

УДК 004.775:625.75

Н.В. ВАЛЬКО, Т.О. БОЛГАРІН

Херсонський державний університет

К.В. ВАЛЬКО

Київський національний університет ім. Т.Г.Шевченка

АЛГОРИТМ ВИЗНАЧЕННЯ ШЛЯХУ ДЛЯ АВТОНОМНОГО РУХУ БЕЗПІЛОТНОГО ТРАНСПОРТУ ПО ЛІНІЇ

Створення роботизованих систем та їх програмування представляють мультидисциплінарну сферу, що є підрозділами алгоритмів штучного інтелекту та машинного навчання. Все більш популярною стає тенденція, коли лідери автомобільної промисловості випускають автомобілі з технологією автономного керування. Такі транспортні засоби є більш безпечними, їх використання сприяє зменшенню кількості ДТП, та, відповідно, рівня травматизму. Також вони використовуються як одне з рішень в логістичних задачах «останньої милі» - складність, яка пов'язана з останнім етапом доставки. На сучасному етапі розвитку технологій актуальним є розвиток систем штучного інтелекту і автоматизація таких процесів. Задача автономного керування транспортом потребує використання спеціалізованих методів і загальних алгоритмів машинного навчання, зокрема комп'ютерного зору, що базується на обробці зображень. В статті представлено алгоритм визначення шляху автономного руху безпілотного транспорту по лінії. Розглянуті існуючі методи обробки зображень, алгоритми їх застосування та проблеми, які виникають при обробці зображень. Представлений алгоритм для пошуку шляху на зображенні з камери був апробований на комп'ютерній моделі автомобіля. Такий автомобіль був підготовлений для змагань моделей з автономним керуванням в рамках змагань Robotraffic. Стояло завдання підвищити ефективність функціонування наявних датчиків за допомогою додаткового обладнання у вигляді зовнішньої камери. Відеодані повинні були оброблятися програмно для визначення шляху для автономного руху транспорту. Був створений алгоритм, який працює за принципом дискретизації всього шляху на частини, кожна з яких обробляється окремо. Обробка частини представляє собою усереднення бінарної інформації про ширину шляху: ширина сегменту шляху повинна бути більше ніж наступний сегмент. Усі сегменти в остаточному представленні комбінуються у дерево шляхів з яких обирається один для подальшого руху. алгоритм можна легко модифікувати на віддавання пріоритету лівим або правим шляхам. Алгоритм забезпечує досить швидкий пошук шляху. Усі розрахунки ведуться в режимі реального часу. Перевагами є простота та швидкодія. Тому алгоритм можна використовувати для створення системи автономного керування моделями автомобілів. Представлений алгоритм можна використовувати для створення більш точної системи для керування автономними моделями автомобілів, а також для створення власних систем допомоги керування реальним транспортом з використанням камери та міні комп'ютерів. Також одним із наступних завдань є розробка системи для виявлення дорожніх знаків на зображенні.

Ключові слова: автономний рух; моделювання; алгоритм; безпілотний транспорт; розпізнавання.

