

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

УДК 629.3:004.415.3

Я. Д. ОСТАПЕЦЬ^{1*}

^{1*}Каф. «Електронні обчислювальні машини», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 89, ел. пошта oyag@i.ua, ORCID 0000-0003-1976-5188

Експериментальна оцінка ефективності використання візуальних міток для керування безпілотними транспортними засобами

Мета. Дослідження спрямовано на експериментальну оцінку ефективності використання візуальних міток, а саме маркерів ARToolKitPlus, ArUco і двовимірних кодів типу QR (quick response code) у задачах локалізації безпілотних транспортних засобів (БТЗ) всередині приміщень. **Методика.** Для можливості реалізації процесів локалізації та сприйняття безпілотних транспортних засобів на основі візуальних міток (маркерів) розроблено структуру підсистеми обробки візуальних міток. Запропоновано алгоритм сумісного використання візуальних міток трьох типів – маркерів ARToolKitPlus, ArUco і кодів QR – для локалізації безпілотних транспортних засобів та ідентифікації вантажу на прикладі сценарію роботи складу інтернет-магазину. Для проведення експериментів над маркерами обрано такий апаратно-програмний засіб, як «розумна» камера машинного зору JeVois–A33 з програмним модулем JeVois Markers Combo та графічним інтерфейсом JeVois Inventor. **Результати.** Проведено експериментальне дослідження можливості коректного розпізнавання візуальних міток для умов роботи в приміщеннях. У результаті серії експериментів визначено можливості коректного розпізнавання візуальних міток типу маркерів ArUco, ARToolKitPlus та кодів QR під час сканування під прямим кутом відносно камери на відстані в діапазоні від 0,3 до 2 метрів. **Наукова новизна.** У дослідженні отримано значення ймовірностей коректного розпізнавання маркерів ArUco, ARToolKitPlus та двовимірних кодів QR в умовах локалізації безпілотних транспортних засобів усередині приміщень. **Практична значимість.** Отримані результати дослідження можна застосовувати під час створення, імітаційного моделювання та аналізу ефективності алгоритмів локалізації та сприйняття безпілотних транспортних засобів усередині приміщень із використанням відповідних візуальних міток (маркерів). Запропонована узагальнена структура підсистеми обробки візуальних міток системи локалізації та сприйняття може бути використана під час розробки систем керування безпілотними транспортними засобами.

Ключові слова: безпілотний транспортний засіб (БТЗ); локалізація; фідучіарний маркер; візуальна мітка; ArUco; ARToolKitPlus; QR-код; камера машинного зору JeVois–A33

Вступ

Одним із популярних і достатньо ефективних у певних умовах методів локалізації безпілотних транспортних засобів (БТЗ) та ідентифікації вантажів є використання фідучіарних маркерів (fiducial marker). Кожному маркеру властивий унікальний набір характеристик, які дозволяють однозначно ідентифікувати його в просторі серед інших об'єктів і подібних маркерів [1]. Однозначність визначає комбінація форм, кольо-

рів, кодів тощо [7, 8]. Система на базі фідучіарних маркерів повинна працювати на різних відстанях, мітку має бути добре видно як із близької відстані, так і з далекої, тож високий показник масштабування є головною вимогою до мітки. Також маркери мають бути стійкими до впливів зовнішніх факторів, таких як забруднення, зміна освітлення або фізичне пошкодження маркера. Процес локалізації з використанням фідучіарних маркерів передбачає зйомку зображення зовнішньої обстановки

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

на камеру, розпізнавання наявних маркерів за допомогою комп'ютерного зору й обчислення точного положення засобу в просторі за допомогою математичних алгоритмів [1, 6]. Маркерна локалізація особливо ефективна в сценаріях застосування БТЗ для складських робіт, де точність локалізації відіграє важливу роль в успішному виконанні завдань.

