

ТЕОРЕТИЧНІ ЗАСАДИ ПОБУДОВИ ЦИФРОВОГО ДВІЙНИКА МОБІЛЬНОГО РОБОТА ДЛЯ ЗАДАЧ СИМУЛЯЦІЇ ТА ТЕСТУВАННЯ

Стрімкий розвиток мобільної робототехніки висуває нові вимоги до методів проектування, налагодження та верифікації систем керування. Перспективною альтернативою є концепція цифрового двійника, яка дозволяє створити віртуальну модель реального робота для проведення симуляцій, тестування алгоритмів і прогнозування поведінки системи без постійного залучення фізичного пристрою.

Цифровий двійник у робототехніці доцільно розглядати як динамічну віртуальну модель фізичного об'єкта, що синхронізується з реальною системою в режимі реального часу або на основі накопичених експериментальних даних. Стосовно мобільного робота така модель охоплює декілька взаємопов'язаних складових: кінематичну та динамічну модель платформи, модель сенсорної підсистеми, модель виконавчих механізмів і модель середовища, у якому здійснюється рух. Завдяки цьому цифровий двійник може бути використаний не лише як засіб візуалізації, а і як інструмент аналізу, прогнозування та верифікації поведінки робототехнічної системи.

Застосування цифрового двійника є особливо важливим у задачах тестування алгоритмів автономної навігації, уникнення перешкод, побудови карт середовища та планування траєкторій. У віртуальному середовищі можна багаторазово відтворювати різні сценарії руху, змінювати параметри місцевості, моделювати появу перешкод, аналізувати поведінку робота в аварійних або граничних режимах. Це дозволяє виявляти недоліки системи керування ще до етапу випробувань на реальній платформі, знижувати ризики пошкодження обладнання та скорочувати тривалість циклу розроблення.

Окрему цінність цифровий двійник має для тестування алгоритмів SLAM, локалізації, комп'ютерного зору та адаптивного керування. Завдяки симуляції можна оцінити, як робот реагує на зміну освітлення, появу динамічних об'єктів, похибки сенсорів, втрату сигналу або неточності карти. У процесі дослідження цифровий двійник може використовуватися для порівняння різних алгоритмів, налаштування параметрів регуляторів, перевірки стабільності руху та оцінювання точності позиціонування. Це робить його важливим інструментом як для наукових досліджень, так і для інженерного проектування мобільних роботів.

Разом із тим побудова цифрового двійника мобільного робота супроводжується низкою проблемних питань. Однією з головних проблем є забезпечення достатньої точності фізичної моделі, оскільки поведінка віртуальної системи не завжди повністю відповідає поведінці реального об'єкта. Це явище відоме як *sim-to-real gap* і може бути спричинене спрощеннями в математичній моделі, неточним описом тертя, ковзання, інерції, деформацій коліс або похибок сенсорів.

Для підвищення ефективності цифрового двійника необхідно забезпечити постійне оновлення параметрів моделі на основі даних, отриманих від фізичного робота. Перспективним є застосування методів машинного навчання, які можуть уточнювати модель поведінки системи, прогнозувати можливі відмови, оцінювати зношування елементів і покращувати відповідність між симуляцією та реальним експериментом. Також важливим напрямом є створення масштабованої архітектури, що дозволяє адаптувати цифровий двійник до різних конфігурацій роботизованої платформи, типів сенсорів і умов середовища.

Концепція цифрового двійника є перспективним інструментом для проектування, симуляції та тестування мобільних роботів. Теоретично обґрунтована архітектура цифрового двійника дозволяє знизити витрати на розроблення, підвищити якість верифікації алгоритмів керування та прискорити цикл «проектування – тестування – впровадження». Подальші дослідження доцільно спрямувати на зменшення розриву між симуляцією та реальною системою, удосконалення методів синхронізації, підвищення точності моделей сенсорів і інтеграцію інтелектуальних алгоритмів у контур роботи цифрового двійника.

Список використаних джерел:

1. Grieves M. Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication. White Paper. 2014. P. 1–7. URL: https://www.researchgate.net/publication/275211047_Digital_Twin_Manufacturing_Excellence_through_Virtual_Factory_Replication
2. Tao F., Zhang H., Liu A., Nee A.Y.C. Digital Twin in Industry: State-of-the-Art. IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2019. Vol. 15, No. 4. P. 2405–2415. URL: <https://doi.org/10.1109/TII.2018.2873186>

АВТОНОМНИЙ РОБОТ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ ПАРАМЕТРІВ СЕРЕДОВИЩА У ПРИМІЩЕННІ

Сучасні умови вимагають постійного та точного контролю за якістю повітря, температурою і вологістю в закритих просторах, адже це безпосередньо впливає як на самопочуття людей, так і на стабільну роботу чутливого обладнання. Проблема багатьох наявних підходів полягає в тому, що традиційні стаціонарні вимірювальні системи часто залишають так звані "сліпі зони" у приміщенні та грішать на затримки в оновленні даних. Крім того, ручний збір показників контрольно-вимірювальних приладів займає багато часу, відрізняється високою енерговитратністю та сильно залежить від людського фактора, що значно знижує загальну надійність моніторингу.

Метою роботи є розробка моделі мобільного автономного робота для безперервного моніторингу параметрів середовища, який зможе самостійно переміщуватися та збирати точні просторові дані. Запропонована система будується на базі колісної платформи з мікроконтролером, до якого підключені датчики температури, вологості та якості повітря. Для керування логікою опитування датчиків та збереження історії вимірювань використовується програмне забезпечення, написане на Python, з інтеграцією локальної бази даних SQLite. Робот передає зібрану інформацію на сервер через бездротовий канал передавання даних, дозволяючи користувачеві відстежувати всі зміни мікроклімату через зручний інтерфейс. Щоб уникати перешкод, система використовує ультразвукові сенсори та будує динамічну карту маршруту прямо під час свого руху.

Для оцінки точності таких просторових вимірювань під час руху застосовується математична модель розрахунку динамічної похибки. Загальна похибка вимірювання визначається як сума інструментальної похибки самого сенсора та величини, що залежить від швидкості руху платформи. Формула має такий вигляд:

$$\Delta E = \delta_B + (V_r \cdot t_r \cdot K_g),$$

де δ_B – базова похибка датчика, V_r – поточна швидкість робота, t_r – час відгуку вимірювального елемента, а K_g – градієнт зміни параметра в приміщенні.



Рис.1. Блок-схема алгоритму збору даних та навігації автономного робота

Впровадження такого підходу дає змогу суттєво автоматизувати процес контролю, забезпечити стабільну роботу в реальному часі та звести до мінімуму вплив людського фактора. Завдяки мобільності платформи вдається отримувати набагато точнішу картину просторового розподілу температур і газів у приміщенні, що автоматично знижує витрати на закупівлю та встановлення десятків стаціонарних датчиків.

Список використаних джерел:

1. Simamora A.M., Denih A., Suriansyah M.I. Indoor Air Quality Detection Robot Model Based on the Internet of Things (IoT). *arXiv*. 2025. Article arXiv:2505.19600. URL: <https://arxiv.org/abs/2505.19600>
2. Hu X. et al. A BIM-Enabled Digital Twin Framework for Real-Time Indoor Environment Monitoring Using Mobile Robot Sensing. *Journal of Building Engineering*. 2024. Vol. 94. Article 110157. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352710224004698>
3. Kozłowski M. et al. Autonomous System for Air Quality Monitoring on the Example of the City of Ruse. *Sustainability*. 2025. Vol. 17, No. 14. Article 6260. URL: <https://www.mdpi.com/2071-1050/17/14/6260>

РОБОТИЗОВАНИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ СОРТУВАННЯ ПРОДУКЦІЇ НА ВИРОБНИЧІЙ ЛІНІЇ

автоматизація процесів сортування продукції є важливим напрямом підвищення ефективності виробничих ліній. Використання інтелектуальних роботизованих систем дозволяє забезпечити безперервний контроль параметрів виробів, зменшити вплив людського фактора та підвищити стабільність технологічного процесу. Особливої актуальності такі рішення набувають для виробництв із великою номенклатурою продукції, де необхідні швидке переналаштування обладнання і своєчасне прийняття керуючих рішень.

Традиційні підходи до сортування, що базуються на ручній праці або використанні спрощених датчиків, мають обмежену точність і значну залежність від кваліфікації оператора. У динамічних умовах виробничого середовища такі методи можуть характеризуватися підвищеною енерговитратністю, форми та положення об'єктів, а також недостатньою швидкістю під час роботи конвеєрної лінії. Тому доцільним є розроблення роботизованого комплексу, який поєднує методи комп'ютерного зору, адаптивного керування та автоматизованої передачі даних для підвищення якості сортування.

Метою роботи є обґрунтування структури роботизованого комплексу для сортування продукції на виробничій лінії, який на основі методів комп'ютерного зору та адаптивного керування забезпечує автоматичне розпізнавання, супровід і точний розподіл об'єктів відповідно до заданих ознак. Такими ознаками можуть бути форма, колір, габаритні розміри, наявність поверхневих дефектів або належність виробу до певної категорії.

Запропонована система має багаторівневу архітектуру, що поєднує сенсорну підсистему, обчислювальний модуль, контролер керування та виконавчі органи. На першому етапі камера високої роздільної здатності формує відеопотік із робочої зони конвеєра. Отримані зображення передаються до модуля комп'ютерного зору на базі мікропроцесорної системи, наприклад Jetson Nano. Для ідентифікації типу продукції, визначення координат об'єкта та оцінювання його положення можуть використовуватися нейромережеві алгоритми детекції, методи класифікації зображень і кореляційні трекери, що підвищують стійкість системи до змін освітлення та часткового перекриття об'єктів.

Керування рухом сортувального маніпулятора може бути реалізоване на базі контролера, який формує керуючі впливи для приводів за PID-законом із метою мінімізації похибки позиціонування. Інтеграція ультразвукових датчиків або інших датчиків відстані дозволяє додатково контролювати положення об'єктів у робочій зоні, що підвищує надійність функціонування комплексу в умовах зашумлення відеосигналу або нестабільного розташування продукції на конвеєрі. Виконавчі органи системи можуть бути представлені маніпулятором, пневматичним штовхачем, сервоприводним механізмом або іншим сортувальним модулем, який забезпечує переміщення виробу до відповідного каналу.

Очікуваним результатом застосування запропонованого підходу є підвищення точності сортування, скорочення часу реакції системи та зменшення кількості помилок під час розподілу продукції. За умови коректного налаштування алгоритмів комп'ютерного зору та системи керування роботизований комплекс може забезпечувати точність сортування понад 95%, а затримка від моменту детектування об'єкта до формування керуючого сигналу може бути до 85 мс. Це створює передумови для стабільної роботи комплексу в режимі реального часу та зниження ризику виникнення аварійних ситуацій.

Роботизований комплекс для сортування продукції на виробничій лінії є перспективним технічним рішенням для автоматизації промислових процесів. Його використання дозволяє поєднати можливості комп'ютерного зору, вбудованих обчислювальних систем, адаптивного керування та промислового моніторингу. Подальший розвиток такого комплексу доцільно спрямувати на підвищення точності нейромережевого розпізнавання, оптимізацію швидкодії алгоритмів, розширення номенклатури продукції, що може сортуватися, та інтеграцію системи з промисловими платформами збору й аналізу даних.

Список використаних джерел:

1. Tang G., Ni J., Zhao Y., Gu Y., Cao W. A Survey of Object Detection for UAVs Based on Deep Learning. Remote Sensing. 2024. Vol. 16, No. 1. Article 149. URL: <https://www.mdpi.com/2072-4292/16/1/149>
2. Lopez-Sanchez I., Moreno-Valenzuela J. PID Control of Quadrotor UAVs: A Survey. Annual Reviews in Control. 2023. Vol. 56. Article 100900. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1367578823000640>

ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО РОЗПІЗНАВАННЯ РУХІВ

Проблема розпізнавання рухів виникає в ігрових задачах, коли виникає необхідність віртуальним персонажам в точності відтворити рухи акторів. Це дає можливість спростити та пришвидшити процес створення анімацій, покращити їх якість, що обумовлює даний підхід економічно доцільним і конкурентоздатним на ринку. Досягається така швидкодія, яка стає відповідною до режиму реального часу. У порівнянні з традиційною технологією обсяги робіт значно менше залежать від складності чи тривалості анімації у порівнянні з традиційною технікою. Це дозволяє створювати багато тестових анімацій, щоб можна було оцінити різні стилі та постановки, таким чином якість кінцевого результату залежить тільки від майстерності актора.

Така система може складатися з апаратної та програмної частин. Апаратна частина є давачем глибини і може містити інфрачервоний проектор об'єднаний з монохромною світлочутливою КМОН-матрицею та кольорову відеокамеру. Тоді як програмна частина може бути написана мовою C# або C-подібною мовою високого рівня HLSL для програмування графіки. Остання була створена корпорацією Microsoft і є складовою пакету DirectX, який містить набір програмних пакетів для програмування комп'ютерних ігор. В апаратній частині може використовуватися Point Cloud 3D-сканер. Ці пристрої в автоматичному режимі сканують велику кількість точок на поверхні об'єкту і генерують на виході файл даних. Таким чином, отриманий результат є множиною координат, отриманих 3D-скануванням об'єкту. Результати тривимірного сканування використовуються для створення тривимірних CAD-моделей виробничих деталей, для метрології та контролю якості, а також для безлічі інших цілей, пов'язаних з візуалізацією та комп'ютерною анімацією.

До переваг системи автоматизованого розпізнавання рухів слід віднести такі: один актор може грати багато ролей; живе відео на тривимірному тлі може виглядати дещо неприродно; можливе редагування постфактум (зміна ракурсів, світла, незначне редагування рухів); більш широкі можливості костюму і гриму; можливість поєднання системи розпізнавання рухів з ручною мультиплікацією; сцену можна показати з такого ракурсу, який навіть для павільйонних зйомок може бути утрудненим і недоступним; у сценах з великою кількістю комп'ютерних ефектів складно поєднати живих акторів з комп'ютерними персонажами.

Основні види систем розпізнавання рухів розділяються на два типи, а саме, маркерні системи та безмаркерні системи. Перша використовує спеціальне обладнання (костюм з датчиками). Дані з датчиків фіксуються камерами і надходять в комп'ютер, де зводяться в єдину тривимірну модель, яка точно відтворює рухи актора, на основі яких пізніше (або в режимі реального часу) створюється анімація персонажа. Тоді як безмаркерна не потребує спеціальних датчиків або спеціального костюма, бо заснована на технологіях комп'ютерного зору й розпізнавання образів. Зйомка проводиться за допомогою звичайної камери і персонального комп'ютера.

