

РАДІОЕЛЕКТРОНІКА ТА РАДІОЕЛЕКТРОННЕ АПАРАТОБУДУВАННЯ<https://doi.org/10.31649/1997-9266-2025-179-2-187-194>

УДК 004.932.2

І. С. Колесник¹
О. С. Городецька¹
Н. В. Добровольська¹

СИСТЕМА РОЗПІЗНАВАННЯ НАПРЯМУ РУХУ ЗА ДОПОМОГОЮ КОМП'ЮТЕРНОГО ЗОРУ

¹Вінницький національний технічний університет

Одним з найактуальніших напрямів розвитку штучного інтелекту наразі є комп'ютерний зір. Здатність бачити — найважливіша властивість людини. Саме за допомогою зору ми отримуємо найбільше інформації про навколишній світ.

Завдяки накопиченому досвіду та знанням легко розпізнати об'єкти та відрізнити їх один від одного, орієнтуємось у просторі. Згодом виникла ідея наділити зором і штучний інтелект. Проте, незважаючи на те, що сучасні комп'ютери вже перевершили людину у сфері обчислень та обробки інформації, аналіз зображень становить для них досить важливе завдання.

Сфери застосування комп'ютерного зору досить широкі: від промислових засобів моніторингу технічних процесів до автономних систем керування, що ухвалюють рішення на основі аналізу отриманої відеоінформації.

Однією з найперспективніших сфер використання систем комп'ютерного зору є автоматизовані логістичні системи. Прикладом цього є широке використання транспортних роботів, які забезпечують переміщення вантажів у промисловому середовищі без участі оператора. Ці машини використовуються на підприємствах для транспортування сировини зі складу до цеху, заготовок між виробничими етапами, готової продукції — з виробництва на склад та зі складу на відвантаження. Застосування таких транспортних засобів дозволяє зменшити витрати на перевезення, пов'язані з людським фактором та втратою часу, підвищити безпеку на підприємстві, прискорити виробничі процеси.

Метою дослідження є удосконалення системи реєстрації та розпізнавання напрямку руху мобільного робота за допомогою комп'ютерного зору.

Ключові слова: комп'ютерна візуалізація, роботи, OpenCV, USB камера.

Вступ

Сьогодні велику популярність набуває використання систем комп'ютерного зору, хоча раніше такі системи впроваджувалися у виробництво в обмеженій кількості, оскільки це було дуже затратно. Проте сьогодні вартість, продуктивність та споживання енергії в електронних системах дозволили розширити застосування машинного зору в різних галузях. Хоча реалізація таких систем залишається складною, вона стала набагато простішою і доступнішою ніж раніше.

На сучасному ринку існують рішення, які використовують різні принципи визначення ситуацій, в яких можна використовувати системи комп'ютерного зору. Наприклад, аналіз структурованого світла з урахуванням принципів часових проміжків; стереоскопічні рішення на основі особливих точок зображення [1].

Проте класичні рішення, основані на цифрових відеокамерах, залишаються популярними. Вони дозволяють оптимально визначати координати об'єктів, легко налаштовуються та мають високу надійність і простоту установки. Складання маршруту для цих роботів здійснюється за допомогою напрямних ліній та маркерів. Їхнє виявлення та використання як суб'єктів управління і є головним завданням систем комп'ютерного зору [2].

Розвиток машинного навчання та штучних нейронних мереж значно прискорив процес набуття

роботами здатності бачити. Наразі штучний інтелект здатний розпізнавати номерні знаки автомобілів, читати штрих-коди на товарах у супермаркеті, аналізувати записи з камер відеоспостереження та здійснювати пошук осіб на фотографіях та відеозаписах. Таким чином, комп'ютерний зір є набором методів, що дозволяють комп'ютерам отримувати інформацію із зображень.