У роботі [4] представлена система фідуціарних маркерів ArUco із можливістю налаштування словників маркерів. Проведені експерименти над маркерами ArUco показують більшу стійкість до хибних результатів порівняно з іншими системами, що забезпечено ефективним вирішенням проблеми оклюзії [4]. У [5] запропоновано методи генерування словників фідуціарних маркерів, засновані на змішано-цілочисловому лінійному програмуванні (MILP). За результатами експериментів, згенеровані словники перевершують за показником міжмаркерної відстані словники ARToolKitPlus і AprilTags.

У статті [3] подано оцінку ефективності маркерів у підводному середовищі для систем маркерів ARToolKit, AprilTags та ArUco за шістьма критеріями: продуктивність за різного освітлення та рівня каламутності, мінімально необхідний показник розміру для виявлення (у пікселях), максимальна відстань між камерою та маркером (у метрах), максимальний кут для успішного виявлення та необхідний час обробки. У [9] досліджено ефективність рішення для виявлення деформацій у сфері геодезії на основі зображень із камер та маркерів ArUco. У [10] проведено порівняння стійкості маркерів AprilTag та ArUco щодо опору обертанню за наявності синтетичного шуму оптичного датчика. При цьому виключені умови зовнішнього середовища, що впливають на продуктивність алгоритмів.

Система маркерів STag, запропонована в [4], спроектована так, щоб бути стійкою до факторів тремтіння, тому зберігає стабільність положення краще за аналогічні рішення. Це досягається за рахунок використання геометричних особливостей, які можна локалізувати з більшою повторюваністю. У роботі [2] проведено порівняння систем маркерів ARToolKitPlus, ArUco і RENE-Tag.

Оцінку сильних та слабких сторін візуального відстеження за системами маркерів ARToolKit, HOM, IGD і SCR проведено в [11]. Критеріями оцінки виступили: зручність використання, ефективність (час роботи для виявлення та розпізнавання маркерів), точність (помилка визначення положення маркера), надійність (широкі кути, велика кількість маркерів, віддалені маркери, погане фокусування).

У роботі [1] розглянуто можливість використання візуальних міток для управління невеликим БТЗ всередині приміщення для переміщення вантажів. Завданням такого БТЗ є переміщення заданого вантажу на складі з одного стелажа на інший або з полиці стелажа до кліті для подальшого відправлення. Описано три типи візуальних міток, які використовують у задачах локалізації БТЗ й ідентифікації вантажів: фідуціарні маркери ArUco та ARToolKitPlus, а також QR-коди (quick response code).

Щоб реалізувати локалізацію та сприйняття БТЗ, необхідно визначити можливість коректного розпізнавання для вказаних типів міток у різних умовах (освітлення, кут розташування, відстань до камери і т. ін.).

Мета

Основною метою дослідження є оцінка ефективності використання візуальних міток типу ARToolKitPlus, ArUco і QR-коду в задачах локалізації безпілотних транспортних засобів. Відповідно до мети поставлено такі завдання: аналіз та розробка сценарію (алгоритму) використання візуальних міток ARToolKitPlus, ArUco і QR-кодів для локалізації БТЗ та ідентифікації вантажу; розробка структури підсистеми обробки візуальних міток; вибір апаратно-програмних засобів для проведення експериментів; експериментальне дослідження можливості коректного розпізнавання візуальних міток.

Методика

Ця стаття відображає хід дослідження та результати дипломної роботи автора [1]. За основу взято сценарій роботи складу інтернет-магазину, де товари упаковані в коробки для подальшого відправлення клієнтам. Як було описано в [1], маркери ArUco застосовують для локалізації

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

БТЗ у просторі; маркери ARToolKitPlus ідентифікують код вантажу, який перевозять; QR-коди надають додаткову інформацію про вантаж, розширюючи базові дані. QR-код, прикріплений до кожної коробки, містить детальну інформацію про її вміст, що дозволяє ефективно відстежувати кожен товар на складі, мінімізувати помилки в підготовці замовлень та спростити інвентаризацію.

QR-код може містити відповідні інструкції та попередження з урахуванням особливих умов доставки. Це забезпечує правильне поводження з вантажем відповідно до його характеристик у разі доставки чутливих крихких товарів або дотримання температурних вимог для певних товарів (наприклад, продукти харчування чи медичні препарати).