Гіроскопічні системи для збору інформації про рух використовують мініатюрні гіроскопи і інерційні сенсори, розташовані на тілі актора - також як і маркери або магніти в інших системах розпізнавання рухів. Мінусами гіроскопічних систем є відсутність можливості захоплення рухів і міміки обличчя; для визначення положення актора в просторі потрібна додаткова міні-система.

Отримання зображень: цифрові зображення отримуються від одного чи декількох датчиків зображення, які окрім різноманітних типів світлочутливих камер включають датчики відстані, радары, ультразвукові камери тощо. Значення пікселів зазвичай відповідають інтенсивності світла в одній чи декількох спектральних смугах, але можуть бути пов'язані з різноманітними фізичними вимірюваннями, такими як глибина, поглинання чи відображення звукових або електромагнітних хвиль.

Підсумовуючи вище сказане, система, автоматизованого розпізнавання рухів для створення розважальних програм може зменшити витрати та обсяг роботи на створення ключових кадрів анімації. Вона дозволяє створювати багато тестових анімацій для оцінювання різних стилів та постановок, таким чином якість кінцевого результату залежить тільки від майстерності актора.

Список використаних джерел:

1. Система автоматизованого розпізнавання рухів [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://science.lpnu.ua/sites/default/files/journal-paper/2017/jun/3643/dzelendziakusamotyiv.pdf>

ДИFUZІЙНІ МОДЕЛІ ДЛЯ ГЕНЕРАЦІЇ ТРАЕКТОРІЙ РУХУ РОБОТИЗОВАНИХ СИСТЕМ

Задача планування траєкторій руху роботизованих систем є однією з ключових у сучасній робототехніці, оскільки від якості побудованої траєкторії залежать точність, безпечність, енергоефективність і стабільність виконання роботизованих операцій. Класичні методи планування, зокрема алгоритми A*, RRT, потенційних полів та їх модифікації, широко застосовуються для побудови маршрутів у відомому або частково відомому середовищі. Однак такі підходи мають обмежену гнучкість у складних неструктурованих умовах, де необхідно враховувати невизначеність, динамічні перешкоди, фізичні обмеження робота та можливість існування кількох рівноцінних траєкторій.

У зв'язку з цим актуальним напрямом є використання генеративних моделей штучного інтелекту, зокрема дифузійних моделей, для синтезу траєкторій руху роботизованих систем. Дифузійні моделі дають змогу формувати різноманітні, реалістичні та фізично узгоджені траєкторії на основі навчальних даних або заданих умов середовища. Їх перевагою є здатність працювати з багатомодальними розподілами, коли для однієї задачі планування може існувати кілька допустимих варіантів руху.

Метою роботи є аналіз можливостей застосування дифузійних моделей для генерації траєкторій руху роботизованих систем та визначення їх переваг порівняно з класичними й навчальними методами планування.

Дифузійні моделі функціонують на основі двостадійного стохастичного процесу. На першій стадії, яка називається прямим дифузійним процесом, до навчальних даних поступово додається гаусівський шум. У результаті початкова траєкторія поступово втрачає свою структуру та перетворюється на випадковий шум. На другій стадії, тобто у зворотному процесі, модель навчається послідовно відновлювати вихідну траєкторію, видаляючи шум крок за кроком. Саме цей зворотний процес використовується для генерації нових траєкторій: починаючи з випадкового шуму, модель поступово формує послідовність положень або керуючих дій робота.

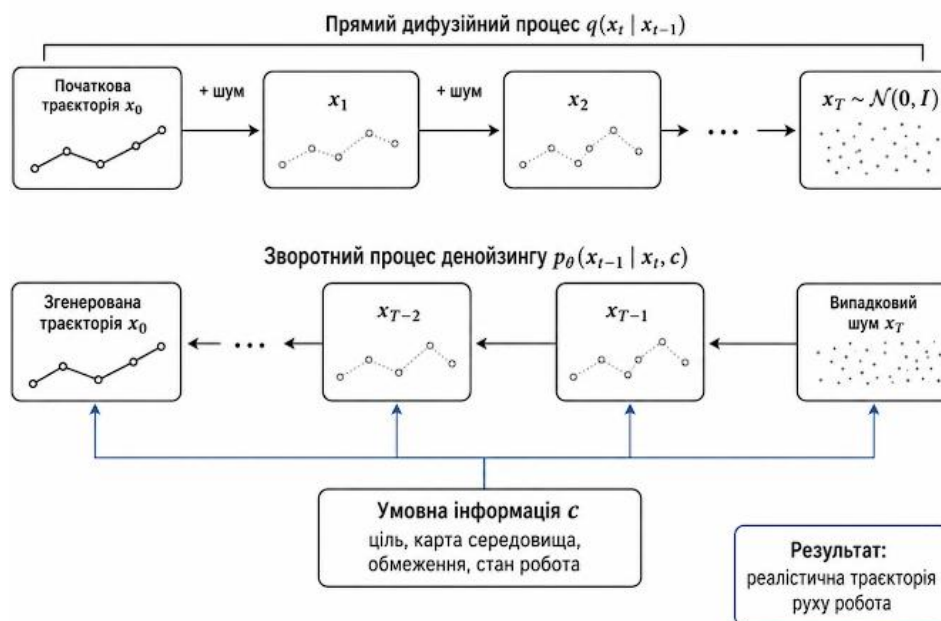


Рис. 1. Принцип роботи дифузійної моделі для генерації траєкторій руху роботизованої системи

У задачах роботизованої маніпуляції дифузійні моделі можуть генерувати не всю траєкторію одразу, а окремі підпослідовності руху на обмеженому часовому горизонті. Такий підхід дозволяє враховувати нові спостереження середовища після кожного етапу виконання дії та коригувати подальший рух. Це є важливим для роботів, що працюють у змінних умовах, наприклад під час захоплення об'єктів, обходу перешкод або виконання тривалих маніпуляційних завдань.

Одним із перспективних напрямів є модельно-орієнтована дифузія, яка поєднує генеративний підхід із математичним описом динаміки системи. У такому випадку траєкторії можуть формуватися з урахуванням фізичних обмежень, кінематики робота, допустимих прискорень, меж робочого простору та умов безпечного руху. Іншим напрямом є використання дифузійних моделей для навчання політик

керування, де згенеровані траєкторії слугують орієнтиром для прийняття рішень у складних довготривалих задачах.

Для порівняння основних підходів до планування траєкторій доцільно розглянути такі критерії, як здатність працювати з багатомодальними рішеннями, узагальнення на нові середовища, складність навчання та вимоги до обчислювальних ресурсів.

Табл. 1.

Порівняння методів планування траєкторій

Метод	Тип підходу	Мультиmodalність	Узагальнення	Складність навчання
A* / RRT	Класичний метод	Низька	Обмежене	Відсутня
Навчання з підкріпленням	Навчальний метод	Часткова	Середнє	Висока
Diffusion Policy	Дифузійний метод	Висока	Високе	Середня
Motion Planning Diffusion	Дифузійний метод	Висока	Високе	Середня
Model-Based Diffusion	Модельно-орієнтований дифузійний метод	Висока	Високе	Залежить від моделі

У сучасних дослідженнях застосовуються різні архітектури дифузійних моделей. Temporal U-Net використовується для обробки часових послідовностей і генерації траєкторій у задачах маніпуляції. Transformer-архітектури є доцільними для тривалих завдань, де необхідно враховувати довгострокові залежності між діями. 3D Diffusion Policy застосовується для роботи з просторовими представленнями, зокрема хмарами точок, а SE(3)-еквіваріантні моделі дають змогу враховувати геометричні перетворення під час руху робота в тривимірному просторі.

Табл. 2.

Архітектурні підходи дифузійних моделей у робототехніці

Архітектура	Основні особливості	Типові сфери застосування
Temporal U-Net	Обробка часових послідовностей, умовна генерація руху	Маніпуляція об'єктами
Transformer-based model	Урахування довгострокових залежностей	Тривалі роботизовані завдання
3D Diffusion Policy	Використання просторових 3D-представлень	Узагальнення між різними сценами
SE(3)-DiffusionFields	Геометрично узгоджена генерація в 3D-просторі	Захоплення, переміщення та орієнтація об'єктів

По-перше, вони природно враховують багатоваріантність можливих рішень. По-друге, такі моделі можуть використовувати різні типи умовної інформації: зображення з камер, хмари точок, карти середовища, мовні інструкції або попередні стани робота. По-третє, дифузійні моделі здатні формувати траєкторії, які краще узгоджуються з реальними демонстраціями та фізичними обмеженнями руху.

Водночас існують і певні обмеження. Основними проблемами є висока обчислювальна складність, необхідність значної кількості навчальних даних, а також відносно повільний процес генерації через багатоетапне видалення шуму. Тому перспективними напрямками подальших досліджень є скорочення кількості кроків денойзингу, інтеграція дифузійних моделей із класичними методами планування, використання великих мультиmodalних моделей та підвищення безпечності згенерованих траєкторій.

Список використаних джерел:

1. Chi C. et al. Diffusion Policy: Visuomotor Policy Learning via Action Diffusion. *Robotics: Science and Systems*. 2023. URL: <https://roboticsproceedings.org/rss19/p026.html>
2. Janner M., Du Y., Tenenbaum J.B., Levine S. Planning with Diffusion for Flexible Behavior Synthesis. *Proceedings of the 39th International Conference on Machine Learning*. 2022. Vol. 162. P. 9902–9915. URL: <https://proceedings.mlr.press/v162/janner22a.html>
3. Pan C., Yi Z., Shi G., Qu G. Model-Based Diffusion for Trajectory Optimization. *arXiv*. 2024. Article arXiv:2407.01573. URL: <https://arxiv.org/abs/2407.01573>
4. Carvalho J., Le A.T., Baierl M., Koert D., Peters J. Motion Planning Diffusion: Learning and Planning of Robot Motions with Diffusion Models. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. 2023. URL: <https://arxiv.org/abs/2308.01557>
5. Shaoul Y., Kedia K., Dummer D., Li X., Qureshi A.H. Multi-Robot Motion Planning with Diffusion Models. *arXiv*. 2024. Article arXiv:2410.03072. URL: <https://arxiv.org/abs/2410.03072>

РОЗРОБКА АЛГОРИТМУ SLAM-НАВІГАЦІЇ ДЛЯ МОБІЛЬНОЇ РОБОТИЗОВАНОЇ ПЛАТФОРМИ

Сучасні мобільні роботизовані платформи застосовуються у промисловості, логістиці, складській автоматизації та сервісній робототехніці, де важливо забезпечити автономне переміщення, локалізацію та уникнення перешкод. У невідомому або змінному середовищі традиційні навігаційні методи мають обмежену ефективність через залежність від зовнішніх систем позиціонування, низьку точність у приміщеннях і накопичення похибок під час руху.

Для вирішення цієї задачі доцільно використовувати SLAM-технологію, яка дозволяє роботу одночасно будувати карту середовища та визначати власне положення на ній. Поєднання даних від LiDAR, камер, IMU та енкодерів забезпечує точнішу локалізацію, стійкість до перешкод і можливість автономної навігації в реальному часі.

Метою роботи є розробка алгоритму SLAM-навігації для мобільної роботизованої платформи з використанням LiDAR-датчиків, RGB-камер, IMU-модулів, енкодерів коліс та програмного середовища ROS. Запропонована система навігації базується на комплексному використанні сенсорних даних. LiDAR-датчик забезпечує отримання інформації про відстані до об'єктів і формування двовимірної карти середовища. RGB-камера використовується для візуального аналізу простору та виявлення характерних ознак. IMU-модуль надає інформацію про прискорення, кутову швидкість і орієнтацію платформи, а енкодери коліс дозволяють оцінювати пройдений шлях і швидкість руху. Поєднання цих даних дає змогу зменшити похибку локалізації та підвищити стійкість алгоритму до шумів і втрати частини вимірювальної інформації.

Обробка даних реалізується у середовищі ROS, яке забезпечує взаємодію між сенсорними модулями, алгоритмами локалізації, побудови карти та планування маршруту. Для побудови карти можуть використовуватися алгоритми Gmapping або ORB-SLAM3. Gmapping є ефективним для побудови двовимірних карт на основі LiDAR-даних, тоді як ORB-SLAM3 дозволяє реалізувати візуальну SLAM-навігацію з використанням камер та інерціальних вимірювань.

Алгоритм роботи системи передбачає послідовне зчитування сенсорних даних, попередню фільтрацію вимірювань, оцінювання положення платформи, побудову карти середовища, планування маршруту та формування керуючих сигналів для приводу робота. Для глобального планування маршруту доцільно використовувати алгоритм A*, який дозволяє знайти оптимальний шлях до заданої цілі на побудованій карті. Для локального уникнення перешкод може застосовуватися алгоритм DWA, що враховує кінематичні обмеження платформи та поточну ситуацію навколо робота.

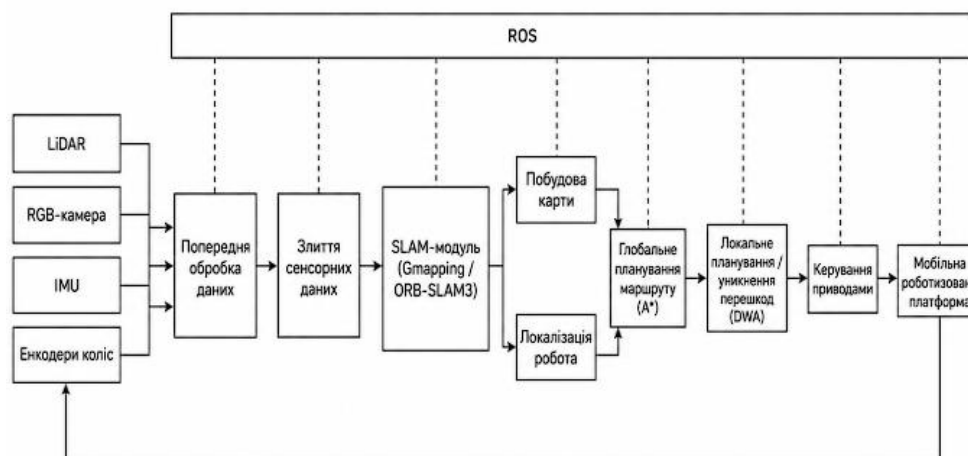


Рис. 1. Структурна схема системи SLAM-навігації мобільної роботизованої платформи

Використання SLAM-навігації дозволяє забезпечити автономне переміщення мобільної платформи, підвищити точність визначення координат, зменшити залежність від зовнішніх систем позиціонування та реалізувати ефективне уникнення перешкод у режимі реального часу. Такий підхід є особливо важливим для роботів, що працюють у приміщеннях, виробничих зонах і складських середовищах.