Н.В. ВАЛЬКО, Т.А. БОЛГАРИН
Херсонский государственный университет
К.В. ВАЛЬКО

Киевский национальный университет им.Т.Г.Шевченко

АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПУТИ ДЛЯ АВТОНОМНОГО ДВИЖЕНИЯ БЕСПИЛОТНОГО ТРАНСПОРТА ПО ЛИНИИ

Создание роботизированных систем и их программирование представляют мультидисциплинарную сферу, являются подразделениями алгоритмов искусственного интеллекта и машинного обучения. Все более популярной становится тенденция, когда лидеры автомобильной промышленности выпускают автомобили с технологией автономного управления. Такие транспортные средства являются более безопасными, их использование способствует уменьшению количества ДТП и, соответственно, уровня травматизма. На современном этапе развития технологий актуальным является развитие систем искусственного интеллекта и автоматизация таких процессов. Задача автономного управления транспортом требует использования специализированных методов и общих алгоритмов машинного обучения, в частности компьютерного зрения, основанной на обработке изображений. В статье представлены алгоритм определения пути автономного движения беспилотного транспорта по линии. Представленный алгоритм для поиска пути на картинке с камеры был апробирован на компьютерной модели автомобиля. Рассмотрены существующие методы обработки изображений, алгоритмы их применения и проблемы, возникающие при обработке изображений. Представленный алгоритм для поиска пути по картинке с камеры был апробирован на компьютерной модели автомобиля. Такой автомобиль был подготовлен для соревнований моделей с автономным управлением в соревнованиях Robotraffic. Стояла задача повысить эффективность функционирования имеющихся датчиков с помощью дополнительного оборудования в виде внешней камеры. Видеоданные должны были обрабатываться программно для определения пути для автономного движения транспорта. Был создан алгоритм, который работает по принципу дискретизации всего пути на части, каждая из которых обрабатывается отдельно. Обработка части представляет собой усреднение бинарной информации о ширине пути: ширина сегмента пути должна быть больше чем следующий сегмент. Все сегменты в конечном представлении комбинируются в дерево путей из которых избирается один для дальнейшего движения. алгоритм можно легко модифицировать для приоритета по левым или правым путям. Алгоритм обеспечивает достаточно быстрый поиск пути. Все расчеты ведутся в режиме реального времени. Преимуществами являются простота и быстроедействие. Алгоритм можно использовать для создания системы автономного управления моделями автомобилей. Представленный алгоритм можно использовать для создания более точной системы для управления автономными моделями автомобилей, а также для создания собственных систем помощи управления реальным транспортом с использованием камеры и мини компьютеров. Также одним из следующих задач является разработка системы для выявления дорожных знаков на изображении.

Ключевые слова: автономное движение; моделирование; алгоритм, беспилотный транспорт; распознавание.

N.V. VALKO, T.O. BOLGARIN

Kherson State University

K.V. VALKO

T. Shevchenko National University of Kyiv

ALGORITHM FOR DETERMINING THE PATH FOR AUTONOMOUS MOVEMENT OF UNMANNED VEHICLES ALONG THE LINE

Creating robotic systems and their programming represents a multidisciplinary field, they are subdivisions of artificial intelligence algorithms and machine learning. An increasingly popular trend is for the leaders of the automotive industry to produce vehicles with autonomous driving technology. Such vehicles are safer, their use helps to reduce the number of accidents and, accordingly, the level of injuries. The same stench is vicious as one of the solutions in the logistic tasks of 'the last mile' – folding, which is tied to the last stage of delivery. At the present stage of technology development, the development of artificial intelligence systems and the automation of such processes are relevant. The problem of autonomous vehicle control requires using specialized methods and general algorithms for machine learning, in particular, computer vision based on image processing. The article presents an algorithm for determining the path for autonomous movement of unmanned vehicles along the line. Existing methods of image processing, algorithms for their application and problems arising in image processing are considered. The presented algorithm for finding a path from a picture from a camera was tested on a computer model of a car. Such a car was prepared for the autonomous model competition in the Robottraffic competition. The task was to increase the efficiency of the existing sensors using additional equipment in the form of an external camera. The video data had to be processed programmatically to determine the path for autonomous traffic. An algorithm was created that works on the principle of sampling the entire path into parts, each of which is processed separately. Part processing is an averaging of binary information about the path width: the path segment width must be greater than the next segment. All segments in the final presentation are combined into a tree of paths from which one is selected for further movement. the algorithm can be easily modified for left or right path priority. The algorithm provides a fairly fast path finding. All calculations are carried out in real time. The advantages are simplicity and speed. The algorithm can be used to create an autonomous control system for car models. The presented algorithm for finding a path in a picture from a camera was tested on a computer model of a car. The presented algorithm can be used to create a more accurate system for controlling autonomous car models, as well as to create your own systems for helping to control real transport using a camera and mini computers. Also one of the next tasks is to develop a system for identifying road signs in the image.

Keywords: autonomous movement; modeling; algorithm; unmanned vehicles; recognition.