Вага вантажу, вказана у QR-коді, корисна для оптимізації розподілу товарів між різними БТЗ з огляду на вагові обмеження.

Ціль доставки, зазначена в QR-коді, може містити не тільки інформацію про кінцевий пункт, а й терміновість відправлення. Інформація з QR-коду про статус готовності коробки до відправлення повідомляє, що товар упакований, перевірений та готовий до доставки. Ці дані полегшують планування маршрутів та управління термінами доставки.

Таким чином, використання комбінації маркерів ARUco, ARToolKitPlus і QR-кодів дає можливість системі керування отримати детальну інформацію про положення БТЗ в складському приміщенні, ідентифікацію вантажу та додаткові параметри, що в сукупності дозволяє успішно використовувати БТЗ для переміщення вантажів.

Таке рішення може знайти застосування в різних сферах, особливо на складах транспортних компаній, поштових служб та інтернет-магазинів. Ці підприємства стикаються з необхідністю швидкого переміщення вантажів і точної ідентифікації товарів для їх сортування, що вкрай необхідно для рентабельного управління логістикою.

Для реалізації процесів локалізації та сприйняття БТЗ на основі візуальних міток (маркерів) розроблено структуру, що зображена на рис. 1. Пунктирною лінією на схемі відділено внутрішні блоки системи від зовнішніх джерел надхо-

дження інформації, а також блока обробки результатів. Передбачено, що внутрішні блоки – це програмні блоки коду з окремих бібліотек.

Процес розпізнавання квадратних маркерів можна розбити на два основні етапи. Спершу проводять пошук кандидатів, що передбачає виявлення на зображенні камери всіх квадратних форм, які могли б потенційно бути маркерами. Кандидатів, схожих на маркери, допускають до другого етапу.

На другому етапі відбувається ідентифікація: аналіз бітового кодування всередині виявлених кандидатів, установлення, чи є кандидати маркерами, а також перевірка, чи належать вони до заданого словника.

Після розпізнання маркера для кодування номера вантажу (ARToolKitPlus) отриманий ідентифікаційний номер маркера потрапляє безпосередньо до блока обробки даних, а маркери локалізації (ARUco) потребують додаткової програмної обробки.

Зазначимо, що в процесі локалізації, щоб забезпечити точну відповідність між положенням маркера в реальному світі та відображенням пікселів цього маркера, необхідно коригувати отримане камерою зображення шляхом калібрування. Саме калібрування камери є критично важливим для точного перетворення двовимірних зображень у тривимірний простір.

Калібрування камери – це визначення її внутрішніх параметрів, які описують внутрішню геометрію процесу захоплення зображення. До таких параметрів належать: фокусна відстань, коефіцієнт спотворення лінзи, параметри перетворення пікселів тощо. Ці параметри залежать від моделі камери. Налаштування камери здійснюють один раз за допомогою спеціальних допоміжних інструментів, а параметри налаштування зберігають у спеціальному файлі з конфігураційними даними, що продемонстровано на схемі (див. рис. 1).

Після того як маркер ідентифіковано, у блоці обробки мітки відбувається аналіз форми отриманого контуру маркера. Алгоритми цього блока вилучають значущі точки з форми зображення маркера. Під значущими точками мають на увазі такі параметри маркера, як координати кутів, координати центра, довжину сторін тощо [1].