Яскравим прикладом впровадження систем розпізнавання напрямку руху за допомогою комп'ютерного зору є їхнє використання автоматизованими системами для роботи на складах та у логістичних центрах. Серед них найбільше застосування отримали автоматично керовані транспортні засоби або AGV (Automated Guided Vehicles) і автономні мобільні роботи або AMR (Autonomous Mobile Robots). Головна відмінність між ними полягає у способі навігації. AGV пересуваються за допомогою навігаційних ліній і маркерів і завжди слідує за заздалегідь встановленими маршрутами, в той час як AMR мають більшу адаптивність і свободу пересування і орієнтуються за допомогою датчиків, які допомагають їм будувати карту навколишнього простору, визначати найкоротший маршрут та коригувати його у разі виникнення перешкод. Існує три основні види AGV та AMR — це транспортні візки, вилкові навантажувачі та буксирувальні пристрої. Транспортні візки є роботизованими мобільними платформами, які здійснюють транспортування піддонів з деталями на виробничих об'єктах. Вилкові навантажувачі також виконують функції переміщення об'єктів, проте вони можуть бути налаштовані для роботи з важкими вантажами, вагою до 4 тонн, або операцій з вертикального навантаження на висоту до 8 метрів. Буксирувальники також призначені для транспортування і здатні тягнути за собою один або кілька візків з товарами або деталями, а їхня вантажопідйомність може досягати 8 тонн [3].

Найвідомішою та найпоширенішою моделлю є помаранчевий робот Kiva, який призначений для переміщення великих візків з вантажем у складських приміщеннях.

Такі AGV оснащені двома камерами з системами комп'ютерного зору: перша розташована на верхній частині корпусу і призначена для зчитування штрих-кодів, наклеєних на мобільні стелажі, для отримання інформації про товари, що зберігаються в них, інша розміщена на дні транспортного засобу, вона дозволяє зчитувати спеціальні штрих-коди на підлозі складу, які відповідають за навігацію робота та формують його шлях з однієї точки до іншої.

Технологія, що застосовується в подібних системах, полягає в отриманні двовимірного зображення виробу завдяки USB-камерам. Далі відбувається комп'ютерна обробка зображення та аналіз, у ході якої визначається: належність об'єкта тому чи іншому класу, з огляду на задані ознаки (форма, геометричні розміри, наявність написів, колір, маркування тощо).

Завдання сортування схоже завданню розпізнавання образів і полягає у вимірюванні координат і орієнтації об'єктів. Об'єкти, які мають відносно просту форму, в цьому випадку прямокутну, однозначно характеризуються контуром зображення, що реєструється. Для вирішення завдань оцінки параметрів та розпізнавання, що характеризують орієнтацію та координати таких об'єктів, використовують алгоритми, які базуються на аналізі контурів зображень.

Враховуючи вищезазначене підсумовуємо, що використання систем комп'ютерного зору для розробки автоматично керованих засобів та автономних мобільних роботів у сфері складської логістики є актуальною задачею [4]—[6].

Якщо ж цю задачу розбити на окремі підзадачі, то для її розв'язання потрібно:

- 1) виконати огляд та аналіз використання систем технічного зору у розробці автоматично керованих транспортних засобів та автономних мобільних роботів у сфері складської логістики;
- 2) розробити структурну схему системи;
- 3) розробити програму для розпізнавання прямої лінії за допомогою комп'ютерного зору;
- 4) запропонувати можливі модифікації основної програми, а також розглянути їх основні переваги та недоліки.

Таким чином, *об'єктом дослідження* є процеси, що відбуваються в системах реєстрації та розпізнавання напрямку руху за допомогою комп'ютерного зору.

Метою дослідження є вдосконалення системи реєстрації та розпізнавання напрямку руху мобільного робота за допомогою комп'ютерного зору.

Розробка структурної та електричної схем пристрою

Як основа для реалізації подібних систем найчастіше використовуються одноплатні комп'ютери (Single-Board Computers), мініатюрні самодостатні електронно-обчислювальні пристрої, апаратна частина яких розміщується лише на одній-єдиній електронній платі, за розмірами приблизно

як у сучасної банківської пластикової картки. Таким чином, головною перевагою цих пристроїв є компактність та мобільність. До того ж, подібні мікрокомп'ютери мають задовільну продуктивність, якщо враховувати клас пристрою, і можуть бути використані для вирішення множини різних прикладних завдань. Також варто зауважити на їхню досить низьку вартість і, як наслідок, популярність. Ще одноплатні комп'ютери мають можливість встановлення на них різних операційних систем, що полегшує їхнє використання [7].

Для виявлення прямої лінії використовується веб-камера, яка здійснює захоплення зображення для подальшої передачі на мікрокомп'ютер. Далі відбувається обробка отриманого кадру, і на основі її результатів виробляються керувальні впливи, передані на мікроконтролер, безпосередньо пов'язані з моторами транспортного засобу.