Постановка проблеми

Одним з найбільш затребуваних на сьогодні напрямів досліджень і розробок є робототехніка, яка орієнтована на створення роботів і робототехнічних систем, призначених для автоматизації складних технологічних процесів і операцій, у тому числі таких, що виконуються в недетермінованих умовах, для заміни людини під час виконання важких, утомливих і небезпечних робіт. Прикладом є роботизовані автомобілі, які будуть реагувати швидше, ніж люди, уникаючи нещасних випадків, потенційно зберігаючи тисячі життів.

З огляду на практичну потребу розвитку інноваційних напрямів технологій, популяризації науково-технічної творчості, робототехніки, електроніки, створення і

програмування роботизованих систем, які в довгостроковій перспективі будуть реалізовуватися в реальних системах, зокрема, з метою скорочення кількості автомобільних аварій, було обрано тему дослідження.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Щоб дістатися до пункту призначення, безпілотний автомобіль має знати маршрут, розуміти довкілля, дотримуватись ПДР та коректно взаємодіяти з іншими учасниками дорожнього руху. Щоб відповідати зазначеним вимогам, безпілотник використовує різні пристрої та технології: камери, радары, лазерні далекоміри, GPS навігатори та, звісно, штучний інтелект. За допомогою камер відбувається візуальне виявлення об'єктів, наприклад, дорожньої розмітки та знаків.

Комп'ютерний зір - це область дослідження, орієнтована на проблему допомоги комп'ютерам «бачити». Це мультидисциплінарна сфера, яку можна назвати підрозділом штучного інтелекту та машинного навчання, що може включати використання спеціалізованих методів і використання загальних алгоритмів навчання.

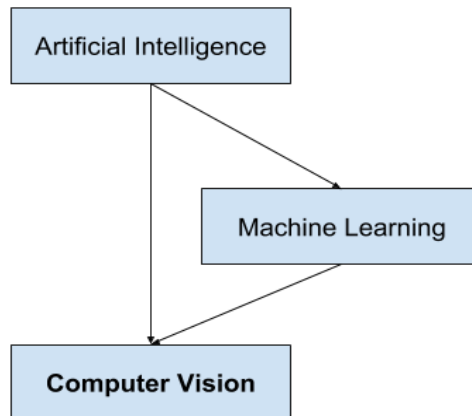


Рис. 1. Огляд відношення штучного інтелекту та комп'ютерного зору.

Комп'ютерний зір відрізняється від обробки зображень, оскільки обробка зображень – це процес створення нового зображення з існуючого зображення. Це тип цифрової обробки сигналів і не пов'язаний з розумінням змісту зображення.

Система комп'ютерного зору може вимагати, щоб обробка зображення застосовувалася до вхідних даних, наприклад, попередня обробка зображень.

Приклади обробки зображень включають:

- Нормалізацію фотометричних властивостей зображення, наприклад яскравості або кольору.
- Обрізку меж зображення, наприклад, центрування об'єкта на фотографії.
- Видалення цифрового шуму з зображення, наприклад цифрових артефактів з низьким рівнем освітлення.

Існуючі методи вирішення завдання обробки зображень комп'ютерного зору ефективні тільки для окремих об'єктів, таких як прості геометричні об'єкти (наприклад, багатогранники), людські обличчя, друковані або рукописні символи, автомобілі і тільки в певних умовах, зазвичай це певне освітлення, фон і положення об'єкта відносно камери. У [1] описані наступні проблем розпізнавання:

- Розпізнавання: один або кілька попередньо заданих або вивчених об'єктів або класів об'єктів можуть бути розпізнані, зазвичай разом з їх двовимірним положенням на зображенні або тривимірним положенням на сцені.

- Ідентифікація: розпізнається індивідуальний екземпляр об'єкта. Приклади: ідентифікація певного людського обличчя або відбитку пальців або автомобіля.
- Виявлення: відеодані перевіряються на наявність певної умови. Наприклад, виявлення можливих неправильних клітин або тканин в медичних зображеннях. Виявлення, засноване на відносно простих і швидких обчисленнях іноді використовується для знаходження невеликих ділянок у вже проаналізованому зображенні, які потім аналізуються за допомогою прийомів, більш вимогливих до ресурсів, для отримання правильної інтерпретації.