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

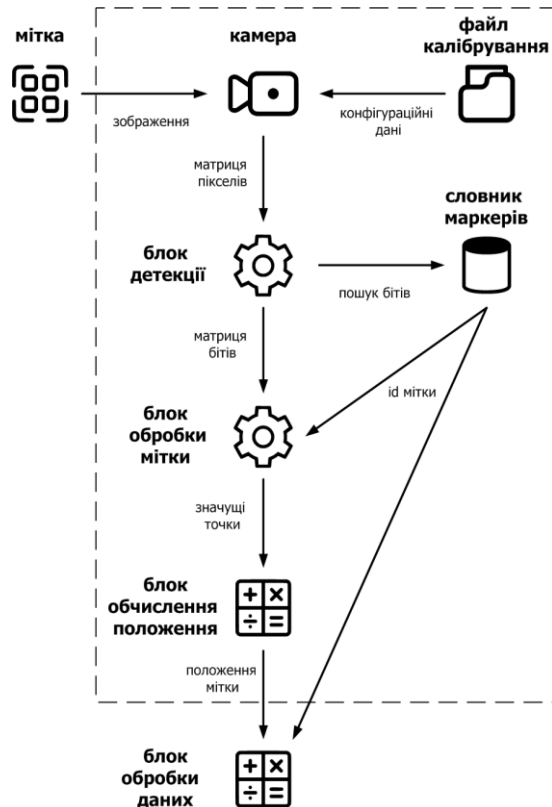


Рис. 1. Структура підсистеми обробки візуальних міток

Fig. 1. The structure of the visual tag processing subsystem

На основі значущих точок та конфігурації маркера блок обчислення положення математично вираховує орієнтацію та положення мітки відносно камери у тривимірному просторі. Після завершення цього процесу отримуємо готові до обробки дані.

Для проведення експериментів над маркерами було обрано «розумну» камеру машинного зору JeVois–A33 з програмним модулем JeVois Markers Combo та графічним інтерфейсом JeVois Inventor, оскільки вона задовольняє основні потреби для роботи з фідуціарними маркерами. Платформа JeVois надає широкий вибір програмних модулів комп'ютерного зору, серед яких і модулі для розпізнавання візуальних міток. Крім того, доступне середовище розробки для написання модулів мовою Python на основі бібліотеки OpenCV. Камера підтримує різні режими роботи та відеоформати, що забезпечує гнучкість під час налаштування та проведення експериментів [1].

Результати

Визначимо експериментальним шляхом можливість коректного розпізнавання для обраних раніше типів міток за допомогою камери залежно від освітлення, кута розташування, відстані до камери та інших параметрів.

Для експериментів обрано словники маркерів із мінімально можливими розмірностями, а саме 4 x 4 для ArUco та 3 x 3 для ARToolKitPlus. Таке рішення пов'язано зі складністю виявлення та розпізнавання маркерів в умовах малих габаритів вантажу, де необхідні, відповідно, малі розміри маркерів для позначення цих вантажів. Чим більше елементів міститься на маркері, тим вимогливіша система до зовнішніх умов, у першу чергу це стосується роздільної здатності камери.

Діапазон значень словника ArUco 4 x 4 становить від 0 до 49 (50 штук), а для словника ARToolKitPlus 3 x 3 – від 0 до 31 (32 штуки).

Приклад результату розпізнавання маркера ArUco 4 x 4 камерою наведено на рис. 2 [1].

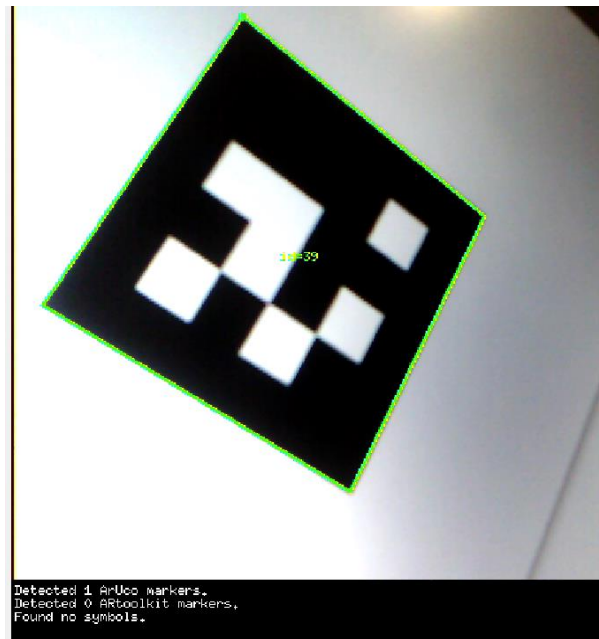


Рис. 2. Приклад експерименту з міткою ArUco

Fig. 2. The ArUco tag experiment example

Для локалізації відносно міток ArUco модуль Markers Combo відновлює повне тривимірне розташування відповідно до відомого фізичного

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

розміру цих маркерів, за умови встановлення розмірності маркера в міліметрах усередині вкладки налаштування параметрів.