Найпопулярнішою серією одноплатних комп'ютерів на сьогоднішній день вважається RaspberryPi. Для вирішення поставлених завдань зроблено вибір на користь одноплатного комп'ютера RaspberryPi 3 Model B.

Іншим важливим елементом розробленої системи є веб-камера, яка буде здійснювати захоплення зображення для його подальшої передачі на RaspberryPi. Для вирішення поставлених завдань зроблено вибір на користь веб-камери Logitech C270.

Першим етапом розробки схемотехніки електронного пристрою є графічне уявлення сукупності основних ланок об'єкта і зв'язків між ними, тобто складання його структурної схеми.

Структурна схема апаратної частини розробленої системи показана рис. 1.

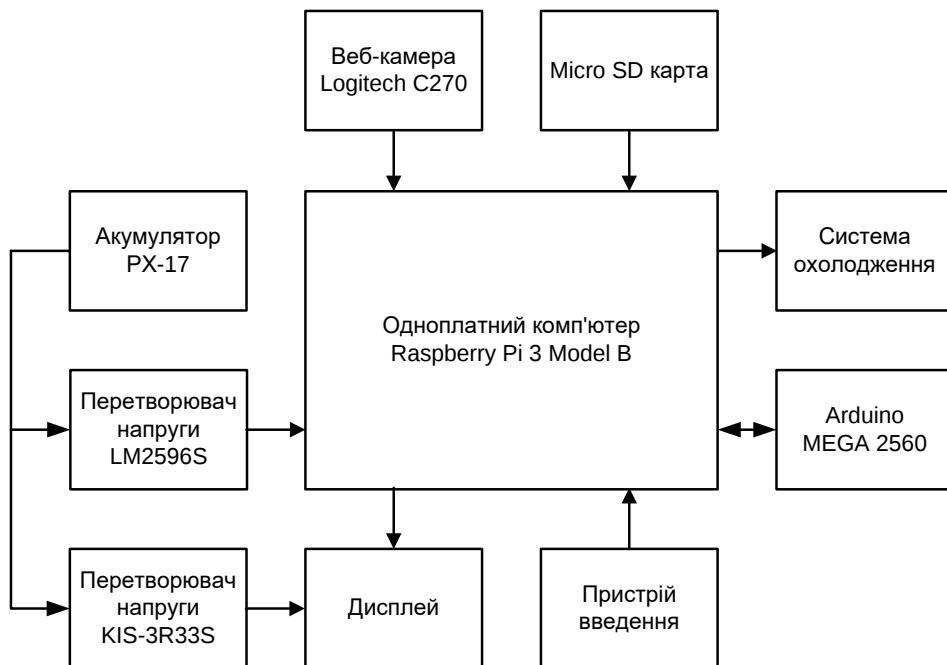


Рис. 1. Структурна схема запропонованої системи

Як видно з рис. 1, розроблена система, складається з десяти основних елементів: комп'ютер RaspberryPi 3 Model B; веб-камера Logitech C270; акумулятора PX-17; перетворювач напруги LM2596S; перетворювач напруги KIS-3R33S; дисплей; microSD карта; Arduino MEGA 2560; пристрої введення (клавіатура та комп'ютерна миша); вентилятор, що здійснює охолодження мікрокомп'ютера.

Як джерело живлення для цієї системи використано літєвий акумулятор PX-17 фірми PowerX з величиною вихідної напруги 11,1В та ємністю 3000 мА·год.

Для того, щоб працювати з інтерфейсом GPIO RaspberryPi 3 Model B, який призначений для забезпечення зв'язку одноплатного комп'ютера з додатковими компонентами (модулями), що підключаються до нього, необхідно детально розібратися в пристрої та призначенні його основних цифрових входів і виходів (пінів). Конфігурація контактів або, інакше кажучи, розпізнавання цього мікрокомп'ютера показано на рис. 2.