Список використаних джерел:

1. Zhao J., Liu S., Li J. Research and Implementation of Autonomous Navigation for Mobile Robots Based on SLAM Algorithm under ROS. *Sensors*. 2022. Vol. 22, No. 11. Article 4172. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/11/4172>

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА СИСТЕМА РОЗПІЗНАВАННЯ ПЕРЕШКОД МОБІЛЬНИМ РОБОТОМ У ЗАКРИТОМУ СЕРЕДОВИЩІ

Мобільні роботизовані платформи все частіше застосовуються у складських, медичних, офісних і побутових середовищах, де необхідні автономне переміщення, своєчасне виявлення перешкод і безпечне планування руху. У динамічних умовах робот має не лише фіксувати наявність об'єктів, а й розпізнавати їх тип, прогнозувати можливий рух і адаптувати маршрут.

Традиційні системи уникнення зіткнень, побудовані лише на датчиках відстані, не забезпечують повного аналізу середовища. Тому актуальним є використання інтелектуальних систем розпізнавання перешкод, які поєднують сенсорні дані, комп'ютерний зір і методи штучного інтелекту для підвищення автономності та безпеки мобільного робота.

Метою роботи є розробка інтелектуальної системи розпізнавання перешкод для мобільної роботизованої платформи, яка забезпечує виявлення, класифікацію об'єктів у режимі реального часу та формування керуючих рішень для уникнення зіткнень і перебудови маршруту.

Для ефективного сприйняття середовища мобільною платформою доцільно поєднувати дані LiDAR, RGB-D камери, ультразвукових та інфрачервоних датчиків. LiDAR забезпечує точне вимірювання відстаней і побудову карти, RGB-D камера дає зображення та глибину сцени, а допоміжні датчики дозволяють виявляти прозорі або дрібні перешкоди.

Обробка даних виконується за допомогою алгоритмів комп'ютерного зору, зокрема YOLO, SSD або семантичної сегментації. Це дає змогу класифікувати перешкоди на статичні, динамічні та потенційно небезпечні. Результати розпізнавання передаються до навігаційного модуля, який оновлює карту, прогнозує рух динамічних об'єктів і формує безпечну траєкторію за допомогою алгоритмів локального планування, зокрема Dynamic Window Approach.

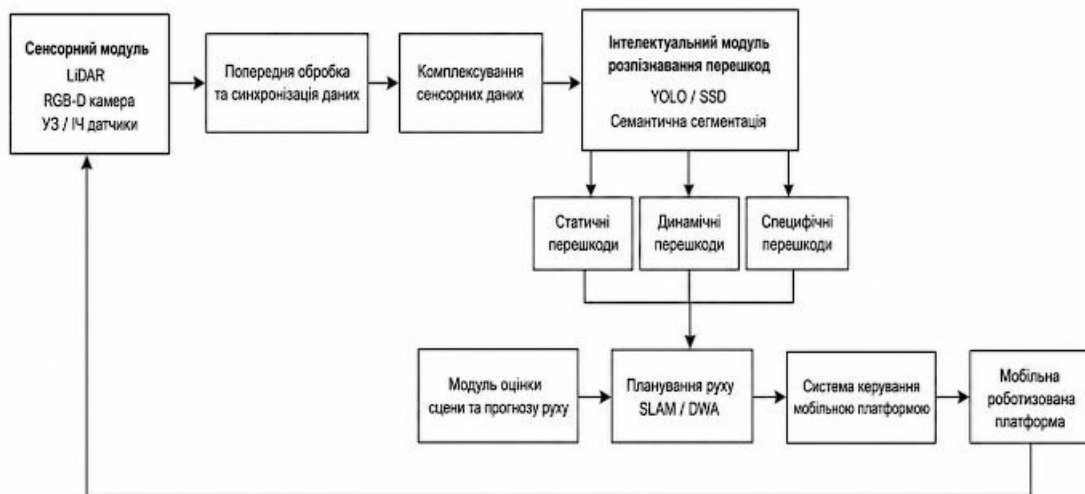


Рис. 1. Структурна схема інтелектуальної системи розпізнавання перешкод мобільної роботизованої платформи

Важливою перевагою інтелектуальної системи є можливість диференційованої реакції на різні типи об'єктів. Наприклад, стіну або меблі робот може розглядати як статичну перешкоду, людину як динамічний об'єкт, а дроти чи дрібні предмети на підлозі — як локальні небезпечні зони, які потребують обережного обходу. Такий підхід підвищує безпеку навігації та зменшує ризик аварійних ситуацій. Впровадження системи розпізнавання перешкод на основі RGB-D камер, LiDAR та неймережових алгоритмів дозволяє підвищити автономність мобільної роботизованої платформи, покращити якість навігації в закритих приміщеннях і забезпечити адаптацію до змінного середовища. Використання лише класичних датчиків відстані є недостатнім для сучасних автономних роботів, оскільки вони не забезпечують повного розуміння сцени.

Список використаних джерел:

1. Medjaldi A., Slimani Y., Karkar N. Cost-Effective Real-Time Obstacle Detection and Avoidance for AGVs Using YOLOv8 and RGB-D Sensors. *Engineering, Technology & Applied Science Research*. 2025. Vol. 15, No. 2. P. 21738–21745. URL: <https://etasr.com/index.php/ETASR/article/view/10135>

ВИКОРИСТАННЯ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ ДЛЯ КЛАСИФІКАЦІЇ ОБ'ЄКТІВ РОБОТОТЕХНІЧНОЮ ПЛАТФОРМОЮ

У сучасній робототехніці важливим завданням є забезпечення здатності робототехнічних платформ автоматично сприймати навколишнє середовище, розпізнавати об'єкти та приймати рішення на основі отриманої візуальної інформації. Особливо актуальним це є для автономних мобільних роботів, маніпуляторів, складських роботизованих систем і виробничих платформ, які працюють у змінних умовах та повинні виконувати завдання без постійного втручання оператора. Традиційні методи комп'ютерного зору часто базуються на ручному виділенні ознак, таких як контури, колір, текстура або геометричні параметри об'єкта. Проте такі підходи мають обмежену ефективність в умовах зміни освітлення, шумів, різних ракурсів спостереження, часткового перекриття об'єктів або складного фону. У зв'язку з цим актуальним є використання нейронних мереж, які здатні автоматично виділяти інформативні ознаки зображення та забезпечувати високу точність класифікації.

Метою роботи є розробка та дослідження підходу до класифікації об'єктів робототехнічною платформою з використанням нейронних мереж для підвищення точності, швидкодії та автономності системи. Запропонована система базується на використанні камери, обчислювального модуля та навченої моделі згорткової нейронної мережі. Камера робототехнічної платформи отримує зображення навколишнього середовища або об'єктів на робочій ділянці. Далі зображення передається до програмного модуля попередньої обробки, де виконується масштабування, нормалізація, фільтрація шумів та приведення даних до формату, придатного для подання на вхід нейронної мережі.

Згорткова нейронна мережа є доцільною для задач класифікації зображень, оскільки її структура дозволяє автоматично виділяти просторові ознаки об'єктів. На початкових шарах мережа виявляє прості елементи, наприклад межі та контури, а на глибших шарах складніші ознаки, пов'язані з формою, текстурою та загальним виглядом об'єкта. Після проходження через шари нейронної мережі система визначає ймовірність належності зображення до певного класу.

Узагальнено модель класифікації можна подати у вигляді:

$$y = f(Wx + b)$$

де x – вхідні дані, тобто зображення або його ознаки; W – вагові коефіцієнти нейронної мережі; b – зміщення; f – нелінійна функція активації; y – результат класифікації об'єкта.

Для навчання моделі використовуються набори даних із розміченими зображеннями. На етапі навчання нейронна мережа порівнює власний результат із правильним класом об'єкта та коригує вагові коефіцієнти. Практична реалізація системи може виконуватися із застосуванням мов програмування Python та бібліотек TensorFlow, Keras або PyTorch. Для роботи на робототехнічній платформі можуть використовуватися одноплатні комп'ютери, наприклад Raspberry Pi, NVIDIA Jetson або інші Edge AI-пристрої.

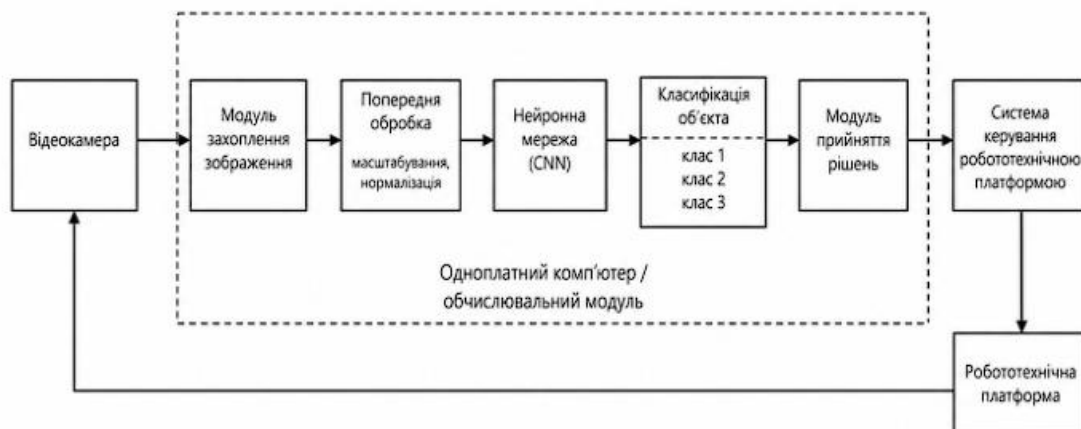


Рис. 1. Структурна схема системи класифікації об'єктів робототехнічною платформою на основі нейронної мережі

Алгоритм роботи системи включає такі етапи: захоплення зображення камерою, попередню обробку вхідних даних, передавання зображення до нейронної мережі, класифікацію об'єкта, формування результату та передавання інформації до системи керування робототехнічною платформою. На основі

результатів класифікації робот може виконувати відповідні дії: захоплення об'єкта, сортування, обхід перешкоди, переміщення до цілі або зміну маршруту.

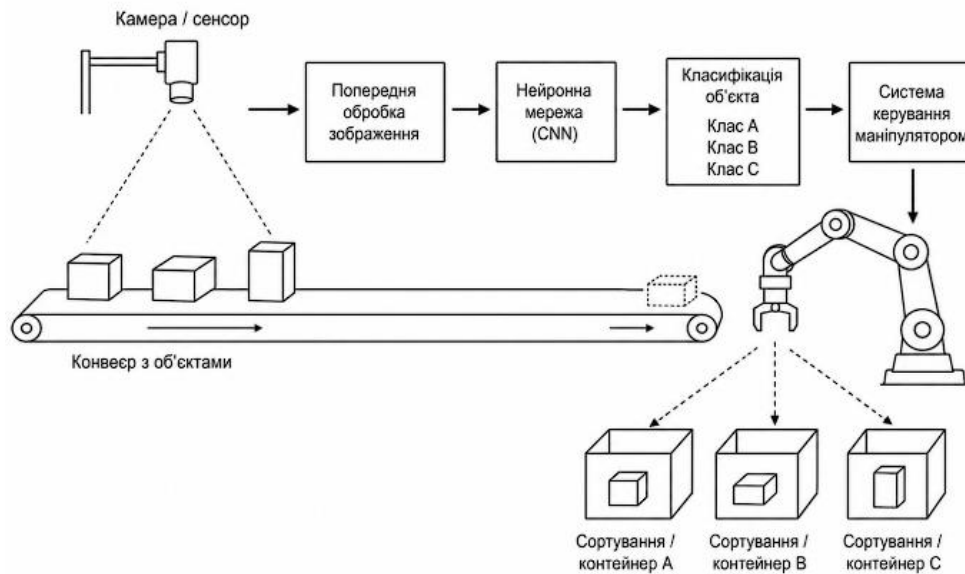


Рис. 2. Процес класифікації об'єктів роботизованим маніпулятором на конвеєрі

Очікуваним результатом використання нейронних мереж є підвищення точності класифікації об'єктів, зменшення впливу зовнішніх факторів, покращення швидкодії системи та забезпечення роботи в режимі реального часу. Це особливо важливо для робототехнічних платформ, які функціонують у динамічному середовищі та повинні швидко реагувати на зміну положення або типу об'єктів.

Список використаних джерел:

1. Ye Y. et al. Dynamic and Real-Time Object Detection Based on Deep Learning for Home Service Robots. *Sensors*. 2023. Vol. 23, No. 23. Article 9482. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/23/23/9482>
2. Zhao J., Liu S., Li J. Research and Implementation of Autonomous Navigation for Mobile Robots Based on SLAM Algorithm under ROS. *Sensors*. 2022. Vol. 22, No. 11. Article 4172. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/11/4172>
3. Redmon J., Divvala S., Girshick R., Farhadi A. You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2016. P. 779–788. URL: <https://arxiv.org/abs/1506.02640>
4. Liu W. et al. SSD: Single Shot MultiBox Detector. *European Conference on Computer Vision*. 2016. P. 21–37. URL: <https://arxiv.org/abs/1512.02325>
5. Ghani I.S.A. et al. Developing a Mobile Robot to Detect and Collect an Object Based on CNN and IMU Sensor. *Proceedings of the 8th FIRST 2024 International Conference on Global Innovations*. 2025. P. 443–461. URL: <https://www.atlantis-press.com/article/126010449.pdf>

ЗАСТОСУВАННЯ КОМП'ЮТЕРНОГО ЗОРУ ДЛЯ ПОЗИЦІОНУВАННЯ ПРОМИСЛОВОГО РОБОТА

Розвиток сучасної промислової робототехніки безпосередньо пов'язаний із впровадженням систем комп'ютерного зору, які забезпечують автоматичне розпізнавання об'єктів, визначення координат та адаптивне керування роботизованими комплексами. Використання комп'ютерного зору дозволяє значно підвищити точність позиціонування промислових роботів, автоматизувати виробничі процеси та забезпечити гнучкість виробництва в умовах Industry 4.0. Традиційні системи позиціонування роботів базуються на попередньо заданих координатах та жорстко визначених траєкторіях руху. Однак у реальних виробничих умовах виникають похибки, пов'язані зі зміщенням деталей, вібраціями, неточністю механічних вузлів або зміною положення об'єктів у робочій зоні. Комп'ютерний зір дозволяє компенсувати ці недоліки шляхом аналізу зображень із камер та визначення просторового положення об'єктів у режимі реального часу.