Після обробки кожного відеокадру в консоль надходять повідомлення про місцезнаходження всіх ідентифікованих міток.

Будемо вважати, що дані позиціонування маркерів ArUco надходять до системи керування БТЗ правильно в усіх випадках за умови правильної ідентифікації цих маркерів.

Приклад результату розпізнавання маркера ARToolKitPlus 3 x 3 наведено на рис. 3.

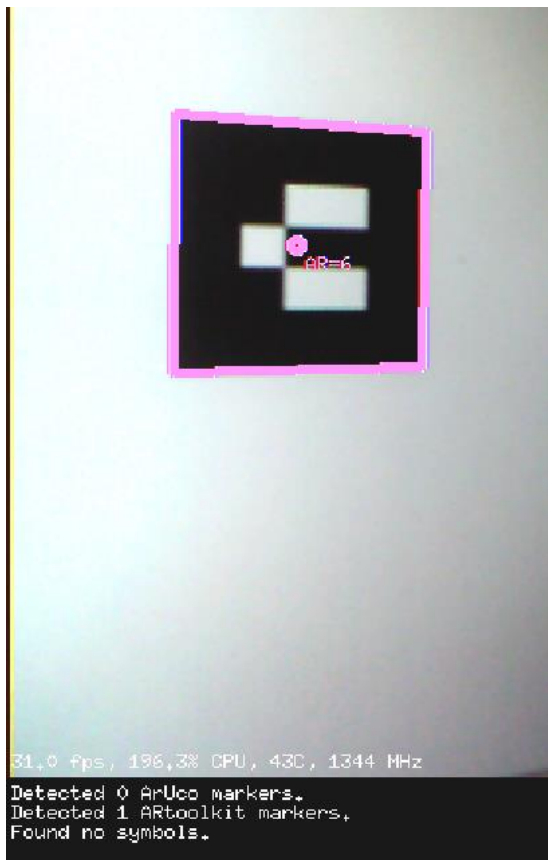


Рис. 3. Приклад експерименту з міткою ARToolKitPlus

Fig. 3. The ARToolKitPlus tag experiment example

Для міток ARToolKitPlus передбачена можливість налаштування параметра мінімального порогу достовірності ідентифікації маркера, який також впливає на швидкість розпізнавання та рівень споживання обчислювальних ресурсів. Параметр установлюють у діапазоні дійсного числа від 0 до 1, за замовчуванням параметр встановлено у значенні 0,7.

У випадку встановленого за замовчуванням граничного значення достовірності маркерів ARToolKitPlus часто виникали ситуації помилкового розпізнавання міток, навіть із мітками різної розмірності. Виявилося, що маркери в цих ситуаціях були схожі один на одного. Імовірно, алгоритм програми вважав помилково визначені маркери дійсно пошкодженими, а після відновлення зображення знаходив відповідності зі схожим маркером у словнику. Причому іноді один маркер був розпізнаний одразу як два маркери з різних словників, приклад таких маркерів наведено на рис. 4 [1].

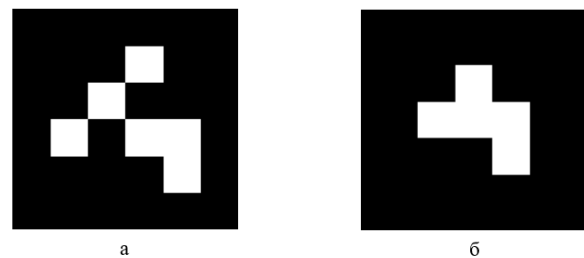


Рис. 4. Схожі між собою маркери у словниках різних систем:

a – ArUco 4 x 4 з id=14; *б* – ARToolKitPlus 3 x 3 з id=17

Fig. 4. Similar markers in the dictionaries of different systems:

a – ArUco 4 x 4 з id=14; *b* – ARToolKitPlus 3 x 3 з id=17

У разі встановлення граничної достовірності зі значенням 1 ситуація з розпізнаванням значно поліпшилася, випадків з одночасним розпізнаванням одного маркера як двох не виникало.