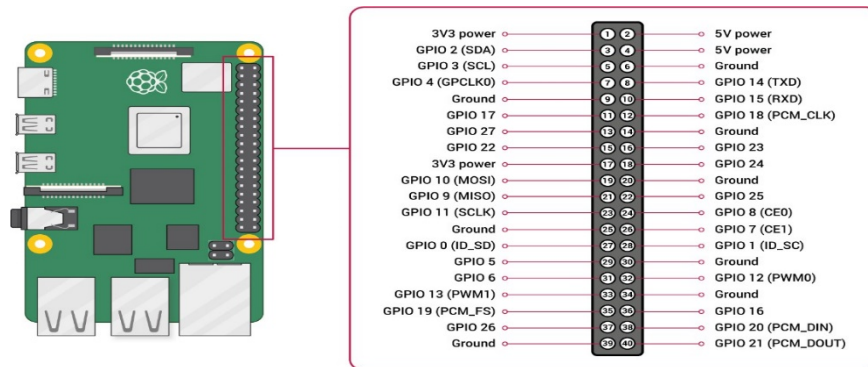


Рис. 2. Розпізнавання RaspberryPi 3 Model B

Число пінів GPIO RaspberryPi 3 Model B дорівнює 40. Всі вони пронумеровані і діляться на три основні групи:

- 1) живлення (на схемах маркуються Power);
- 2) заземлювальні (GND, Ground);
- 3) порти (часто позначаються як GPIO).

Перші необхідні для подачі різних напруг — 3,3 і 5 В, другі — забезпечують спільну точку нульового потенціалу для електричних з'єднань і стабілізують роботу пристрою. Треті ж виступають як інтерфейси, здатні приймати і відправляти сигнали. Саме до них користувач підключає додаткові модулі та периферійні пристрої.

Також варто зауважити, що закладена в центральний процесор логічна нумерація пінів відрізняється від наведеної раніше на фізичній схемі.

Програма для розпізнавання напрямної лінії за допомогою комп'ютерного зору

Програмна частина для системи розпізнавання напрямку руху базується на використанні двох підходів та буде реалізовуватись для розпізнавання яскраво-синьої напрямної лінії за допомогою комп'ютерного зору із застосуванням принципу пошуку об'єкта в колірному просторі HSV з подальшим обчисленням положення системи в просторі та формуванням керувального впливу для корекції траєкторії його руху.

Головною ідеєю першого підходу є розпізнавання двох напрямних ліній шляхом перетворення кольорового кадру з веб-камери у відтінки сірого.

Далі до поточного кадру застосовується розмиття по Гауссу, яке покликане згладити зображення і зменшити шуми. Його принцип дії полягає в тому, що він перевизначає значення яскравості кожного пікселя кадру, що перетворюється, і встановлює його рівним середньозваженому значенню його околу, причому сусідні пікселі надають все менший вплив на вихідний піксель зі збільшенням їх відстані до нього.

Наступним кроком є виділення меж об'єктів на зображенні за допомогою оператора Кенні. Його робота складається з п'яти етапів:

- згладжування зображення — перш ніж кадр буде оброблений алгоритмом виявлення кордонів, до нього автоматично застосовується розмиття Гауссом для зменшення шумів;
- пошук градієнтів зображення — градієнт показує зміну інтенсивності або яскравості пікселів кадру у різних напрямках, для його знаходження використовується оператор Собеля, результатом застосування якого у кожній точці зображення є вектор градієнта у цій точці;
- пригнічення не-максимумів, йдеться про те, що пригнічуються всі точки, які є локальними максимумами градієнта у напрямі;
- подвійна порогова фільтрація зображення, де застосовуються спеціальні порогові значення визначення того, є даний піксель кадру частиною межі об'єкта чи ні, при цьому оператор Кенні використовує два пороги фільтрації. Якщо значення пікселя вище верхньої межі, то він набуває максимального, якщо нижче — піксель пригнічується, а точки зі значеннями, що потрапляють у діапазон між кордонами, набувають фіксованого середнього значення (вони будуть уточнені на наступному етапі), таким чином, чим менший поріг, тим більше меж буде знайдено, але тим сприйнятливішим до шуму стане результат, виділяючи зайві об'єкти на зображенні, тоді високий поріг, навпаки, може проігнорувати деякі краї чи видати неповну межу як фрагментів;
- трасування ділянки неоднозначності, або завдання зводиться до виділення груп пікселів, які

отримали на попередньому етапі проміжне значення, і віднесення їх до кордону (якщо вони з'єднані з одним зі встановлених кордонів), або їхнє придушення (інакше), піксель додається до групи, якщо він стикається з нею по одному з 8 напрямків.

