://doi.org/10.1109/VPPC55846.2022.10003397>.
- [10] H. Chen and Z. Zhou, "Research on hardware-in-the-loop simulation of static var generator", 2024 7th International Conference on Electrical Engineering and Green Energy (CEEGE), Los Angeles, CA, USA, 2024, pp. 100–106, <https://doi.org/10.1109/CEEGE62093.2024.10744143>.
- [11] R. Hartwig, A. Hensler and T. Ellinger, "Volume and efficiency optimization of an industrial flying capacitor GaN multilevel inverter", PCIM Europe digital days 2020; International Exhibition and Conference for Power Electronics Intelligent Motion Renewable Energy and Energy Management, pp. 1–5, 7–8 July 2020.
- [12] O. Mikram, A. Abouloifa, I. Lachkar, M. Aourir and H. Katir, "Flatness-Based-Control of Three-phase shunt active power filters based on five-level NPC inverter", 2020 International Conference on Electrical and Information Technologies (ICEIT), pp. 1–5, 4–7 March 2020.
- [13] J. Hrouda, M. Čerňan and K. Procházka, "A New Method of Smart Control of Single-Phase Photovoltaic Inverters at Low Voltage for Voltage Control and Reactive Power Management", in IEEE Access, Vol. 12, pp. 80071–80085, 2024, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3410374>.
- [14] <https://reference.medscape.com/calculator/846/mifflin-st-jeor-equation>.

Olexandr Belej¹, Oleksii Dzhus², Mykhaylo Lobur³, Danylo Golovanchuk⁴

¹ Department of Computer Design Systems, Lviv Polytechnic National University, 12, S. Bandery str., Lviv, Ukraine, E-mail: olexandr.i.belei@lpnu.ua, ORCID 0000-0003-4150-7425

² Department of Computer Design Systems, Lviv Polytechnic National University, 12, S. Bandery str., Lviv, Ukraine, E-mail: oleksii.p.dzhus@lpnu.ua, ORCID 0009-0004-0030-6162

³ Department of Computer Design Systems, Lviv Polytechnic National University, 12, S. Bandery str., Lviv, Ukraine, E-mail: mykhaylo.v.lobur@lpnu.ua, ORCID 0000-0001-7516-1093

⁴ Department of Computer Design Systems, Lviv Polytechnic National University, 12, S. Bandery str., Lviv, Ukraine, E-mail: danylo.holovanchuk.mknit.2024@lpnu.ua, ORCID 0009-0007-1825-7022

IMPROVEMENT OF THE POSITIONING SYSTEM OF ROBOTIC DEVICES BASED ON THE COLOR BEACON ALGORITHM

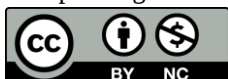
Received: November 18, 2025 / Revised: November 20, 2025 / Accepted: November 22, 2025

© Belej O.*, Dzhus O., Lobur M., Golovanchuk D., 2025

Abstract. Today, the development of indoor positioning systems is a promising and relevant, but difficult task. This requires the creation of maps based on floor plans, the selection of effective location algorithms, and the creation of an appropriate building infrastructure for reliable location determination. Existing positioning systems that use radio channels for indoor navigation, infrared and ultrasonic tagging are considered. It is established that the use of a radio channel indoors is problematic due to interference and signal reflections that affect accuracy. The analysis showed that the most reliable channel for use indoors is a channel in the visible range of the electromagnetic spectrum. Such systems work using video cameras and algorithms. Systems known from open sources that use video cameras and machine vision systems are considered. The main problem of existing indoor positioning technologies based on applied video surveillance systems is their connection with the working background, such as the interior, or the requirement of a uniform background for the use of colored beacons. Based on the analysis, the use of colored beacons as reference points and a video measurement system for calculating distances to these points for indoor navigation are proposed. The use of colored beacons is proposed based on the hypothesis that they can work in conditions of a heterogeneous background, unlike existing systems. To confirm these assumptions, appropriate studies were conducted. An algorithm for recognizing colored lights on an input video image obtained from a digital image processing video camera has been developed. The algorithm is based on constructing a “color mask” using a smooth continuous logistic sigmoid curve and a Gaussian function to extract the color characteristic of the light signal. An algorithm for determining the coordinates of the marker recognition point based on recognized colored beacons in frames of the input video image has been developed. To determine the coordinates of a mobile robotic system, measurements are taken on the video image to determine the relative coordinates of the beacons in the camera coordinate system. A relative map is constructed, which is converted into absolute camera coordinates in the world coordinate system using a three-dimensional transformation. This is made possible by the predefined absolute coordinates of the color beacons. Filtering parameters for the color beacon recognition algorithm are defined, which allows the algorithm to maintain performance under conditions of heterogeneous backgrounds. The following parameters are used: the variance of the Gaussian curve for hue filtering, the curve and logistic threshold shift of the sigmoid curve for saturation; the logistic curvature of the sigmoid curve and the brightness threshold shift. These parameters allow classifying the pixels of the input image by color, thereby identifying only those areas that correspond to the color values of the color beacon areas under variable lighting conditions.

Keywords: location, colored beacons, sigmoid curve, digital image processing, machine vision systems, video surveillance systems.

*Corresponding author



© The Author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Licence 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)