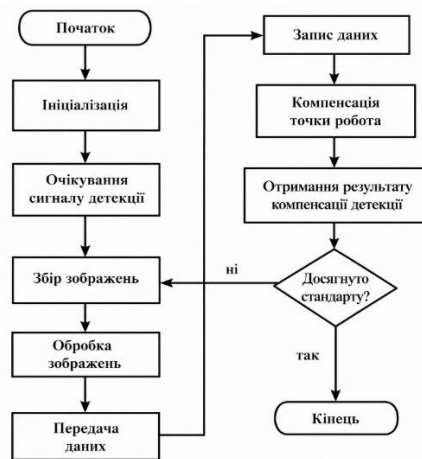


Рис. 1. Операційна блок-схема системи компенсації позиціонування робота

Основою систем комп'ютерного зору є цифрові камери, датчики глибини та алгоритми обробки зображень. Для визначення координат об'єктів використовуються методи сегментації, фільтрації, виділення контурів, пошуку ключових точок та калібрування камер. Значного поширення набули алгоритми машинного навчання та згорткові нейронні мережі (CNN), які забезпечують високу точність розпізнавання деталей навіть у складних умовах освітлення або при частковому перекритті об'єктів.

У промислових роботизованих системах комп'ютерний зір застосовується для виконання операцій складання, сортування, зварювання, контролю якості та автономного маніпулювання об'єктами. Система аналізує відеопотік, визначає координати деталі та передає їх до контролера робота для коригування траєкторії руху. Це забезпечує високу точність позиціонування та дозволяє працювати з динамічними об'єктами без необхідності жорсткого програмування всіх операцій.

Перспективним напрямом є інтеграція систем комп'ютерного зору з технологіями штучного інтелекту та цифрових двійників. Завдяки використанню нейронних мереж роботи можуть самостійно адаптуватися до змін виробничого середовища, аналізувати помилки позиціонування та оптимізувати власні траєкторії руху. Поєднання комп'ютерного зору та алгоритмів прогнозування відкриває нові можливості для створення інтелектуальних робототехнічних систем із високим рівнем автономності. Використання комп'ютерного зору в системах позиціонування промислових роботів дозволяє підвищити точність і швидкість роботизованих комплексів, забезпечити адаптивність виробничих процесів та знизити вплив людського фактору. Подальший розвиток технологій штучного інтелекту та машинного навчання сприятиме створенню більш ефективних і автономних промислових роботів нового покоління.

Список використаних джерел:

1. Bilal D.K., Ulusoy İ., Töreyn B.U. Development of a Vision Based Pose Estimation System for Robotic Machining and Improving Its Accuracy Using LSTM Neural Networks and Sparse Regression. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2022. Vol. 74. Article 102286. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0736584521001423>

Сардаківський А.В., здобувач
Ткачук А.Г., доцент
Кравчук А.Р., доцент

Державний університет «Житомирська політехніка»

СИСТЕМА АВТОНОМНОГО РУХУ СКЛАДСЬКОГО РОБОТА НА ОСНОВІ LiDAR-НАВІГАЦІЇ

Сучасні складські комплекси активно переходять до автоматизації логістичних процесів з метою підвищення ефективності та зниження витрат. Використання автономних мобільних роботів дозволяє забезпечити безперервну роботу та мінімізувати вплив людини. Однією з ключових задач є точна та надійна навігація в динамічному середовищі складу, де традиційні методи є недостатньо гнучкими. Тому застосування LiDAR-навігації є актуальним напрямом досліджень.

Традиційні системи навігації складських роботів часто базуються на магнітних стрічках, QR-кодах або ручному керуванні, що обмежує їх адаптивність та масштабованість. Такі рішення мають низьку гнучкість при зміні конфігурації складу та потребують додаткових витрат на інфраструктуру. Крім того, вони не здатні ефективно працювати в реальному часі при зміні середовища.

Метою роботи є розробка системи автономного руху складського робота з використанням LiDAR-навігації для забезпечення точної локалізації та побудови маршруту в реальному часі. Запропонована система базується на використанні лазерного далекоміра для отримання даних про навколишнє середовище. Робот формує карту приміщення за допомогою алгоритму SLAM (Simultaneous Localization and Mapping), що дозволяє одночасно визначати власне положення та будувати карту навколишнього середовища [1]. Апаратна частина складається з: LiDAR-сенсору, одноплатного комп'ютера, драйверів моторів та системи живлення. Для обробки даних використовується програмне середовище на базі Robot Operating System, що інтегрується з сенсорами та алгоритмами [2].



Рис. 1. Результат сканування складського приміщення за допомогою LiDAR-сенсора

Алгоритм навігації складається з кількох етапів: зчитування даних з LiDAR, фільтрація шумів, побудова карти, визначення позиції робота та планування маршруту для подальшого руху (наприклад, алгоритм A*). Для уникнення перешкод застосовується локальне планування траєкторії. Запропонована система забезпечує підвищення точності навігації та автономності роботи робота. Очікується зниження витрат на інфраструктуру складу та підвищення ефективності логістичних процесів. Система здатна працювати в реальному часі в умовах змінного середовища.

Список використаних джерел:

1. Zhao J., Liu S., Li J. Research and Implementation of Autonomous Navigation for Mobile Robots Based on SLAM Algorithm under ROS. *Sensors*. 2022. Vol. 22, No. 11. Article 4172. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/11/4172>
2. Ušinskis V., Nowicki M., Dzedzickis A., Bučinskas V. Sensor-Fusion Based Navigation for Autonomous Mobile Robot. *Sensors*. 2025. Vol. 25, No. 4. Article 1248. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/25/4/1248>
3. Jiang S. et al. Autonomous Navigation System of Greenhouse Mobile Robot Based on 3D LiDAR and 2D LiDAR SLAM. *Frontiers in Plant Science*. 2022. Vol. 13. Article 815218. URL: <https://www.frontiersin.org/journals/plant-science/articles/10.3389/fpls.2022.815218/full>

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ СЕНСОРІВ ДЛЯ НАВІГАЦІЇ МОБІЛЬНИХ РОБОТІВ

Сучасна мобільна робототехніка активно впроваджується у логістиці, сільському господарстві, промисловості, сервісній сфері та пошуково-рятувальних операціях. Ефективність роботи мобільного робота значною мірою залежить від точності навігації, здатності визначати власне положення та своєчасно виявляти перешкоди в режимі реального часу. У зв'язку з цим вибір сенсорної системи є одним із ключових етапів проектування робототехнічної платформи, оскільки саме від неї залежить надійність роботи робота в різних умовах середовища.

Традиційні підходи до навігації часто ґрунтуються на використанні одного типу датчиків, що обмежує функціональні можливості системи. Ультразвукові сенсори є доступними та простими в реалізації, однак мають невисоку кутову точність. LiDAR забезпечує високу точність вимірювання відстаней і побудови карти, проте має вищу вартість та може некоректно працювати з прозорими або дзеркальними поверхнями. Системи комп'ютерного зору дають змогу отримувати більш інформативні дані про середовище, але залежать від освітлення та потребують значних обчислювальних ресурсів. Тому актуальним є порівняльний аналіз сенсорів та обґрунтування доцільності їх комплексного використання.

Метою роботи є проведення порівняльного аналізу технічних характеристик і експлуатаційних особливостей LiDAR-сенсорів, стереокамер та ультразвукових датчиків для оптимізації системи навігації мобільного робота.

Для дослідження запропоновано експериментальну модель мобільної колісної платформи на базі мікрокомп'ютера Raspberry Pi 4 з підтримкою операційної системи ROS 2. Такий обчислювальний модуль забезпечує можливість обробки сенсорних даних, роботи з хмарами точок, побудови карти середовища та реалізації алгоритмів навігації. У складі сенсорної системи розглянуто LiDAR RPLIDAR A2M12, стереокамеру Intel RealSense D435i та масив ультразвукових датчиків HC-SR04.

LiDAR-сенсор забезпечує кругове сканування простору та дозволяє будувати двовимірні карти приміщень за допомогою алгоритмів Gmapping або Cartographer. Його основною перевагою є висока точність вимірювання відстаней і стабільна робота в умовах слабкого освітлення. Водночас LiDAR може некоректно визначати прозорі об'єкти, зокрема скляні перегородки, а також мати похибки при роботі з дзеркальними поверхнями.

Сtereoкамера Intel RealSense D435i формує карту глибини та дозволяє виявляти об'єкти складної форми, які можуть не потрапляти в площину сканування LiDAR. Наявність інерційного вимірювального модуля дає змогу реалізувати візуально-інерціальну одометрію, що підвищує стійкість навігації у випадках проковзування коліс. Проте ефективність стереозору знижується за умов недостатнього освітлення, засвічення або низької текстурованості поверхонь.

Ультразвукові датчики HC-SR04 мають нижчу точність і меншу просторову роздільну здатність, однак є корисними для виявлення прозорих об'єктів, які можуть бути невидимими для LiDAR. Їх доцільно використовувати як допоміжний сенсорний рівень для контролю ближньої зони робота та підвищення безпеки руху. Запропонована архітектура навігації базується на комплексуванні сенсорних даних. Дані від LiDAR, стереокамери та ультразвукових датчиків об'єднуються за допомогою алгоритмів sensor fusion, зокрема розширеного фільтра Калмана. Такий підхід дозволяє компенсувати недоліки окремих сенсорів: у разі поганого освітлення більша вага надається LiDAR, а при наближенні до прозорих перешкод – ультразвуковим датчикам.

Узагальнений показник достовірності сенсорної інформації можна подати у вигляді:

$$P_{final} = w_1 P_{lidar} + w_2 P_{vision} + w_3 P_{sonar}$$

де P_{final} – підсумкова оцінка достовірності даних; P_{lidar} , P_{vision} , P_{sonar} – оцінки достовірності даних від LiDAR, стереокамери та ультразвукових датчиків відповідно; w_1 , w_2 , w_3 – вагові коефіцієнти, що змінюються залежно від умов середовища.

Порівняння сенсорів для навігації мобільного робота

Тип сенсора	Точність	Робота в темряві	Виявлення скла	Основна перевага	Основний недолік
LiDAR	висока, близько ± 1 см	добра	ні	точне картографування	висока вартість, проблеми зі склом
Стереокамера	середня, близько $\pm 2-5$ см	обмежена	частково	карта глибини та візуальні ознаки	залежність від освітлення
Ультразвуковий датчик	низька, близько $\pm 3-10$ см	добра	так	виявлення прозорих об'єктів	низька кутова точність

Експериментальні дослідження показують, що комплексне використання сенсорів підвищує надійність навігації порівняно із застосуванням лише одного типу датчика. Зокрема, поєднання LiDAR, стереокамери та ультразвукових сенсорів дозволяє зменшити кількість критичних зіткнень із прозорими й дрібними об'єктами, підвищити точність локалізації та забезпечити стабільне оновлення локальної карти в реальному часі. порівняльний аналіз сенсорів для навігації мобільних роботів показує, що жоден окремий тип датчика не є універсальним для всіх умов експлуатації. Найбільш ефективним рішенням є комбінована сенсорна система, у якій LiDAR забезпечує точне картографування, стереокамера – просторове сприйняття сцени, а ультразвукові датчики – контроль ближньої зони та виявлення прозорих перешкод. Такий підхід підвищує автономність, безпечність і надійність мобільної роботизованої платформи.

Список використаних джерел:

1. Ušinskis V., Nowicki M., Dzedzickis A., Bučinskas V. Sensor-Fusion Based Navigation for Autonomous Mobile Robot. *Sensors*. 2025. Vol. 25, No. 4. Article 1248. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/25/4/1248>
2. Liu Y. et al. A Review of Sensing Technologies for Indoor Autonomous Mobile Robots. *Sensors*. 2024. Vol. 24, No. 3. Article 1222. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/24/3/1222>
3. Jia Y., Luo H., Zhao F., Jiang G., Li Y., Yan J., Jiang Z., Wang Z. LVIO-Fusion: A Self-Adaptive Multi-Sensor Fusion SLAM Framework Using Actor-Critic Method. *arXiv*. 2021. Article arXiv:2106.06783. URL: <https://arxiv.org/abs/2106.06783>
4. Barreto-Cubero A.J. et al. Sensor Data Fusion for a Mobile Robot Using Neural Networks. *Sensors*. 2022. Vol. 22, No. 1. Article 305. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/1/305>
5. Zhao J., Liu S., Li J. Research and Implementation of Autonomous Navigation for Mobile Robots Based on SLAM Algorithm under ROS. *Sensors*. 2022. Vol. 22, No. 11. Article 4172. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/11/4172>

**Марченко К.Л., здобувач
Ткачук Д.Ю., аспірантка
Крижанівська І.В., доцент**

Державний університет «Житомирська політехніка»

СИСТЕМА КЕРУВАННЯ МАНІПУЛЯТОРОМ ДЛЯ СОРТУВАННЯ ОБ'ЄКТІВ ЗА ФОРМОЮ ТА КОЛЬБОРОМ

Сучасні виробничі підприємства все частіше впроваджують автоматизовані системи керування технологічними процесами, що дозволяють підвищити продуктивність, зменшити кількість помилок та оптимізувати використання ресурсів. Одним із важливих напрямів автоматизації є створення роботизованих систем сортування продукції. Особливу актуальність мають системи керування маніпуляторами, оснащені засобами комп'ютерного зору, які здатні автоматично визначати характеристики об'єктів та виконувати їх сортування за заданими параметрами.

Система керування маніпулятором для сортування об'єктів за формою та кольором поєднує у собі засоби комп'ютерного зору, мікроконтролерне керування та виконавчі механізми. Основною задачею такої системи є автоматичне розпізнавання параметрів об'єкта, визначення його належності до певної категорії та подальше переміщення у відповідну зону сортування. Використання подібних систем дозволяє мінімізувати вплив людського фактора та забезпечити стабільну якість виконання операцій навіть при високій швидкості виробничого процесу.

Типова структура системи включає відеокамеру або цифровий датчик зображення, модуль обробки даних, систему керування приводами та роботизований маніпулятор. Камера здійснює постійне захоплення зображень об'єктів, які переміщуються конвеєром або знаходяться у робочій зоні маніпулятора. Отримане зображення передається до програмного середовища, де виконується його попередня обробка: усунення шумів, нормалізація освітлення, корекція контрастності та виділення контурів об'єкта. Це дозволяє підвищити точність подальшого аналізу та забезпечити стабільну роботу системи при змінних умовах освітлення.

Для визначення кольору об'єкта використовуються алгоритми аналізу кольорових компонентів у просторі RGB або HSV. Колірні характеристики дозволяють швидко класифікувати продукцію за заданими критеріями. Визначення форми виконується шляхом аналізу геометричних параметрів об'єкта, таких як площа, периметр, кількість кутів або особливості контурів. Для цього застосовуються методи сегментації зображення, контурного аналізу та алгоритми розпізнавання образів. У сучасних системах додатково можуть використовуватися нейронні мережі та методи машинного навчання, що забезпечують вищу точність класифікації складних об'єктів.