Мета дослідження

Мета дослідження – створення комп'ютерної моделі визначення шляху для автономного руху безпілотного транспорту по лінії за допомогою технології комп'ютерного зору.

Викладення основного матеріалу дослідження

Існує багато різних методів та їх варіацій для визначення шляху на фото або у відео потоку для автономних транспортних засобів. Найбільш розповсюдженим методом для розпізнавання розмітки є метод, який базується на детекторі границь Кенні та перетворення Хафа [2–3] для пошуку на зображенні прямих, які задовольняють умовам.

Перш за все, зображення роблять бінарним, тобто повнокольорове або зображення в градаціях сірого перетворюють в монохромне, де присутні тільки два типи пікселів (темні і світлі). Це має велике значення при розпізнаванні образів. Прикладом бінарних об'єктів є штрих-коди, текст, креслення, дорожня розмітка і т.п. Порогові методи бінаризації працюють з повним зображенням, знаходячи якусь характеристику (поріг), що дозволяє розділити всі зображення на чорне і біле. Адаптивні методи працюють з ділянками зображень і використовуються при неоднорідному освітленні об'єктів.

Після цього до зображення застосовується детектор границь Кенні. Це алгоритм оптимального визначення меж, який розраховує градієнти інтенсивності зображення, а потім за допомогою двох порогів видаляє слабкі кордони, залишаючи ті, які задовольняють умовам. Після визначення границь до зображення застосовується перетворення Хафа, за допомогою якого отримують набір ліній, які потім об'єднують у розмітку враховуючи деякі умови.

Метод зіставлення з шаблоном шукає точне співпадіння точок шаблону з точками зображення. Якщо зображення повернуто чи зі зміненим розміром щодо параметрів шаблону то цей метод працює погано. Для подолання цих обмежень застосовують методи засновані на так званих особливих точках.

Особлива точка (key point) - невелика область, яка істотно виділяється на зображенні. Існує кілька методів визначення таких точок, це можуть бути кути (Harris corner detector) [4] або BLOB (Blob detection) [5], тобто невеликі області однакової яскравості, досить чітким кордоном, що виділяються на загальному тлі.

Для особливої точки обчислюють так званий дескриптор - характеристику особливої точки. Дескриптор обчислюють за заданою околицею особливої точки, як напрямки градієнтів яскравості різних частин цієї околиці. Існує кілька методів розрахунку дескрипторів для особливих точок: SIFT[6], SURF[7], ORB[8] і ін. Треба зазначити, що деякі методи розрахунку дескрипторів є запатентованим (наприклад SIFT) і їх комерційне використання обмежене.

Особливі точки можна застосовувати для пошуку об'єкта на зображенні. Для цього нам необхідно мати зображення шуканого об'єкта і далі виконати наступні дії.

1. На зображенні з об'єктом шукаємо особливі точки об'єкта і обчислюємо їх дескриптори.

2. На уже згадуваному зображенні теж шукаємо особливі точки і обчислюємо для них дескриптори.

3. Порівнюємо дескриптори особливих точок об'єкта та дескриптори особливих точок, знайдених на зображенні.

4. Якщо знайдено достатню кількість відповідностей то помічаємо область з відповідними точками.

Для того, щоб успішно розв'язати задачу пошуку об'єктів на відео, її можна розділити на три підзадачі:

- виявлення (detection) - виділяємо області на зображенні, які можуть містити цікавий для нас об'єкти,
- розпізнавання (recognition) - уточнюємо типи знайдених об'єктів,
- супровід (tracking) - локалізація на наступних кадрах розпізнаних об'єктів.

Гістограма спрямованих градієнтів (Histogram of Oriented Gradients, HOG) [9] – метод вилучення ознак із зображень, який дуже схожий на метод обчислення дескрипторів SIFT для особливих точок, тільки обчислюємо його не для околиці особливої точки, але для всього зображення. Загальна схема обчислення HOG виглядає наступним чином. Картинка розділяється на частини (осередки), для кожного осередку будуюмо гістограму напрямків градієнта яскравості, далі гістограми осередків нормуються по контрасту і об'єднуються.