Подальші експерименти проведено для максимального порогу достовірності, що дорівнює 1, оскільки для цієї роботи пріоритетна надійність ідентифікації маркерів.

Як видно з рис. 5, закодоване в QR-коді текстове повідомлення «Experimental test message 1» одразу виводиться на екран середовища.

Крім того, проведено експерименти з розпізнавання комбінацій із різних типів міток у разі їх одночасного потрапляння в поле зору камери, приклад продемонстровано на рис. 6.

Також проведено експерименти з великою кількістю міток у полі зору камери, що може вплинути на продуктивність обробки міток, один із таких експериментів зображено на рис. 7.

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

За даними, наведеними на знімку екрана (див. рис. 7), можна побачити, що навантаження процесора камери (CPU) склало 262 %. Такий результат отримано, оскільки процесор містить 4 ядра, на кожному з яких відбувається підрахування окремого ступеня завантаженості в межах 100 %, таким чином, максимально можливий ступінь завантаженості складає 400 % [1].



Рис. 5. Приклад експерименту з міткою QR

Fig. 5. The QR tag experiment example



Рис. 6. Приклад експерименту з комбінацією трьох різновидів міток

Fig. 6. Combination of 3 tag types experiment example



Рис. 7. Одночасне сканування 35 маркерів ArUco

Fig. 7. Simultaneous scanning of 35 of ArUco markers

Показники проведених експериментів достатньо близькі до отриманих даних у розглянутій літературі про дослідження маркерів. У результаті серії експериментів визначено ймовірності правильного розпізнавання міток під час сканування під прямим кутом відносно камери на відстані в діапазоні від 0,3 до 2 метрів.

У межах зазначеного діапазону відстаней для кожного можливого значення маркерів ArUco було проведено 100 експериментів (по 2 експерименти на кожен маркер), у 99 із яких розпізнавання спрацювало правильно, а отже, ймовірність розпізнавання $P(AU) = 0,99$.

Аналогічно проведено 96 експериментів для маркерів ARToolKitPlus (по 3 експерименти на кожен маркер) у тому самому діапазоні відстаней. За результатами, мітки з номерами 5, 11 та 13 помилково розпізнаються, як мітки з іншими номерами цього ж словника, або як мітки зі словника ArUco. У 90 випадках із 96 розпізнавання проведено нормально, а отже, ймовірність розпізнавання $P(ATK) = 0,9375$.

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

Розпізнавання QR-кодів відбувається найкраще на малих відстанях. У середньому успішним можна вважати розпізнавання кодів у 9 випадках із 10, тобто ймовірність розпізнавання $P(QR) = 0,9$ [1].

Наукова новизна та практична значимість

У результаті експериментального дослідження отримано значення ймовірностей правильного розпізнавання візуальних міток, а саме маркерів ArUco, ARToolKitPlus та QR-кодів. Отримані результати можна застосовувати під час створення, імітаційного моделювання та аналізу ефективності алгоритмів локалізації і сприйняття БТЗ всередині приміщень із використанням відповідних візуальних міток.

Запропонована узагальнена структура підсистеми обробки візуальних міток системи локалізації та сприйняття БТЗ може бути використана під час розробки систем керування БТЗ.