Після завершення аналізу система формує керуючі сигнали для маніпулятора. Залежно від отриманих результатів маніпулятор виконує захоплення об'єкта за допомогою механічного захвату або вакуумної присоски та переміщує його у відповідний контейнер чи сектор сортування. Для керування рухами маніпулятора використовуються сервоприводи або крокові двигуни, які забезпечують точне позиціонування та плавність переміщення. Координація роботи всіх компонентів здійснюється за допомогою мікроконтролерів Arduino, Raspberry Pi або промислових контролерів.

Використання автоматизованих систем сортування має значні переваги у порівнянні з ручною працею. Насамперед це підвищення швидкості обробки продукції, зменшення кількості помилок сортування та зниження витрат на виробництво. Такі системи можуть працювати безперервно протягом тривалого часу та забезпечувати стабільну якість виконання операцій. Крім того, автоматизація процесу дозволяє знизити навантаження на персонал та підвищити рівень безпеки праці.

Системи сортування за формою та кольором широко застосовуються у харчовій промисловості, логістичних центрах, фармацевтичному виробництві, пакувальних лініях та електронній промисловості. Вони дозволяють автоматизувати процеси пакування, сортування деталей, контролю якості продукції та розподілу товарів. Завдяки розвитку технологій комп'ютерного зору та робототехніки такі системи стають більш доступними, точними та ефективними, що сприяє їх активному впровадженню у сучасне виробництво.

Список використаних джерел:

1. Ali M.H., Mailah M., Samin R.E., Jabbar H.A. Vision-Based Robot Manipulator for Industrial Applications. *Procedia Computer Science*. 2018. Vol. 133. P. 205–212. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050918309694>
2. Abdullah-Al-Noman M. et al. Computer Vision-Based Robotic Arm for Object Color, Shape, and Size Detection. *Journal of Robotics and Control*. 2022. Vol. 3, No. 3. P. 180–187. URL: <https://journal.umy.ac.id/index.php/jrc/article/view/13906>

МОДЕЛЮВАННЯ ТРАЄКТОРІЇ РУХУ МОБІЛЬНОГО РОБОТА З УРАХУВАННЯМ ДИНАМІЧНИХ ПЕРЕШКОД

Автономні мобільні платформи стрімко інтегруються в сферу сервісної робототехніки, стаючи її невід'ємним елементом. Зокрема, особливої популярності набуває впровадження роботів-офіціантів, які здатні реагувати на зміни динамічного середовища, передбачати переміщення інших об'єктів і адаптувати власний маршрут без втрати стійкості та ефективності роботи.

У дослідженні аналізується мобільний робот-офіціант, конструкція якого базується на чотириколісній платформі та оснащена системою інтелектуального зору. Для опису руху використовується динамічна модель із трьома ступенями свободи (3-DOF), яка охоплює поздовжній, поперечний і кутовий рух платформи. Параметрами моделі є координати центра мас робота x, y , кут орієнтації ψ , лінійна швидкість V , та параметри рухомих перешкод. Кінематика платформи описується системою рівнянь:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= V \cos(\psi + \beta) \\ \dot{y} &= V \sin(\psi + \beta) \\ \dot{\psi} &= \frac{V \cos \beta}{l_f + l_r} t g \delta \end{aligned}$$

де V - швидкість робота; β – кут орієнтації; δ - кут повороту передніх коліс.

Щоб забезпечити стабільний рух у динамічному середовищі, використовується метод потенціальних полів. Результируючий вектор руху визначається як сума сил притягання до цілі та відштовхування від перешкод. Потенціальна функція середовища описується наступним чином:

$$U(q) = U_{att}(q) + U_{rep}(q)$$

де $U_{att}(q)$ - потенціал притягання до цілі; $U_{rep}(q)$ - потенціал відштовхування від динамічних об'єктів. Вектор швидкості руху робота формується за градієнтом потенціальної функції:

$$F(q) = -\nabla U(q)$$

Підхід забезпечує адаптивне оминання динамічних перешкод у реальному часі. Для аналізу середовища та сегментації об'єктів використовуються RGB-D камери та LiDAR-сенсори:

$$P_i(x_i, y_i, t)$$

де x_i, y_i - координати перешкоди, а t - момент часу.

Прогнозування майбутнього положення динамічних об'єктів використовується модель лінійної екстраполяції:

$$P_i(t + \Delta t) = P_i(t) + V_i \Delta t$$

де P_i - координати перешкоди, V_i - вектор швидкості. Це дозволяє роботу прогнозувати траєкторію людини або іншого рухомого об'єкта та завчасно перебудувати маршрут.

Стабільність платформи оцінюється за допомогою критерію Zero Moment Point (ZMP). Розрахунок координати точки нульового моменту виконується за формулою:

$$x_{ZMP} = \frac{\sum m_i (\ddot{z}_i + g) x_i - \sum m_i \dot{x}_i z_i}{\sum m_i (\ddot{z}_i + g) x_i}$$

де m_i - маса елемента системи; x_i, z_i - координати центра мас; g - прискорення вільного падіння. Вихід точки ZMP за межі опорного контуру призводить до втрати стійкості. Моделювання показало, що оптимальна швидкість для робота-офіціанта становить 1.2–1.8 м/с. При перевищенні цих значень зростає ризик перекидання та накопичення похибки позиціонування.

Інтелектуальний зір та прогнозування у поєднанні з аналізом стабільності забезпечують автономність роботів у складних динамічних середовищах.

Список використаних джерел:

1. Almazrouei K., Kamel I., Rabie T. Dynamic Obstacle Avoidance and Path Planning through Reinforcement Learning. *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13, No. 14. Article 8174. URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/13/14/8174>
2. Yang L., Li P., Qian S., Quan H., Miao J., Liu M., Hu Y., Memetimin E. Path Planning Technique for Mobile Robots: A Review. *Machines*. 2023. Vol. 11, No. 10. Article 980. URL: <https://www.mdpi.com/2075-1702/11/10/980>

АВТОНОМНИЙ КРОКУЮЧИЙ РОБОТ З ЕЛЕМЕНТАМИ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ДЛЯ ПОШУКУ ТА РОЗПІЗНАВАННЯ ОБ'ЄКТІВ У СКЛАДНИХ УМОВАХ

Сучасна робототехніка потребує автономних систем, здатних працювати у складних і небезпечних умовах, зокрема під час пошуково-рятувальних операцій, моніторингу важкодоступних територій та обстеження небезпечних зон. Крокуючі роботи мають перевагу над колісними платформами, оскільки можуть долати нерівності, сходи, уламки та інші складні перешкоди. Актуальність роботи полягає у створенні крокуючої роботизованої платформи, яка здатна не лише пересуватися складним рельєфом, а й автономно виявляти та розпізнавати об'єкти за допомогою штучного інтелекту. Це особливо важливо в умовах втрати зв'язку з оператором, радіоперешкод, недостатнього освітлення, задимлення або часткового перекриття цілі.

Метою роботи є розробка концепції автономного крокуючого робота з елементами штучного інтелекту, здатного здійснювати навігацію по неструктурованому рельєфу та виконувати пошук і розпізнавання заданих об'єктів за допомогою бортових алгоритмів обробки візуальної інформації.

Запропонована система має дворівневу архітектуру: рівень керування рухом і рівень інтелектуального аналізу середовища. Керування рухом реалізується на базі мікроконтролера ESP32, який розраховує кінематику кінцівок, формує сигнали для сервоприводів і забезпечує стабілізацію корпусу під час переміщення складним рельєфом. Інтелектуальний рівень працює на окремому обчислювальному модулі, що обробляє відеопотік із бортової камери. Для виявлення та класифікації об'єктів використовується оптимізована нейромережева модель типу YOLO, яка працює в режимі реального часу. Обробка даних безпосередньо на борту робота за принципом Edge Computing зменшує потребу в передаванні відеопотоку на зовнішній сервер. Для підвищення стійкості руху система використовує дані гіроскопа, акселерометра та далекомірів. Вони дозволяють оцінювати нахил корпусу, виявляти перешкоди й коригувати параметри ходи. Передавання телеметрії, координат виявлених об'єктів і службових повідомлень до диспетчерського пункту може здійснюватися через MQTT, що знижує навантаження на канал зв'язку та підвищує автономність робота.

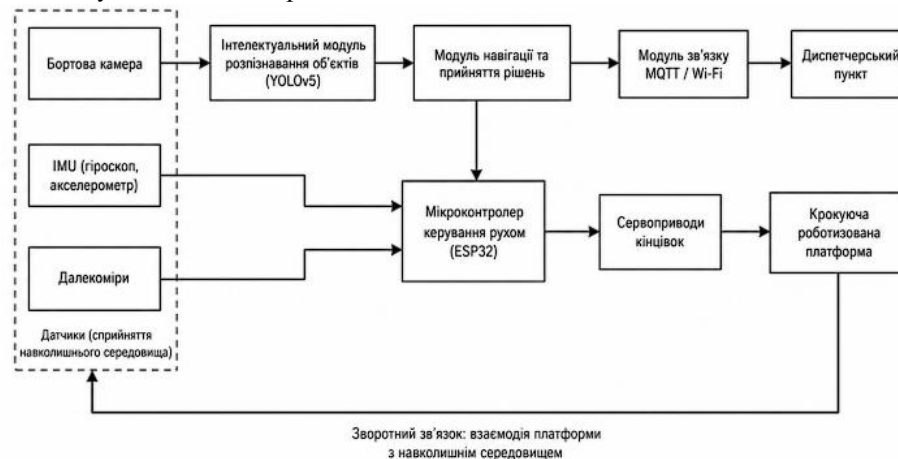


Рис. 1. Структурна схема автономного крокуючого робота з інтелектуальним модулем розпізнавання об'єктів

Очікуваним результатом впровадження запропонованої системи є підвищення автономності крокуючої роботизованої платформи, зменшення залежності від постійного керування оператором та забезпечення надійного розпізнавання цільових об'єктів у складних умовах. Завдяки перенесенню обчислень на бортову платформу скорочується час реакції системи на появу об'єкта в полі зору, а використання нейромережевих алгоритмів дозволяє досягти високої точності детекції.

Список використаних джерел:

1. Jocher, G., et al. YOLOv5 by Ultralytics. GitHub repository, 2020. URL: <https://github.com/ultralytics/yolov5>

*Добржанський О.О., доцент
Богдановський М.В., старший викладач
Горбик Д.П., здобувач
Державний університет «Житомирська політехніка»*

РОЗРОБКА ІМЕРСИВНОЇ, НАВЧАЛЬНОЇ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ РУХІВ МАНІПУЛЯТОРА РОБОТА НА БАЗІ ЦИФРОВОГО ДВІЙНИКА

В сучасних роботизованих системах однією з основних задач є не лише побудова траєкторії руху робочого інструменту, але і забезпечення необхідного характеру руху під час виконання технологічного процесу. Для значної кількості прикладних задач, таких як фарбування поверхонь, полірування, шліфування, нанесення покриттів або художня обробка, кінцевий результат залежить не тільки від геометрії траєкторії, а і від швидкості переміщення інструменту, плавності руху, наявності локальних затримок та характеру прискорення і гальмування.

Класичні методи програмування роботизованих систем передбачають створення набору координатних точок, траєкторій та швидкостей переміщення. Проте навіть при використанні сучасних CAD/CAM систем залишається складною задачею передачі роботи особливостей руху, які формуються безпосередньо оператором під час виконання технологічної операції. Особливо це стосується процесів, у яких якість обробки значною мірою залежить від досвіду оператора та його моторики.

Одним із перспективних напрямків вирішення даної проблеми є використання VR-орієнтованих цифрових двійників роботизованих систем. На відміну від класичних систем симуляції, цифровий двійник дозволяє не лише візуалізувати роботу робота у тривимірному просторі, але і реалізувати двосторонню взаємодію між оператором, віртуальною моделлю та фізичною роботизованою системою.

В межах даної роботи розглядається концепція використання VR-системи як середовища навчання роботизованого маніпулятора через демонстрацію руху оператором. Основною ідеєю запропонованого підходу є використання контролерів VR-гарнітури для зчитування не тільки координат положення руки оператора, а і динамічних параметрів руху: швидкості переміщення, прискорення, затримок та характеру зміни траєкторії у просторі.

Запропонована система включає цифровий двійник маніпулятора, створений у середовищі Autodesk Fusion 360 та інтегрований у програмний комплекс Unity. Віртуальна модель містить окремі кінематичні ланки, що відповідають фізичній конструкції реального робота. Для кожного суглоба задаються обмеження кутів повороту та формується ієрархічна структура, що дозволяє реалізувати пряме та зворотне кінематичне керування.

Взаємодія оператора із цифровим двійником здійснюється за допомогою VR-гарнітури Meta Quest 3S та контролерів руху. Під час роботи система зчитує положення та орієнтацію контролерів у просторі, а також параметри динаміки руху. Отримані дані можуть бути використані для формування траєкторії руху роботизованого маніпулятора у режимі реального часу або для подальшого відтворення записаного руху.

Особливістю запропонованого підходу є можливість передачі роботи саме характеру виконання технологічної операції. Наприклад, при імітації процесу фарбування оператор може природним способом показати, у яких ділянках необхідно зменшити швидкість руху інструменту, де необхідна короткочасна затримка, а де переміщення має бути більш швидким. Аналогічний підхід може бути використаний і для задач полірування або шліфування поверхонь, де якість обробки суттєво залежить від рівномірності та плавності руху інструменту.

Для реалізації взаємодії між цифровим двійником та фізичним роботом використовується програмний комплекс Unity, мікроконтролер Arduino та роботизований маніпулятор Braccio. Передача даних між системою віртуальної реальності та фізичним роботом виконується через послідовний інтерфейс у режимі реального часу. Це дозволяє синхронізувати рухи цифрового двійника та реальної роботизованої системи.