Для формування характеристики зображення використовують кілька різних ознак Хаара, у кожного будуть свої параметри - розмір області для обчислення ознаки, кількість частин, позиція на зображенні.

На основі ознак Хаара побудований метод Віюлі-Джонса [10], який часто використовують для локалізації зображення осіб на фотографіях. Він об'єднує в собі ознаки Хаара, класифікатор AdaBoost [11] і метод ковзного вікна для поділу картини на частини.

Викладення основного матеріалу дослідження

Для створення віртуального середовища з автомобілем було використано ігровий рушій Unity 3D. Цей рушій було обрано як найбільш простий та здатний симулювати елементарну механіку автомобіля. Також було створено об'єкт камера та прикріплено його до моделі автомобіля.

Для обробки зображення з камери було обрано мову програмування Python 3 та бібліотеки:

- numpy - дозволяє більш швидко працювати з багатовимірними масивами
- opencv - має широкий спектр інструментів для CV

Фінальна система працює таким чином (рис. 2.):

1. Камера з автомобіля отримує зображення.
2. Зображення передається у систему обробки, написану мовою Python.
3. Проводиться пошук шляху на зображенні.
4. Результати повертаються назад до системи керування автомобіля.
5. Виконується керування транспортним засобом на основі результатів аналізу зображення.
6. Повертаємось до п.1.

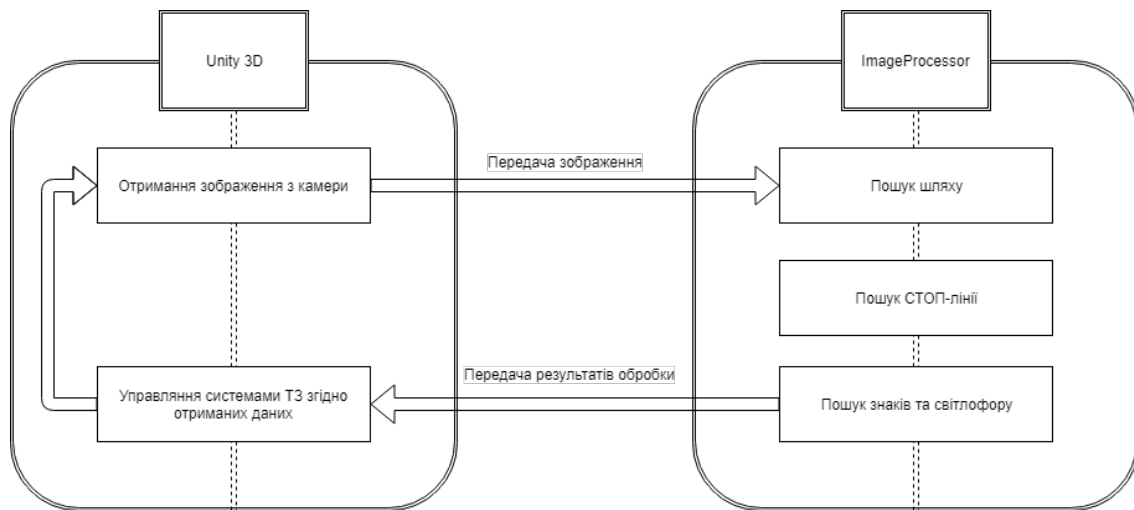


Рис. 2. Схема функціонування системи.

Для вирішення задачі пошуку шляху на фото було зроблено спробу створити власний алгоритм, перевагами якого будуть: швидкість, точність, «далекоглядність» (алгоритм може розраховувати шлях на кілька кроків вперед).

Як результат, було розроблено власний алгоритм для пошуку шляху на зображенні з камери.

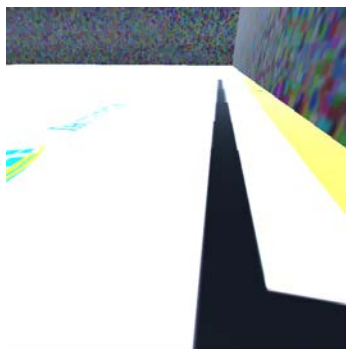


Рис. 3. Приклад зображення з камери.