Перевагою такого підходу є отримання більшої кількості даних про положення системи щодо напрямної лінії, що дозволяє точніше налаштувати ПД-регулятор транспортного засобу і, як наслідок, домогтися збільшення плавності його руху та поліпшення проходження ним поворотів.

Після цього на отриманому кадрі виділяється ділянка інтересу, що містить лише покриття з напрямними лініями, а все інше відкидається.

Останнім кроком у процесі обробки зображення, що надходить з веб-камери, є використання перетворення Хафа для знаходження напрямних ліній. Цей алгоритм ґрунтується на поданні прямої в полярних координатах і використовує таке рівняння:

$$r = x \cos \theta + y \sin \theta, \quad (1)$$

де r — довжина нормалі до прямої, проведеної з початку координат; θ — кут між цією нормаллю та віссю абсцис; x та y — координати точки на прямій.

Будь-якій прямій, що проходить через довільну точку (x, y) у прямокутній системі координат, відповідає точка (r, θ) у полярній системі координат. Отже, множині прямих, що проходять через довільну точку (x, y) у прямокутній системі координат, відповідає набір точок (r, θ) у полярній системі координат, який, згідно з рівнянням (1), є синусоїдою, унікальною для цієї точки (x, y) і однозначно її визначає. Таким чином, всі можливі прямі, що проходять через усі точки зображення, можуть бути представлені у вигляді набору синусоїд у полярних координатах. Перетин синусоїд означає, що відповідні їм точки в прямокутних координатах знаходяться на одній прямій. Кожна така пряма записується в спеціальний двовимірний масив, званий акумулятором, рядки/стовпці якого відповідають показникам r і θ . Розмір цього масиву залежить від вибраного кроку для кута θ і максимально можливої довжини нормалі r обмеженою діагоналлю кадру. З цього випливає, чим більше перетинів синусоїд, тим більше відповідних їм точок лежать на тих самих прямих і тим більше записів в акумуляторі належать цим прямим. Тільки за досягнення певної кількості записів пряма вважається виявленою. Далі виявлені напрямні лінії використовуються як основа для побудови навколо них прямокутника, що обертається, орієнтація якого і формує керувальний вплив для коригування траєкторії руху.

Результати всіх перетворень і роботи алгоритму загалом показані на рис. 3. Запропонований метод може бути застосований для позиціонування сучасних автомобілів на проїжджих ділянках або у складських приміщеннях з відповідною розміткою.

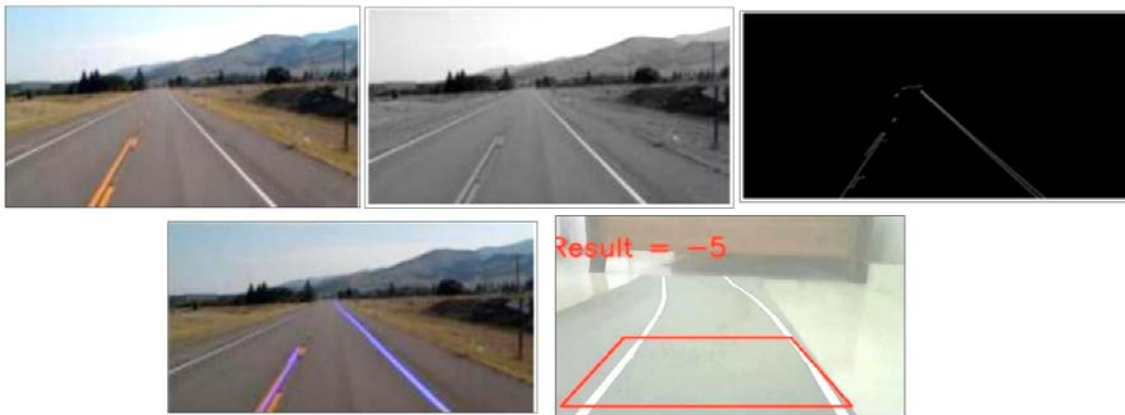


Рис. 3. Результати роботи алгоритму рішення 1

Головною ідеєю другого підходу є використання спеціальних маркерів замість напрямних ліній.