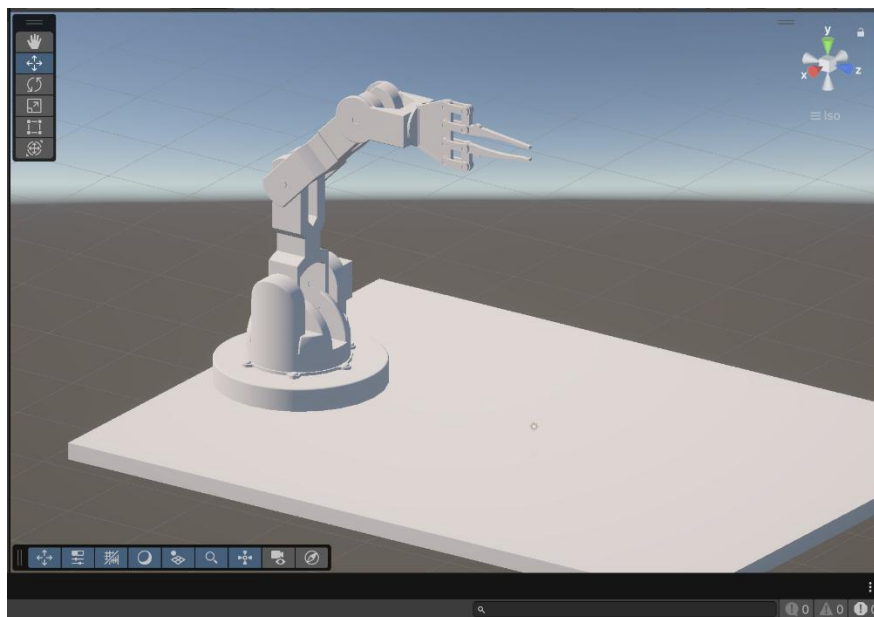


Рис 1. Цифровий двійник робота Врассіо у середовищі Unity

Запропонований підхід дозволяє значно спростити процес навчання роботів для виконання складних технологічних операцій, зменшити необхідність ручного програмування траєкторій та забезпечити передачу практичного досвіду оператора безпосередньо до системи керування роботом. Крім того, використання VR-середовища дозволяє виконувати попередню перевірку траєкторій та взаємодії із навколишніми об'єктами без ризику пошкодження обладнання або заготовки. Використання VR-орієнтованого цифрового двійника створює перспективну основу для побудови систем інтуїтивного навчання роботизованих комплексів, у яких оператор може передавати не лише геометрію траєкторії, але і динамічні характеристики руху, що є важливим для широкого спектру технологічних процесів.

Список використаних джерел:

1. Unity Real-Time Development Platform [Electronic resource]. – Access mode: <https://unity.com/>
2. Autodesk Fusion 360 [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.autodesk.com/products/fusion-360>
3. Craig J.J. Introduction to Robotics: Mechanics and Control. – Pearson Education, 2018.
4. Siciliano B., Khatib O. Springer Handbook of Robotics. – Springer, 2016.

Яременко Д.В., здобувач
Кравчук А.Р., доцент
Ткачук А.Г., доцент

Державний університет «Житомирська політехніка»

РОЗРОБКА МОБІЛЬНОГО РОБОТА ДЛЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО ПАТРУЛЮВАННЯ ТЕРИТОРІЇ

Забезпечення охорони периметрів промислових підприємств, складів, критичної інфраструктури та відкритих територій є важливим завданням у сфері безпеки. Традиційні підходи, що ґрунтуються на постійній присутності охоронного персоналу, є ресурсомісткими та не гарантують рівномірного і безперервного контролю. Стрімкий розвиток робототехніки, комп'ютерного зору та систем автономної навігації відкриває можливість створення мобільних роботів, здатних виконувати патрулювання без участі людини. Впровадження таких систем є актуальним у контексті зростання вимог до безпеки об'єктів та скорочення витрат на охорону.

Існуючі системи відеоспостереження є статичними і мають обмежений кут огляду, що залишає сліпі зони. Залучення охоронців пов'язане з людським фактором: втомою, неуважністю та суб'єктивністю прийнятих рішень. Наявні комерційні рішення у сфері охоронних роботів мають високу вартість та слабку адаптованість до специфіки конкретних об'єктів. Відсутність доступних і масштабованих платформ, що поєднують автономну навігацію, розпізнавання об'єктів у режимі реального часу та дистанційне сповіщення, стримує широке впровадження роботизованих систем патрулювання.

Метою роботи є розробка прототипу мобільного робота для автоматизованого патрулювання території, що реалізує автономний рух за заданим маршрутом, виявлення сторонніх об'єктів і осіб за допомогою комп'ютерного зору та надсилання сповіщень оператору у режимі реального часу.

Розроблений робот побудовано на колісній платформі з диференціальним приводом. Як обчислювальний модуль використовується одноплатний комп'ютер Raspberry Pi 4B із 4 ГБ оперативної пам'яті. Керування двигунами здійснюється через драйвер L298N, підключений до GPIO-інтерфейсу. Живлення забезпечується акумуляторним блоком LiFePO₄ ємністю 10 Аг, що забезпечує автономну роботу до 4 годин.

Навігація реалізована на основі одометрії та ультразвукових датчиків відстані HC-SR04, розміщених по периметру корпусу. Алгоритм обходу перешкод базується на методі векторного поля потенціалів (VFF). Маршрут патрулювання задається оператором у вигляді набору контрольних точок у системі координат об'єкта та зберігається у конфігураційному файлі формату JSON. Робот циклічно обходить задані точки, повертаючись до вихідної позиції після завершення обходу.

Система комп'ютерного зору побудована на базі камери Raspberry Pi Camera Module 3 та бібліотеки OpenCV. Виявлення людей здійснюється за допомогою попередньо навченої моделі YOLOv8n, оптимізованої для роботи на пристроях із обмеженими обчислювальними ресурсами. При виявленні об'єкта формується знімок із мітками обмежувачів рамок, який разом із часовою міткою та координатами місця виявлення передається оператору через Telegram Bot API.

Відстань до перешкоди, що враховується алгоритмом VFF при корекції курсу, визначається за формулою:

$$F_{rep} = k_r \cdot (1/d - 1/d_0)^2 \cdot (1/d^2)$$

де F_{rep} – відштовхувальна сила від перешкоди; d – поточна відстань до перешкоди (м); d_0 – зона впливу перешкоди (м); k_r – коефіцієнт відштовхування, що налаштовується емпірично.

Табл. 1.

Технічні характеристики розробленого мобільного робота

Параметр	Значення
Обчислювальний модуль	Raspberry Pi 4B (4 ГБ)
Привід	Диференціальний, 2 × DC-мотор 12 В
Максимальна швидкість	0,5 м/с
Джерело живлення	LiFePO ₄ , 10 Аг, автономність до 4 год

Сенсори навігації	УЗ-датчики HC-SR04 (6 шт.)
Камера	Raspberry Pi Camera Module 3, 12 Мп
Модель детекції	YOLOv8n, mAP ₅₀ = 89,4%
Канал сповіщень	Telegram Bot API (4G-модем)

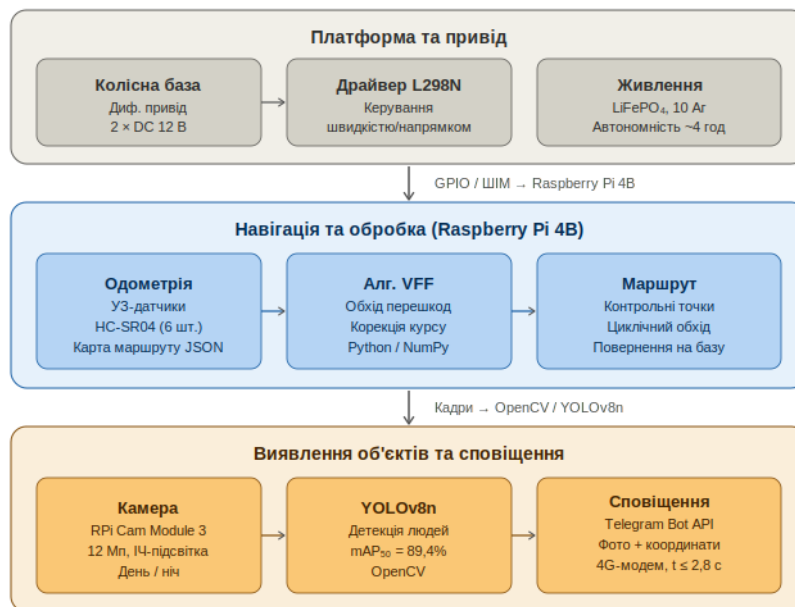


Рис. 1. Структурна схема мобільного робота для автоматизованого патрулювання території

Тестування прототипу на відкритому майданчику площею 500 м² показало, що робот стабільно виконує обхід маршруту з чотирьох контрольних точок з відхиленням від заданої траєкторії не більше 0,12 м. Точність виявлення людей у денний час склала 91,3 %, у нічний час із підсвічуванням ІЧ-прожектором – 83,7%. Середній час від виявлення об'єкта до отримання сповіщення оператором не перевищує 2,8 секунди. Розроблений мобільний робот для автоматизованого патрулювання забезпечує безперервний контроль заданої території з виявленням сторонніх осіб та оперативним сповіщенням без постійної участі охоронного персоналу. Подальші дослідження передбачають інтеграцію SLAM-навігації для роботи у динамічному середовищі та розширення функціоналу до мультироботних патрульних систем.

Список використаних джерел:

1. Siegwart R., Nourbakhsh I.R., Scaramuzza D. Introduction to Autonomous Mobile Robots. 2nd ed. Cambridge: MIT Press, 2011. 600 p.
2. Redmon J., Farhadi A. YOLOv3: An Incremental Improvement. *arXiv*. 2018. Article arXiv:1804.02767. URL: <https://arxiv.org/abs/1804.02767>

ЧИННИКИ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА ВИБІР ЗАХВАТНИХ ПРИСТРОЇВ ПРОМИСЛОВИХ РОБОТІВ

Стрімкий розвиток гнучких автоматизованих виробництв зумовлює необхідність підвищення ефективності роботизованих комплексів, що безпосередньо залежить від ефективності вибору кінцевого робочого органа – захватного пристрою (ЗП). З врахуванням конструктивно-технологічних особливостей аналізованих моделей промислових роботів (ПР) в умовах частоті зміни номенклатури об'єктів маніпулювання (ОМ) та необхідності мінімізації виробничих простоїв, обґрунтований вибір ЗП стає критичним завданням, що потребує врахування великої кількості самостійних та/або взаємопов'язаних чинників.

Процес вибору ЗП є багатофакторною ітераційною процедурою, де апріорі первинним чинником виступають властивості ОМ, що мають бути співставлені з характеристиками аналізованих ЗП-альтернатив ПР. Фізичні параметри ОМ, такі як його маса, габаритні розміри, конфігурація поверхонь тощо, безпосередньо визначають необхідний хід робочих органів та принцип утримання ОМ, зокрема вибір між механічним, вакуумним або магнітним типом ЗП. При цьому маса ОМ розглядається не лише в статичі, а й з урахуванням динамічних інерційних навантажень, що виникають при максимальних прискореннях ланок аналізованої маніпуляційної системи (МС) ПР, що вимагає в більшості випадків застосування коефіцієнтів запасу надійності. [1]

Наступна група чинників охоплює технічні характеристики ПР, де ключовим є співвідношення корисної вантажопідйомності та власне маса ЗП, яка зазвичай вважається паразитним навантаженням. Сумісність ЗП з ПР забезпечується можливим використанням додаткових конструктивних елементів, стандартних ISO-фланців або спеціалізованих адаптерів та швидкозмінних муфт, що дозволяє реалізувати гнучкість виробничого циклу.[3] Параметри технологічного середовища, своєю чергою, накладають обмеження на габаритні розміри ЗП для забезпечення його безперешкодного доступу у певні точки робочої зони обробки, наприклад, всередину до робочого простору технологічного обладнання ТО.

Застосування запропонованого багатоетапного підходу до вибору ЗП дозволяє розподілити всі чинники на наступні: жорсткі обмеження, що визначають фізичну можливість реалізації елементів роботизованого технологічного процесу процесу, та критерії відбору, такі як універсальність, час переналаштування, енергоспоживання тощо. Особлива увага приділяється аспектам безпеки, де конструкція ЗП повинна гарантувати утримання ОМ при раптовому зникненні живлення за рахунок самогальмівних механізмів або пружинних блоків.[2]

Підсумковий вибір захоплювального пристрою здійснюється на основі комплексного аналізу технічних, конструктивних, експлуатаційних та економічних чинників. Насамперед враховуються параметри технологічної операції, характеристики промислового робота та властивості об'єкта маніпулювання, зокрема його маса, форма, матеріал і стан поверхні. Пріоритет надається рішенням, що забезпечують надійне утримання об'єкта, точність позиціонування та сумісність із робочою зоною робота. Завершальними критеріями є вартість пристрою, ремонтпридатність, доступність запасних частин, умови постачання та економічна доцільність впровадження.

Окремо аналізуються властивості об'єкта маніпулювання, а саме його розміри, маса, матеріал, форма, стан поверхні, точність обробки та кількість можливих положень захоплення. Ці параметри визначають доцільний принцип утримання об'єкта: механічний, вакуумний, магнітний, фрикційний або комбінований. Додатково враховуються характеристики самого захоплювального пристрою: ціна, вантажопідйомність, маса, тип кріплення, матеріал і розміри робочих елементів. Завершальними критеріями вибору є ремонтпридатність, доступність запасних частин, умови постачання, можливість сервісного обслуговування та економічна доцільність впровадження.

Використання комбінованого методу вибору ЗП з розподілом характеристик на жорсткі та м'які є можливим та доцільним для розробки методів вибору ЗП та її автоматизованої реалізації, оскільки це мінімізує ризики технічної непридатності обладнання та сприяє підвищенню загальної рентабельності автоматизованого виробництва.

Список використаних джерел:

1. Проць Я. І. Захоплюючі пристрої промислових роботів: Навчальний посібник. — Тернопіль: ТДТУ ім. І. Пулюя, 2008. — 232 с.
2. ДСТУ EN ISO 10218-2:2016 Роботи та роботизовані пристрої. Вимоги щодо безпеки промислових роботів. Частина 2. Роботизовані системи та інтеграція (EN ISO 10218-2:2011, IDT; ISO 10218-2:2011, IDT). — [Чинний від 2017-01-01]. — К. : ДП «УкрНДНЦ», 2016. — 74 с.

**ОСОБЛИВОСТІ ВРАХУВАННЯ СКЛАДОВИХ БЕЗПЕКИ ПРИ ПРОЄКТУВАННІ
КОЛАБОРАТИВНИХ РОБОТИЗОВАНИХ МЕХАНОСКЛАДАЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЙ:
КОНЦЕПТУАЛЬНИЙ ПІДХІД**

Сучасні колаборативні роботизовані системи широко впроваджуються у механоскладальних виробництвах, де передбачається безпосередня взаємодія людини та колаборативного промислового робота (КПР) в межах спільного робочого простору. Такий підхід забезпечує підвищення гнучкості виробництва, проте одночасно вимагає детального врахування параметрів безпеки таких складових з урахуванням впливу різних факторів на людину (Л) та обладнання.

Метою роботи є аналіз особливостей врахування параметрів безпеки з можливістю їх використання при подальшому проєктуванні колаборативних роботизованих механоскладальних технологій з урахуванням гранично допустимих рівнів шуму, вібрацій, механічних та ергономічних факторів тощо, тобто параметрів безпеки.