Рис. 4. Відтінки сірого зображення.



Рис. 5. Стиснення та бінаризація зображення.

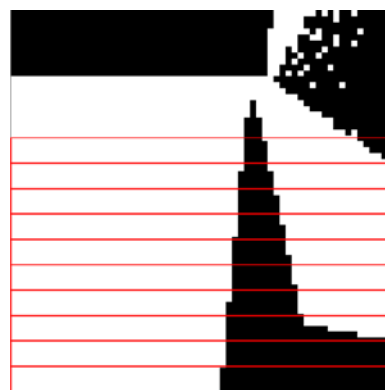


Рис. 6. Поділ зображення на сегменти.

Цей алгоритм працює за принципом дискретизації всього шляху на частини. Роботу алгоритму можна описати наступними кроками:

1. Отримуємо кольорове зображення з камери. (рис. 3)
2. Переведення зображення у відтінки сірого. (рис.4)

3. Зменшення розмірів зображення для прискорення роботи алгоритму. (рис.5)
4. Бінаризація зображення за допомогою алгоритму адаптивного порогу, для того щоб зменшити вплив освітлення.
5. Розбиваємо отримане зображення на горизонтальні частини висотою h пікселей. Чим більше буде висота полоси тим менш імовірним буде вплив шуму на зображенні. (рис.6)
6. На кожній частині шукаємо потенційні сегменти шляху. Пошук проводимо за припущенням що ширина сегменту шляху повинна бути більше ніж наступний сегмент.
7. Комбінуємо усі потенційні сегменти у дерево шляхів частина за частиною за наступними умовами:
 - а. Центр дочірнього сегмента має бути у межах батьківського сегменту.
 - б. Довжина дочірнього сегмента може бути більшою або дорівнювати довжині батьківського.

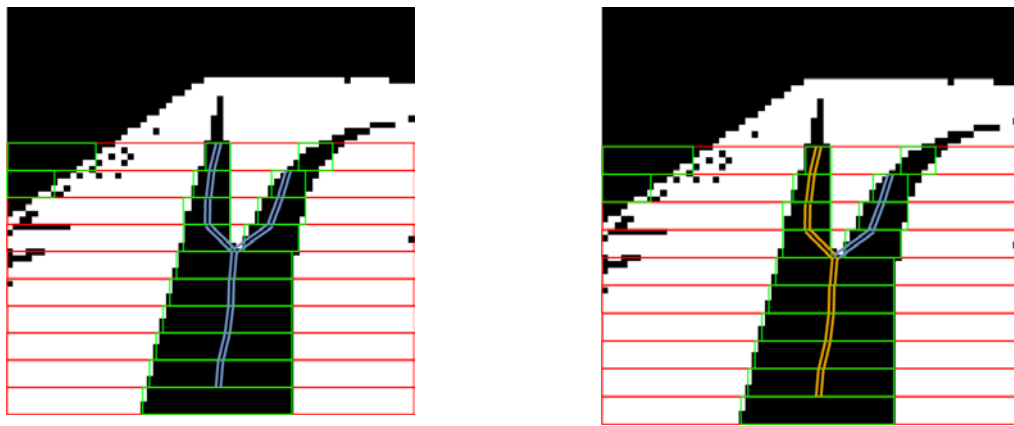


Рис. 7. Побудова і вибір гілки шляху для роздоріжжя.

8. В отриманому дереві шукаємо такий шлях, який задовольняє таким умовам (рис.7):
 - а. Кількість сегментів більша ніж n .
 - б. Зважений центр сегментів шляху знаходиться найближче до центру зображення. Однак алгоритм можна легко модифікувати на віддавання пріоритету лівим або правим шляхам.

Результат роботи розробленого алгоритму, вибір певного шляху на роздоріжжі, представлено на рис. 8.