Висновки

Проведено дослідження ефективності застосування візуальних міток для задач локалізації БТЗ всередині приміщень, із використанням камери машинного зору JeVois–A33 з програмним модулем для роботи з різними типами візуальних маркерів JeVois Markers Combo і графічним інтерфейсом JeVois Inventor. У результаті проведених експериментів визначено ймовірності коректного розпізнавання для кожного з типів візуальних міток (маркерів ArUco, ARToolKitPlus та QR-кодів). Запропоновано структуру підсистеми обробки візуальних міток.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Остапеч Я. Д. *Дослідження систем і алгоритмів керування безпілотними транспортними засобами* : дипломна робота. Український державний університет науки і технологій. Дніпро, 2024. 89 с.
2. Benligiray B., Topal C., Akinlar C. STag: A stable fiducial marker system. *Image and Vision Computing*. 2019. Vol. 89. P. 158–169. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.imavis.2019.06.007>
3. dos Santos Cesar D. B., Gaudig C., Fritsche M., dos Reis M. A., Kirchner F. An evaluation of artificial fiducial markers in underwater environments. *OCEANS 2015 – Genova* (Genova, 18–21 May 2015). Genova, 2015. P. 1–7. DOI: <https://doi.org/10.1109/oceans-genova.2015.7271491>
4. Garrido-Jurado S., Muñoz-Salinas R., Madrid-Cuevas F. J., Marín-Jiménez M. J. Automatic generation and detection of highly reliable fiducial markers under occlusion. *Pattern Recognition*. 2014. Vol. 47. Iss. 6. P. 2280–2292. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2014.01.005>
5. Garrido-Jurado S., Muñoz-Salinas R., Madrid-Cuevas F. J., Medina-Carnicer R. Generation of fiducial marker dictionaries using Mixed Integer Linear Programming. *Pattern Recognition*. 2016. Vol. 51. P. 481–491. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2015.09.023>
6. Lightbody P., Krajník T., Hanheide M. An Efficient Visual Fiducial Localisation System. *ACM SIGAPP Applied Computing Review*. 2017. Vol. 17. Iss. 3. P. 28–37. DOI: <https://doi.org/10.1145/3161534.3161537>
7. Minor B. *Reverse-Engineering Fiducial Markers For Perception*. *Tangram Vision*. URL: <https://www.tangramvision.com/blog/reverse-engineering-fiducial-markers-for-perception#further-resources>
8. Pătru G.-C., Pirvan A.-I., Rosner D., Rughiniș R.-V. Fiducial marker systems overview and empirical analysis of ArUco, AprilTag and CCTag. *U.P.B. Sci. Bull. Series C*. 2023. Vol. 85. Iss. 2. P. 49–62.
9. Siki Z., Takács B. Automatic Recognition of ArUco Codes in Land Surveying Tasks. *Baltic Journal of Modern Computing*. 2021. Vol. 9, No 1. P. 115–125. DOI: <https://doi.org/10.22364/bjmc.2021.9.1.06>
10. Zakiev A., Tsoy T., Shabalina K., Magid E., Saha S. K. Virtual Experiments on ArUco and AprilTag Systems Comparison for Fiducial Marker Rotation Resistance under Noisy Sensory Data. *2020 International Joint Conference on Neural Networks* (Glasgow, 19–24 July 2020). Glasgow, 2020. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/ijcnn48605.2020.9207701>
11. Zhang X., Fronz S., Navab N. Visual marker detection and decoding in AR systems: a comparative study. *IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality*. (Darmstadt, 01–01 Oct. 2002). Darmstadt, 2002. P. 97–106. DOI: <https://doi.org/10.1109/ismar.2002.1115078>

^{1*}Dep. «Electronic Computing Machines», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana Str., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 89, e-mail oyar@i.ua, ORCID 0000-0003-1976-5188

Experimental Evaluation of the Effectiveness of Using Visual Cues for Controlling Unmanned Vehicles

Purpose. The study aims to experimentally evaluate the effectiveness of using visual cues, namely ARToolKitPlus, ArUco markers and two-dimensional QR (quick response code) codes in the tasks of localizing unmanned vehicles (UVs) indoors. **Methodology.** To enable the implementation of the processes of localization and perception of unmanned vehicles based on visual marks (markers), the structure of the visual marks processing subsystem has been developed. An algorithm for the combined use of three types of visual markers – ARToolKitPlus, ArUco markers and QR codes – for localizing unmanned vehicles and identifying cargo is proposed using the example of an online store warehouse scenario. To conduct experiments on the markers, we chose a hardware and software tool such as the JeVois-A33 smart machine vision camera with the JeVois Markers Combo software module and the JeVois Inventor graphical interface. **Findings.** An experimental study of the possibility of correct recognition of visual marks for indoor working conditions was carried out. As a result of a series of experiments, the possibilities of correct recognition of visual marks such as ArUco, ARToolKitPlus markers and QR codes during scanning at right angles to the camera at a distance ranging from 0.3 to 2 meters were determined. **Originality.** The study obtained the probabilities of correct recognition of ArUco, ARToolKitPlus markers and two-dimensional QR codes in the conditions of localization of unmanned vehicles indoors. **Practical value.** The obtained results of the study can be used to create, simulate, and analyze the effectiveness of algorithms for localizing and perceiving unmanned vehicles indoors using appropriate visual markers. The proposed generalized structure of the visual marker processing subsystem of the localization and perception system can be used in the development of unmanned vehicle control systems.