Аналіз показав, що одним із ключових параметрів є рівень звукового тиску. При значеннях до 82 дБ робота працівника допускається без обмежень, при рівні понад 86 дБ обов'язковим є використання засобів індивідуального захисту, а перевищення 87 дБ після врахування засобів ізоляції звуку (ЗІЗ) вимагає зниження шуму. Для Л місця встановлено орієнтовні рівні: 80 дБ(А) — початковий рівень дії, 85 дБ(А) — верхній рівень, 87 дБ(А) — максимально допустимий вплив.

Важливим фактором є вібраційний вплив на Л та/або КПР. Для локальної вібрації, що передається на руки Л, допустимий рівень становить 2,5 м/с², а граничний — 5,0 м/с². Для вібрації всього тіла допустимий рівень становить 0,5 м/с², а граничний — 1,15 м/с². При цьому для роботизованих систем вібрація, що передається на КПР, повинна бути мінімальною або взагалі відсутньою.

Окрему увагу слід приділяти механічним небезпекам, зокрема наявності статичних і динамічних перешкод, а також неогороджених рухомих частин у межах робочої зони КПР. У колаборативних системах необхідно забезпечити відсутність небезпечних зон або їх контроль за допомогою сенсорів і систем моніторингу.

Розрахунок безпечної взаємодії також включає врахування ергономічних параметрів. Зокрема, допустимі норми разового піднімання вантажів становлять до 25 кг для чоловіків і до 15 кг для жінок за умови правильної пози, близького розташування вантажу до тіла та відсутності скручування корпусу. Для повторюваних операцій ці значення знижуються до 15 кг і 10 кг відповідно.

У колаборативних системах додатково застосовуються функціональні режими безпеки, такі як моніторинг швидкості, контрольована зупинка, активація через пульт керування, аварійна зупинка та обмеження потужності і швидкості. Дані механізми дозволяють адаптувати поведінку КПР залежно від присутності Л в робочій зоні.

Слід враховувати електромагнітні та інші фізичні впливи, а також забезпечувати достатній робочий простір для безпечної взаємодії Л та КПР. Джерелами електромагнітних завад можуть бути сервоприводи, частотні перетворювачі та силові кабелі, що здатні впливати на роботу сенсорів і систем керування. Тому необхідно передбачати заземлення, екранування кабелів та дотримання нормативних відстаней між елементами обладнання.

Розрахунок параметрів безпеки при проєктуванні колаборативних роботизованих механоскладальних технологій є комплексною задачею, що передбачає врахування шумових, вібраційних, механічних, електромагнітних та ергономічних факторів, які впливають на безпечність взаємодії Л і КПР. Під час проєктування необхідно визначати допустимі швидкості та зусилля руху КПР, контролювати рівні шуму і вібрацій, а також забезпечувати відсутність небезпечних зон у межах спільного робочого простору. Для цього застосовуються сенсори присутності Л, лазерні сканери, системи технічного зору та аварійного зупинення, які дозволяють у режимі реального часу контролювати стан робочого середовища та реагувати на небезпечні ситуації.

Подальший розвиток даного напрямку досліджень концептуально пов'язаний зі створенням інтегрованих інтелектуальних систем безпеки, здатних адаптувати параметри роботи КПР залежно від дій та положення Л. Такі системи забезпечують автоматичне обмеження швидкості, контрольовану зупинку та зміну режимів роботи КПР для забезпечення максимально безпечної взаємодії Л та КПР.

Список використаних джерел:

1. Gualtieri L., Rauch E., Vidoni R. Development and Validation of Guidelines for Safety in Human-Robot Collaborative Assembly Systems. *Computers & Industrial Engineering*. 2021. Vol. 163. Article 107801. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360835221007052>

ЗАСТОСУВАННЯ МОБІЛЬНИХ РОБОТИЗОВАНИХ ПЛАТФОРМ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ СТАНУ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ КУЛЬТУР

Сучасне сільське господарство поступово переходить від традиційних методів обробки ґрунту та догляду за рослинами до технологій точного землеробства, які базуються на збиранні, аналізі та практичному використанні великих обсягів даних. Зростання потреби у підвищенні врожайності, раціональному використанні водних ресурсів, добрив і засобів захисту рослин зумовлює необхідність впровадження автоматизованих систем моніторингу стану сільськогосподарських культур. Одним із перспективних напрямів такого розвитку є застосування мобільних роботизованих платформ, здатних автономно або напівавтономно переміщуватися полем, збирати інформацію про стан рослин, ґрунту й мікроклімату та передавати ці дані для подальшої обробки.

Актуальність використання мобільних роботизованих платформ у сільському господарстві пов'язана з тим, що цифрові технології відіграють важливу роль у трансформації аграрного виробництва, зокрема у сфері моніторингу культур, ґрунтів, водних ресурсів та прийняття управлінських рішень. FAO зазначає, що цифрові рішення можуть підтримувати фермерів у контролі стану культур, ґрунту та надавати своєчасні рекомендації щодо необхідних дій. На відміну від періодичного ручного огляду посівів, роботизовані системи забезпечують регулярне, стандартизоване та просторово деталізоване спостереження, що дозволяє виявляти ознаки стресу рослин на ранніх етапах.

Мобільна роботизована платформа для моніторингу агрокультур може бути побудована на базі колісного, гусеничного або комбінованого шасі, оснащеного системами навігації, датчиками положення, камерами, модулями бездротового зв'язку та бортовим обчислювальним блоком. До складу сенсорного обладнання можуть входити RGB-камери для візуального аналізу рослин, мультиспектральні та інфрачервоні камери для оцінювання вегетаційних індексів, датчики вологості й температури ґрунту, датчики освітленості, газоаналізатори, GPS/GNSS-модулі, інерціальні вимірювальні блоки та лідари для побудови карти місцевості. Поєднання таких засобів дає змогу формувати комплексну картину стану посівів і виявляти ділянки, які потребують додаткового агротехнічного втручання.

Особливе значення має застосування методів комп'ютерного зору та штучного інтелекту для автоматичного аналізу зображень. За допомогою алгоритмів машинного навчання роботизована платформа може виявляти нерівномірність росту рослин, ознаки хвороб, пошкодження шкідниками, дефіцит вологи, бур'яни, механічні ушкодження та інші відхилення від нормального розвитку культури. Сучасні огляди з точного землеробства підкреслюють, що поєднання штучного інтелекту, робототехніки, сенсорних систем і великих даних є одним із ключових напрямів розвитку Agriculture 5.0 та сталого управління агровиробництвом.

Перевагою наземних мобільних платформ порівняно з виключно повітряним моніторингом є можливість отримання детальніших даних з близької відстані. Такі роботи можуть здійснювати огляд нижніх ярусів рослин, фіксувати стан стебел, листків, міжрядь, ґрунтової поверхні, а також проводити локальні вимірювання безпосередньо в зоні росту культури. Це особливо важливо для високорослих або густих культур, де аерознімання не завжди дозволяє виявити приховані ознаки пошкодження. Крім того, мобільна платформа може бути інтегрована не лише з системою моніторингу, а й з виконавчими механізмами для точкового внесення добрив, обприскування або видалення бур'янів.

Водночас застосування мобільних роботизованих платформ у польових умовах пов'язане з низкою проблемних питань. Насамперед це складність руху по нерівній поверхні, наявність ґрунтових перешкод, колії, рослинних решток, вологи, бруду та змінного рельєфу. Для ефективної роботи робот повинен мати достатню прохідність, стійкість до пилу й вологи, енергоефективну систему живлення та надійну механічну конструкцію. Особливо проблемою є навігація в умовах слабого або нестабільного супутникового сигналу, особливо поблизу лісосмуг, теплиць, будівель або в складних погодних умовах. Тому перспективним є поєднання GNSS-навігації з інерціальними датчиками, технічним зором, SLAM-алгоритмами та локальними картами поля.

Не менш важливим питанням є якість збирання й обробки даних. Зображення, отримані в полі, можуть істотно відрізнятися залежно від освітлення, фази розвитку рослин, погодних умов, кута зйомки, забруднення об'єктива та швидкості руху платформи. Це потребує створення стійких алгоритмів обробки зображень, попередньої фільтрації даних, калібрування сенсорів і використання навчальних наборів, що відповідають реальним умовам експлуатації. Для практичного впровадження важливо не лише розпізнати проблемну ділянку, а й прив'язати її до координат поля, сформувати карту стану посівів і надати агроному зрозумілу рекомендацію щодо подальших дій.

Перспективним напрямом є створення комплексної системи, у якій мобільна роботизована платформа виконує функції польового вимірювального модуля, а обробка даних здійснюється на локальному сервері або у хмарному середовищі. У такій системі робот може передавати фото-, відео- та сенсорні дані до програмного комплексу, який формує карти вегетаційного стану, карти вологості ґрунту, зони ризику поширення хвороб і рекомендації щодо диференційованого внесення ресурсів. ІТУ також відзначає, що серед нових технологій цифрового сільського господарства дедалі активніше використовуються аграрні роботи, сенсорні мережі та системи моніторингу.

Для умов України впровадження таких систем є особливо актуальним, оскільки аграрний сектор потребує підвищення ефективності виробництва, зменшення витрат і адаптації до ризиків, пов'язаних із кліматичними змінами, дефіцитом трудових ресурсів і необхідністю точнішого управління агротехнологічними операціями. Мобільні роботизовані платформи можуть застосовуватися для моніторингу зернових, технічних, овочевих культур, садів, тепличних господарств, дослідних ділянок і навчальних агролабораторій. Їх використання є доцільним як у великих агропідприємствах, так і в науково-освітніх установах для проведення експериментів із робототехніки, автоматизації та комп'ютерного зору.

Мобільні роботизовані платформи є перспективним інструментом для моніторингу стану сільськогосподарських культур, оскільки забезпечують оперативне збирання даних, підвищують точність оцінювання стану рослин і створюють основу для прийняття обґрунтованих агротехнічних рішень. Подальший розвиток таких систем має бути спрямований на підвищення автономності, енергоефективності, прохідності, точності навігації, стійкості алгоритмів комп'ютерного зору та інтеграції роботизованих платформ із цифровими системами управління агровиробництвом. Вирішення зазначених питань сприятиме підвищенню продуктивності сільського господарства, зменшенню витрат ресурсів і розвитку технологій точного землеробства.

Список використаних джерел:

1. FAO, ITU. Digital Agriculture in Action: Artificial Intelligence for Agriculture. Rome : Food and Agriculture Organization of the United Nations, International Telecommunication Union, 2021. URL: <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/cb7142en>
2. Taha M.F., Mao H., Zhang Z., Elmasry G., Awad M.A., Abdalla A., Mousa S., Elwakeel A.E., Elsherbiny O. Emerging Technologies for Precision Crop Management Towards Agriculture 5.0: A Comprehensive Overview. Agriculture. 2025. Vol. 15, No. 6. Article 582. P. 1–32. URL: <https://www.mdpi.com/2077-0472/15/6/582>
3. Getahun S. Application of Precision Agriculture Technologies for Sustainable Crop Production and Environmental Sustainability: A Systematic Review. The Scientific World Journal. 2024. Article ID 2126734. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1155/2024/2126734>
4. FAO. Agriculture 4.0: Agricultural Robotics and Automated Equipment for Sustainable Crop Production. Rome : Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2020. URL: <https://openknowledge.fao.org/items/0073ac5a-e4b4-43fb-9621-349fb878864f>

*Бітула А.Ю., здобувач
Кравчук А.Р., доцент
Ткачук Д.Ю., аспірантка*

Державний університет «Житомирська політехніка»

РОБОТИЗОВАНА СИСТЕМА ТОЧНОГО ВНЕСЕННЯ ДОБРИВ І ЗАСОБІВ ЗАХИСТУ РОСЛИН В УМОВАХ СУЧАСНОГО АГРОВИРОБНИЦТВА

Сучасне агровиробництво перебуває на етапі активного переходу від традиційних технологій суцільного обробітку полів до інтелектуальних систем точного землеробства, які передбачають диференційоване застосування ресурсів відповідно до фактичного стану ґрунту, рослин і агроекологічних умов. Одним із важливих напрямів такого розвитку є створення роботизованих систем точного внесення добрив і засобів захисту рослин, здатних автоматично визначати потребу окремих ділянок поля або конкретних рослин у технологічному втручанні та виконувати локальне внесення речовин із мінімальними втратами.

Актуальність розроблення таких систем зумовлена необхідністю підвищення продуктивності сільського господарства, зменшення витрат на агрохімікати, скорочення негативного впливу на довкілля та підвищення безпеки праці. У традиційних технологіях внесення добрив і засобів захисту рослин часто здійснюється рівномірно по всій площі поля, хоча фактична потреба рослин у поживних речовинах або пестицидах може істотно відрізнятися залежно від типу ґрунту, вологості, фази розвитку культури, рівня забур'яненості, наявності хвороб чи шкідників. Тому використання роботизованих платформ із системами технічного зору, навігації та автоматичного дозування дозволяє перейти до більш раціонального управління агротехнологічними операціями.

Роботизована система точного внесення добрив і засобів захисту рослин може бути реалізована на базі мобільної наземної платформи, оснащеної бортовим обчислювальним модулем, системою навігації, сенсорним блоком, резервуарами для робочих речовин, насосами, електромагнітними клапанами, форсунками змінної продуктивності та виконавчими механізмами для спрямованого внесення. До складу сенсорної підсистеми можуть входити RGB-камери, мультиспектральні камери, датчики вологості ґрунту, датчики електропровідності, GNSS-приймачі, інерціальні модулі та лідари. Поєднання цих засобів забезпечує можливість не лише руху платформи по заданій траєкторії, а й автоматичного аналізу стану рослин у реальному часі.

Важливою складовою такої системи є програмний модуль прийняття рішень, який на основі даних від сенсорів визначає зони або окремі рослини, що потребують обробки. Для цього можуть застосовуватися алгоритми комп'ютерного зору, машинного навчання та аналізу вегетаційних індексів. Наприклад, система може виявляти бур'яни в міжряддях, ознаки ураження рослин хворобами, нерівномірність росту, дефіцит вологи або поживних речовин. Після розпізнавання проблемної ділянки система формує керуючий сигнал для дозуючого механізму, який забезпечує локальне внесення необхідної кількості речовини. Сучасні дослідження у сфері інтелектуального обприскування підкреслюють, що сенсорні системи та автоматичне керування дозуванням є основою для зменшення надлишкового використання пестицидів і підвищення ефективності захисту рослин.