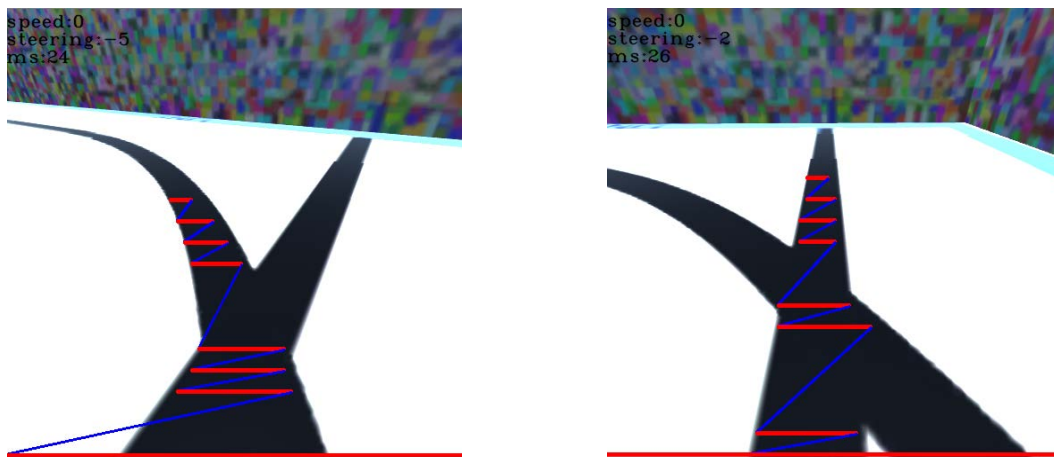


Рис. 8. Результат роботи алгоритму.

Даний алгоритм забезпечує досить швидкий пошук шляху, в межах 20-30 мс. Даний алгоритм було реалізовано на комп'ютерній моделі автомобіля. Віртуальна модель автомобіля успішно проїжджала запропоновані маршрути, повертаючи кермо на певний кут, який обчислювався відповідно до знайденого шляху.

Висновки

За результатами дослідження можна зробити наступні висновки:

1. Проаналізовано сучасні системи автономного керування транспортним засобом та визначено засоби отримання інформації для автономної моделі автомобіля.
2. Визначено методи комп'ютерного зору для моделювання руху транспортного засобу по лінії та розпізнавання об'єктів на зображенні.
3. Спроековано та розроблено модель автономного руху транспортного засобу по лінії з використанням технології комп'ютерного зору, який рухається за траєкторією, яка розраховується у реальному часі.

Представлений алгоритм можна використовувати для створення більш точної системи для керування автономними моделями автомобілів, а також для створення власних систем допомоги керування реальним транспортом з використанням камери та кишенькових комп'ютерів. Також одним із наступних завдань є розробка системи для виявлення дорожніх знаків на зображенні.

Список використаної літератури

1. Xiao B., Cheng J., Hancock E. R. Graph-Based Methods in Computer Vision: Developments and Applications. Hershey: IGI Global. 2013. 395 p. DOI: 10.4018/978-1-4666-1891-6.
2. Canny J. A computational approach to edge detection. *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*. 1986. Vol. PAMI-8 . Issue 6. P. 679–698.
3. Iannino A. Hough transform theory and image processing experiments. Hoboken: Stevens Institute of Technology, 1980. 231 p.
4. Harris C. G., Stephens M. A Combined Corner and Edge Detector. *Proceedings of the Alvey Vision Conference* (UK, Manchester, 31 August – 2 September, 1988), pp. 23.1–23.6. DOI:10.5244/C.2.23
5. Mikolajczyk K., Schmid C. Scale & Affine Invariant Interest Point Detectors. *International Journal of Computer Vision*. 2004. Vol. 60. Issue 1. P. 63–86.
6. Lowe David G. Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints. *International Journal of Computer Vision*. 2004. Vol. 60. Issue 2. P. 91–110. DOI:10.1023/B:VISI.0000029664.99615.94.
7. Bay H., Tuytelaars T., Van Gool L. Surf: Speeded up Robust Features. *Proceedings of the European Conference on Computer Vision*. (Austria, Graz, May 7-13, 2006). Berlin, Heidelberg: Springer, 2006. P. 404–417.
8. Гончаренко М. О. Сравнительный анализ методов формирования дескрипторов изображений в контексте задачи сегментации видеопотока. *Бионика Интеллекта*. 2015. № 2 (85). С. 90–94.
9. Deore S. P., Pravin A. Histogram of Oriented Gradients Based Off-Line Handwritten Devanagari Characters Recognition Using SVM, K-NN and NN Classifiers. *Revue d'Intelligence Artificielle*. 2019. Vol. 33. № 6. P. 441–446.
10. Сосновський В. А., Хлевний А. О. Аналіз та дослідження основних методів розпізнавання обличчя. *Computer-Integrated Technologies: Education, Science, Production*. 2019. № 35. С. 192–197.
11. Rojas R. AdaBoost and the Super Bowl of Classifiers a Tutorial Introduction to Adaptive Boosting. Berlin: Freie University, 2009. 6 p.