Перевагою підходу з використанням контурів замість моментів зображення є можливість усунення негативного впливу випадкових перешкод і сторонніх об'єктів в кадр та на рух системи.

Для зручнішого аналізу кадрів насамперед необхідно програмно змінити перспективу зображень, що надходять з веб-камери. Результат перетворення перспективи зображення показаний на рис. 4. Далі отриманий кадр перетворюється на простір HSV і проходить колірну сегментацію виявлення напрямних маркерів. Після цього до бінарного зображення застосовується перетворення Хафа. Знайдені лінії використовуються для визначення положення системи у просторі. Всі ці дані потім використовуються для формування керувального впливу та коригування траєкторії

руху. Основний принцип роботи алгоритму показано рис. 5.

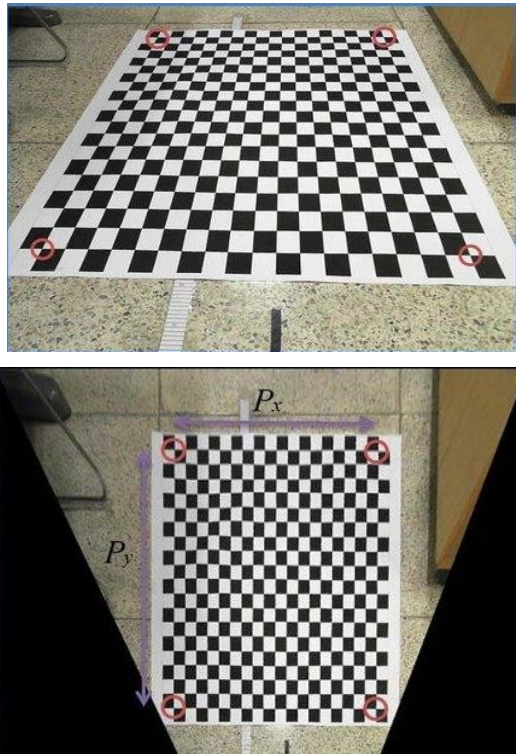


Рис. 4. Результат перетворення перспективи зображення

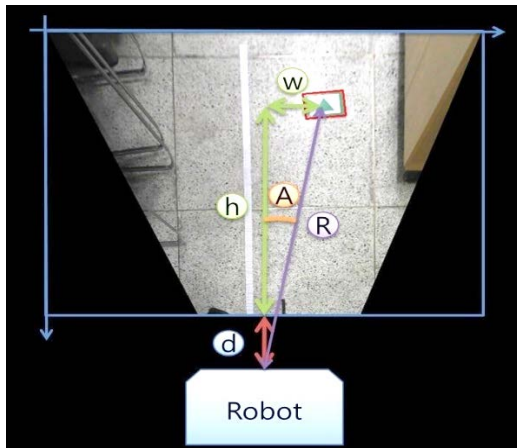


Рис. 5. Принцип роботи алгоритму рішення 2

Блок-схема загального алгоритму роботи програми подана на рис. 6.

Одним зі шляхів поліпшення розробленої програми є додавання додаткових керувальних впливів, що відповідають за детектування відхилень системи від середини напрямної лінії у різних частинах кадру.

Іншим можливим способом поліпшення розробленої програми може бути використання контурів для знаходження середини напрямної лінії замість моментів зображення.