Keywords: unmanned vehicle (UV); localization; fiducial marker; visual marker; ArUco; ARToolKitPlus; QR code; JeVois-A33 machine vision camera

REFERENCES

- Ostapets, Y. D. (2024). *Research of systems and algorithms for controlling unmanned vehicles* (Master's thesis). Ukrainian State University of Science and Technology. Dnipro. (in English)
- Benligiray, B., Topal, C., & Akinlar, C. (2019). STag: A stable fiducial marker system. *Image and Vision Computing*, 89, 158-69. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.imavis.2019.06.007> (in English)
- dos Santos Cesar, D. B., Gaudig, C., Fritsche, M., dos Reis, M. A., & Kirchner, F. (2015, May). An evaluation of artificial fiducial markers in underwater environments. In *OCEANS 2015 – Genova* (pp. 1-7). Genova, Italy. DOI: <https://doi.org/10.1109/oceans-genova.2015.7271491> (in English)
- Garrido-Jurado, S., Muñoz-Salinas, R., Madrid-Cuevas, F. J., & Marín-Jiménez, M. J. (2014). Automatic generation and detection of highly reliable fiducial markers under occlusion. *Pattern Recognition*, 47(6), 2280-2292. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2014.01.005> (in English)
- Garrido-Jurado, S., Muñoz-Salinas, R., Madrid-Cuevas, F. J., & Medina-Carnicer, R. (2016). Generation of fiducial marker dictionaries using Mixed Integer Linear Programming. *Pattern Recognition*, 51, 481-491. DOI <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2015.09.023> (in English)
- Lightbody, P., Krajník, T., & Hanheide, M. (2017). An efficient visual fiducial localisation system. *ACM SIGAPP Applied Computing Review*, 17(3), 28-37. DOI: <https://doi.org/10.1145/3161534.3161537> (in English)
- Minor, B. *Reverse-Engineering Fiducial Markers For Perception. Tangram Vision*. Retrieved from <https://www.tangramvision.com/blog/reverse-engineering-fiducial-markers-for-perception#further-resources> (in English)
- Pătru, G-C., Pîrvan, A-I., Rosner, D., & Rughiniș, R-V. (2023). Fiducial marker systems overview and empirical analysis of ArUco, AprilTag and CCTag. *U.P.B. Sci. Bull. Series C*, 85(2), 49-62. (in English)
- Siki, Z., & Takács, B. (2021). Automatic Recognition of ArUco Codes in Land Surveying Tasks. *Baltic Journal of Modern Computing*, 9(1), 115-125. DOI: <https://doi.org/10.22364/bjmc.2021.9.1.06> (in English)
- Zakiev, A., Tsoy, T., Shabalina, K., Magid, E., & Saha, S. K. (2020, July). Virtual Experiments on ArUco and AprilTag Systems Comparison for Fiducial Marker Rotation Resistance under Noisy Sensory Data. In *2020*

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

International Joint Conference on Neural Networks (pp. 1-6). Glasgow, United Kingdom.

DOI: <https://doi.org/10.1109/ijcnn48605.2020.9207701> (in English)

11. Zhang, X., Fronz, S., & Navab, N. (2002, Oct.). Visual marker detection and decoding in AR systems: a comparative study. In *IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality* (pp. 97-106). Darmstadt, Germany. DOI: <https://doi.org/10.1109/ismar.2002.1115078> (in English)

Надійшла до редколегії: 23.02.2024

Прийнята до друку: 27.06.2024