References

1. Xiao, B., Cheng, J., Hancock, & E. R. (2013). Graph-Based Methods in Computer Vision: Developments and Applications. Hershey: IGI Global. DOI: 10.4018/978-1-4666-1891-6.
2. Canny, J. (1986). A computational approach to edge detection. *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*. **PAMI-8**, 6, 679–698.
3. Iannino, A. (1980). Hough transform theory and image processing experiments. Hoboken: Stevens Institute of Technology.
4. Harris, C. G., & Stephens, M. (1988). A Combined Corner and Edge Detector. Proceedings of the *Alvey Vision Conference* (UK, Manchester, August 31 – September 2, 1988), pp. 23.1–23.6. DOI:10.5244/C.2.23.
5. Mikolajczyk, K., & Schmid, C. (2004). Scale & Affine Invariant Interest Point Detectors. *International Journal of Computer Vision*. **60**, 1, 63–86.
6. Lowe, David G. (2004). Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints. *International Journal of Computer Vision*. **60**, 2, 91–110. DOI:10.1023/B:VISI.0000029664.99615.94.
7. Bay, H., Tuytelaars, T., & Van Gool, L. (2006). Surf: Speeded up Robust Features. Proceedings of the *European Conference on Computer Vision*. (Austria, Graz, May 7-13, 2006). Berlin, Heidelberg: Springer, pp. 404–417.
8. Goncharenko, M. O. (2014). Sravnitelnyiy analiz metodov formirovaniya deskriptorov izobrazheniy v kontekste zadachi segmentatsii videopotoka. *Bionika Intellekta*. **2** (85), 90–94.
9. Deore, S. P., & Pravin, A. (2019). Histogram of Oriented Gradients Based Off-Line Handwritten Devanagari Characters Recognition Using SVM, K-NN and NN Classifiers. *Revue d'Intelligence Artificielle*. **33**, 6, 441–446.
10. Sosnovskiy, V., & Khlevniy, A. (2019). Analiz ta doslidzhennia osnovnykh metodiv rozpoznavannia oblychchia. *Computer-Integrated Technologies: Education, Science, Production*. 35, 192–197.
11. Rojas, R. (2009). AdaBoost and the Super Bowl of Classifiers a Tutorial Introduction to Adaptive Boosting. Berlin: Freie University.

Валько Наталія Валеріївна – к.ф.-м.н., доцент, доцент кафедри інформатики, програмної інженерії та економічної кібернетики Херсонського державного університету, e-mail: valko@ksu.ks.ua, ORCID: 0000-0003-0720-3217.

Болгарін Тимофій Олександрович – магістрант спеціальності 121 – Інженерія програмного забезпечення, Херсонський державний університет, e-mail: Timofey45.16.95@gmail.com, ORCID: 0000-0001-6026-7573.

Валько Катерина Віталіївна – студентка бакалавріату спеціальності 122 – Комп'ютерні науки, Київський Національний університет ім. Т.Г. Шевченка, e-mail: Katerynavalko@gmail.com, ORCID: 0000-0002-9746-018X.