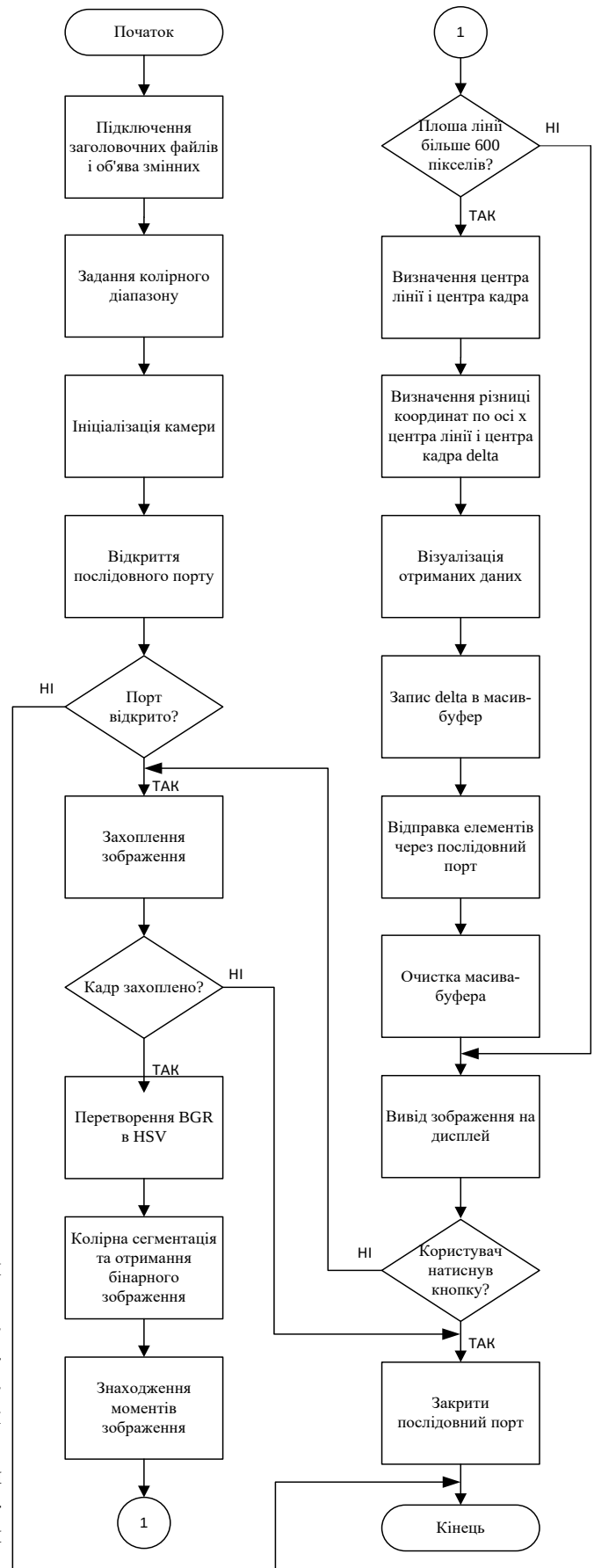


Рис. 6. Блок-схема загального алгоритму роботи програми

Для вирішення поставлених завдань вибрано мову програмування високого рівня C++, бібліотека комп'ютерного зору з відкритим вихідним кодом OpenCV та кросплатформове середовище розробки Code::Blocks [8]—[11].

Висновки

У рамках виконання дослідження розроблено систему реєстрації та розпізнавання напряму руху за допомогою комп'ютерного зору. Для цього, насамперед обґрунтовано актуальність цього дослідження, а далі виконано такі кроки:

- спочатку підтверджено актуальність використання систем комп'ютерного зору для розроблення автоматично керованих систем та автономних мобільних роботів у сфері складської логістики;
- вибрано одноплатний комп'ютер та веб-камеру для розроблюваної системи, після чого створено структурну схему розроблюваної системи та представлено перелік всіх використаних у ній елементів. На основі структурної схеми системи розроблено схему електричних з'єднань.
- розроблено блок-схему алгоритмів передачі та прийому даних по послідовному порту з одноплатного комп'ютера RaspberryPi на мікроконтролер Arduino.

Запропоновано підходи до реєстрації та розпізнавання напряму руху мобільних роботів за допомогою комп'ютерного зору, а також здійснено аналіз використовуваних функцій бібліотеки OpenCV.

На подальшому етапі дослідження планується розробка, за необхідності, можливих модифікацій основної програми, що реалізують запропоновані методи.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] В. В. Смолій, Я. А. Савицька, М. Д. Місюра, і В. В. Шкарупило, *Навчальний посібник з дисципліни Системи візуалізації та розпізнавання образів*. Київ, Україна: ФОП Ямчинський О. В., 2020, 200 с.
- [2] С. М. Вовк, В. В. Гнатушенко, і М. В. Бондаренко, *Методи обробки зображень та комп'ютерний зір*. Дніпро, Україна: «ЛІРА», 2016, 148 с.
- [3] С. В. Бодяньський, Д. Д. Пелешко, О. А. Винокурова, С. В. Машталір, і Ю. С. Іванов, *Аналіз та обробка потоків даних засобами обчислювального інтелекту*, моногр. Львів, Україна: вид-во Львівської політехніки, 2016, 236 с.
- [4] А. С. Довбиш, і І. В. Шелехов *Основи теорії розпізнавання образів*, навч. посіб. у 2 ч. Суми, Україна: Сумський державний університет, 2015, ч. 1, 109 с.
- [5] О. М. Березький, та ін., *Методи, алгоритми і програмні засоби опрацювання біомедичних зображень*. Тернопіль, Україна: Економічна думка, ТНЕУ, 2017, 330 с.
- [6] Ю. М. Рашкевич, Р. О. Ткаченко, І. Г. Цмоць, і Д. Д. Пелешко, *Нейроподібні методи, алгоритми та структури обробки сигналів і зображень у реальному часі*, моногр. Львів, Україна: вид-во Львівської політехніки, 2017, 256 с.
- [7] K. William Pratt, *Digital image processing*, Third Edition. John Wiley & Sons, Inc., 2019, 723 с.
- [8] R. J. Shalkoff, *Digital image processing and computer vision*, New York-Chichester-Brisbane-TorontoSingapore: John Wiley & Sons, 1989, 489 p.
- [9] *Contours in Open CV*. Retrieved May 1, 2018, [Electronic resource]. Available: https://docs.opencv.org/3.0-beta/doc/py_tutorials/py_imgproc/py_contours/py_contours_begin/py_contours_begin.html#contours-getting-started.
- [10] *Color Detection & Object Tracking*. [Electronic resource]. Available: <https://www.opencv-srf.com/2010/09/object-detection-using-color-seperation.html>. Accessed 20.11.2023.
- [11] Davies, *ER Computer and Machine Vision: Theory, Algorithms, Practicalities*, ER Davies. Oxford: Academic Press is imprint of Elsevier, 2012. ISBN: 978-0-12-386908-1.

Рекомендована кафедрою обчислювальної техніки ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 27.02.2025

Колесник Ірина Сергіївна — канд. техн. наук, доцент кафедри обчислювальної техніки, e-mail: iskolesnyk@gmail.com ;

Городецька Оксана Степанівна — канд. техн. наук, доцент кафедри обчислювальної техніки, e-mail: horodecka.os@gmail.com ;

Добровольська Наталія Вікторівна — канд. пед. наук, доцент кафедри обчислювальної техніки, e-mail: natali0212@ukr.net .

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

I. S. Kolesnyk¹
O. S. Gorodetska¹
N. V. Dobrovolska¹

Computer Vision Direction System

¹Vinnitsia National Technical University

One of the most relevant areas of development of artificial intelligence in recent years has become computer vision. The ability to see is the most important property of a person. It is with the help of vision that we receive the greatest amount of information about the world around us.

Thanks to the accumulated experience and knowledge, we easily recognize objects and distinguish them from each other, navigate in space. Over time, the idea arose to endow artificial intelligence with vision. However, despite the fact that modern computers have long surpassed humans in the field of computing and information processing, image analysis was rather important task for them.

Many things that only a few decades ago could only be found in science fiction literature have become an integral part of our lives today. For a modern person, there is nothing surprising in the fact, that robots work instead of workers in advanced automated factories, driverless cars drive on city roads, and artificial neural networks create masterpieces that are not inferior to the works of professional artists.

The areas of application of computer vision are quite extensive: from industrial means of monitoring technical processes to autonomous control systems that make decisions based on the analysis of the received video information.

One of the most promising areas is the use of computer vision systems in automated logistics systems.

A striking example of this is the widespread use of transport robots by large modern companies, which ensure the movement of goods in an industrial environment without the participation of an operator. These machines are used in enterprises to transport raw materials — from warehouse to workshop, blanks — between production stages, finished products from production to warehouse and from warehouse to shipment. The use of such vehicles allows you to reduce transportation costs associated with the human factor and loss of time, increase safety at the enterprise, and speed up production processes.

Keywords: HSV, computer vision, robot, OpenCV, USB camera.

Kolesnyk Iryna S. — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor of the Chair of Computer Engineering, e-mail: iskolesnyk@gmail.com ;

Horodetska Oksana S. — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor of the Chair of Computer Engineering, e-mail: horodecka.os@gmail.com ;

Dobrovolska Nataliya V. — Cand. Sc. (Ped.), Associate Professor of the Chair of Computer Engineering, e-mail: natali0212@ukr.net