Принцип роботи роботизованої системи точного внесення можна подати як послідовність взаємопов'язаних етапів: сканування ділянки поля, попередня обробка даних, розпізнавання стану рослин або ґрунту, визначення необхідності внесення, розрахунок дози, керування виконавчим механізмом і збереження результатів у цифровій карті поля. Такий підхід дозволяє формувати історію обробок, аналізувати ефективність агротехнічних рішень і надалі використовувати накопичені дані для планування наступних операцій. У перспективі роботизована платформа може бути інтегрована з системами управління фермерським господарством, геоінформаційними системами та хмарними сервісами для агроаналітики.

Перевагою роботизованого точного внесення є можливість суттєво зменшити витрати добрив і засобів захисту рослин завдяки обробці лише тих ділянок, де це дійсно необхідно. Це має не лише економічне, а й екологічне значення, оскільки надмірне використання агрохімікатів може призводити до забруднення ґрунтів, водних ресурсів і зниження біорізноманіття. Крім того, автоматизація процесу внесення зменшує контакт працівників із потенційно шкідливими речовинами, що підвищує безпеку праці в аграрному секторі. FAO розглядає автоматизацію, робототехніку та точне землеробство як важливі технологічні напрями для підвищення ефективності та сталості сільського господарства.

Разом із тим впровадження роботизованих систем точного внесення супроводжується низкою проблемних питань. Одним із головних є забезпечення надійної роботи в умовах відкритого поля, де на платформу впливають нерівності ґрунту, пил, волога, рослинні рештки, змінне освітлення та погодні умови. Також важливим є питання точності позиціонування, оскільки локальне внесення добрив або пестицидів потребує правильної прив'язки робочого органу до конкретної рослини або ділянки. У разі

помилки навігації система може внести речовину не в цільову зону, що знижує ефективність обробки та може призвести до перевитрат.

Окрему проблему становить якість розпізнавання об'єктів у польових умовах. Алгоритми комп'ютерного зору мають працювати зі складними зображеннями, на яких рослини можуть перекривати одна одну, мати різні фази розвитку, змінювати колір залежно від освітлення або бути частково закритими ґрунтом і бур'янами. Для підвищення надійності необхідно використовувати навчальні набори даних, сформовані в реальних умовах вирощування культур, а також поєднувати візуальні дані з інформацією від інших сенсорів. Сучасні огляди з аграрної робототехніки виокремлюють обприскування, моніторинг, прополювання та збирання врожаю як ключові напрями практичного застосування роботів у точному землеробстві.

Перспективним напрямом удосконалення таких систем є застосування змінної норми внесення, коли кількість речовини регулюється не лише за принципом «вносити / не вносити», а залежно від рівня ураження рослини, густоти бур'янів, інтенсивності стресу або результатів агрохімічного аналізу ґрунту. Для цього доцільно використовувати форсунок з електронним керуванням, регульовані наоси, карти-завдання та алгоритми прогнозування. У сучасних публікаціях змінне обприскування розглядається через архітектуру керування тиском, витратою робочої рідини та концентрацією препарату, що дозволяє підвищити точність технологічної операції.

Для умов сучасного агровиробництва роботизована система точного внесення може мати особливе значення в господарствах, де необхідно зменшити витрати ресурсів і підвищити якість технологічних операцій. Її використання є доцільним у вирощуванні зернових, овочевих, ягідних і технічних культур, у тепличних господарствах, садах, розсадниках та на дослідних ділянках. Особливо перспективним є застосування таких платформ у поєднанні з попереднім моніторингом стану культур за допомогою безпілотних літальних апаратів або стаціонарних сенсорних мереж. У такій системі повітряний або супутниковий моніторинг може визначати проблемні зони поля, а наземний робот – виконувати точну локальну обробку.

Роботизована система точного внесення добрив і засобів захисту рослин є перспективним технічним рішенням для підвищення ефективності сучасного агровиробництва. Вона поєднує мобільну робототехніку, сенсорні технології, комп'ютерний зір, штучний інтелект і автоматизоване керування виконавчими механізмами. Її впровадження дозволяє зменшити перевитрати агрохімікатів, підвищити точність обробки рослин, знизити екологічне навантаження та покращити безпеку праці. Подальший розвиток таких систем має бути спрямований на підвищення автономності, точності навігації, стійкості алгоритмів розпізнавання, енергоефективності та інтеграції з цифровими платформами управління аграрним виробництвом.

Список використаних джерел:

1. Santos Valle S., Kienzle J. Agriculture 4.0: Agricultural Robotics and Automated Equipment for Sustainable Crop Production. Rome : Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2020. URL: <https://openknowledge.fao.org/items/0073ac5a-e4b4-43fb-9621-349fb878864f>
2. Jiao Y., Wang X., Zhang Y., Li H., Chen L. Research Progress on Intelligent Variable-Rate Spray Technologies in Precision Agriculture. *Agronomy*. 2025. Vol. 15, No. 6. Article 1431. URL: <https://www.mdpi.com/2073-4395/15/6/1431>
3. Ye K., Zhang J., Liu Y., Wang Z., Chen X. Key Intelligent Pesticide Prescription Spraying Technologies for Plant Protection in Precision Agriculture. *Agriculture*. 2025. Vol. 15, No. 1. Article 81. URL: <https://www.mdpi.com/2077-0472/15/1/81>
4. Almtireen N., Al-Shalabi M., Alsharif M.H. Robotics in Precision Agriculture: Task-, Platform-, and Technology-Based Review. *Robotics*. 2026. Vol. 15, No. 4. Article 81. URL: <https://www.mdpi.com/2218-6581/15/4/81>
5. Guebsi R., Mami A., Chokri B., Alharthi M. Drones in Precision Agriculture: A Comprehensive Review of Applications, Technologies and Challenges. *Drones*. 2024. Vol. 8, No. 11. Article 686. URL: <https://www.mdpi.com/2504-446X/8/11/686>

Філатов М.А., здобувач
Громовий О.А., доцент
Янчук В.М., доцент

Державний університет «Житомирська політехніка»

ВИКОРИСТАННЯ КОМП'ЮТЕРНОГО ЗОРУ В РОБОТОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ БУР'ЯНІВ НА АГРОПОЛЯХ

Сучасне агровиробництво дедалі активніше переходить до технологій точного землеробства, у яких ключову роль відіграють автоматизовані системи моніторингу, аналізу та локального впливу на стан сільськогосподарських культур. Одним із важливих завдань у цій сфері є своєчасне виявлення бур'янів, оскільки вони конкурують із культурними рослинами за вологу, поживні речовини, світло та простір, знижуючи врожайність і якість продукції. Традиційні методи боротьби з бур'янами часто передбачають суцільне внесення гербіцидів або значні витрати ручної праці, що призводить до перевитрати хімічних препаратів, зростання собівартості виробництва та негативного впливу на довкілля. Саме тому використання комп'ютерного зору в робототехнічних системах для виявлення бур'янів є актуальним напрямом розвитку сучасної аграрної робототехніки.

Комп'ютерний зір у робототехнічних системах дозволяє автоматично аналізувати зображення агрополя, розрізнити культурні рослини, бур'яни, ґрунт і міжряддя, а також визначити координати небажаної рослинності для подальшого механічного, хімічного, електричного або лазерного видалення. На відміну від традиційного підходу, коли обробка поля виконується рівномірно по всій площі, роботизовані системи з технічним зором дають змогу реалізувати принцип вибіркового впливу. Це означає, що гербіцид або інший засіб боротьби застосовується лише в місці фактичного розташування бур'яну, що підвищує точність агротехнологічної операції та зменшує навантаження на агроєкосистему. Сучасні дослідження з роботизованого управління бур'янами підкреслюють важливість поєднання машинного зору, автономної навігації, картографування та автоматичного керування робочими органами для реалізації *site-specific weed management* - локалізованого управління бур'янами.

Робототехнічна система для виявлення бур'янів на агрополях може бути побудована на базі мобільної наземної платформи, оснащеної камерами, сенсорними модулями, системою навігації, бортовим комп'ютером та виконавчими механізмами. До її складу можуть входити RGB-камери для отримання зображень у видимому спектрі, мультиспектральні або гіперспектральні камери для аналізу спектральних властивостей рослин, GNSS-приймачі, інерціальні вимірювальні модулі, лідари та датчики відстані. Зібрані дані надходять до програмного модуля обробки, де виконуються фільтрація зображення, виділення рослинних об'єктів, класифікація культур і бур'янів, визначення їхнього положення та формування керуючих сигналів для подальшого впливу.

Основою програмної частини таких систем є алгоритми комп'ютерного зору та машинного навчання. На початкових етапах розвитку подібних рішень використовувалися класичні методи обробки зображень, зокрема сегментація за кольором, аналіз текстури, контурів, форми листків та геометричних ознак рослин. Однак у реальних польових умовах такі методи мають обмежену надійність через змінне освітлення, різні фази розвитку рослин, перекривання листків, неоднорідність ґрунту та подібність морфологічних ознак бур'янів і культурних рослин. Тому сьогодні більш перспективними є методи глибокого навчання, зокрема згорткові нейронні мережі, моделі семантичної сегментації та алгоритми об'єктного детектування. Огляди сучасних підходів показують, що глибоке навчання істотно покращило можливості виявлення бур'янів у системах точного землеробства, зокрема для безпілотних літальних апаратів, автономних роботів і високдеталізованих зображень агрополів.

У практичних роботизованих системах важливим є не лише факт розпізнавання бур'яну, а й точне визначення його координат відносно робочого органу. Наприклад, якщо роботизована платформа оснащена форсункою для локального внесення гербіциду, механічним ножом, електричним аплікатором або лазерним модулем, система повинна забезпечити узгодження між положенням камери, швидкістю руху платформи, затримкою обробки зображення та моментом спрацювання виконавчого механізму. Тому комп'ютерний зір у таких системах необхідно розглядати не ізольовано, а як частину загальної архітектури керування, що включає сенсорне сприйняття, локалізацію, планування руху, прийняття рішень і точне виконання технологічної операції.

Типова послідовність роботи роботизованої системи виявлення бур'янів передбачає рух платформи міжряддям або над рядками культур, отримання відеопотоку або серії зображень, попередню обробку даних, розпізнавання рослинних об'єктів, класифікацію їх як культурних рослин або бур'янів, визначення координат цільових об'єктів і передачу команди на виконавчий модуль. Якщо система працює лише як моніторингова, результатом її роботи може бути карта забур'яненості поля. Якщо ж вона інтегрована з робочим органом, то після виявлення бур'яну виконується локальне видалення або точкове внесення

гербіциду. Такий підхід дає змогу перейти від загальної обробки поля до індивідуального впливу на окремі рослини.

Однією з переваг використання комп'ютерного зору є можливість формування цифрових карт забур'яненості, які можуть використовуватися для планування подальших агротехнічних заходів. Такі карти дозволяють визначати найбільш проблемні ділянки поля, оцінювати динаміку поширення бур'янів, порівнювати ефективність різних методів боротьби та приймати обґрунтовані рішення щодо обробки посівів. У поєднанні з геоінформаційними системами, аграрними платформами управління та даними дистанційного зондування роботизовані системи можуть стати частиною комплексної цифрової інфраструктури агропідприємства.

Разом із тим практичне впровадження комп'ютерного зору для виявлення бур'янів пов'язане з низкою проблемних питань. Найбільш складними є робота в умовах змінного природного освітлення, наявність тіней, роси, пилу, вітру, механічних коливань платформи та різноманіття видового складу бур'янів. Крім того, на ранніх фазах розвитку культурні рослини й бур'яни можуть мати подібну форму та колір, що ускладнює їх автоматичне розділення. Для підвищення точності необхідно використовувати великі й різноманітні набори навчальних даних, які враховують різні культури, регіони, типи ґрунтів, фази росту, погодні умови та кути зйомки. Окремі сучасні дослідження акцентують увагу на необхідності розвитку відкритих датасетів, моделей реального часу та систем, здатних працювати безпосередньо в польових умовах.

Важливим обмеженням є також обчислювальна складність алгоритмів. Роботизована система, що працює в полі, повинна обробляти зображення з мінімальною затримкою, оскільки швидкість руху платформи та точність спрацювання виконавчого механізму безпосередньо залежать від часу прийняття рішення. Тому для практичного застосування доцільно використовувати оптимізовані нейронні мережі, апаратні прискорювачі, вбудовані графічні модулі або edge-computing-пристрої. Це дозволяє виконувати розпізнавання бур'янів без постійної передачі великих обсягів даних у хмару та підвищує автономність системи.

Перспективним напрямом розвитку є поєднання комп'ютерного зору з іншими сенсорними технологіями. Наприклад, RGB-зображення можуть доповнюватися мультиспектральними даними, які краще відображають фізіологічний стан рослин, або лідарними даними, що допомагають оцінювати просторову структуру рослинності. Сенсорне злиття дає змогу підвищити стійкість системи до складних умов спостереження та покращити розпізнавання у випадках, коли візуальні ознаки культур і бур'янів є недостатньо відмінними. Огляди роботизованих технологій боротьби з бур'янами також відзначають перспективність поєднання GNSS, VRT, LiDAR, глибокого навчання та автономних платформ для зменшення використання хімічних препаратів і трудових витрат.

Для умов сучасного агровиробництва робототехнічні системи з комп'ютерним зором можуть бути використані у вирощуванні зернових, технічних, овочевих і садових культур, а також у тепличних господарствах і на дослідних ділянках. Особливо доцільним є їх застосування в культурах із чіткою міжрядною структурою, де робот може рухатися за заданою траєкторією та виконувати розпізнавання бур'янів у міжряддях. У майбутньому такі системи можуть працювати у складі групи роботів, де один апарат виконує картографування поля, інший точкову обробку, а програмна платформа координує їхню роботу на основі цифрової карти посівів.

Використання комп'ютерного зору в робототехнічних системах для виявлення бур'янів на агрополях є перспективним напрямом розвитку точного землеробства. Такі системи забезпечують автоматизоване розпізнавання небажаної рослинності, формування карт забур'яненості, локальне внесення гербіцидів або механічне видалення бур'янів. Їх впровадження сприяє зменшенню витрат агрохімікатів, підвищенню екологічності виробництва, зниженню потреби в ручній праці та підвищенню ефективності управління агролями. Подальший розвиток цього напрямку має бути спрямований на підвищення точності розпізнавання в реальних польових умовах, створення якісних навчальних наборів даних, оптимізацію моделей глибокого навчання для роботи в реальному часі та інтеграцію систем комп'ютерного зору з автономними мобільними платформами й виконавчими механізмами.

Список використаних джерел:

1. Upadhyay A., Rosa U.A., Ehsani R. Advances in Ground Robotic Technologies for Site-Specific Weed Management in Precision Agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2024. Vol. 226. Article 109499. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169924007543>
2. Saini P., Nagesh D.S. A Review of Deep Learning Applications in Weed Detection: UAV and Robotic Approaches for Precision Agriculture. *European Journal of Agronomy*. 2025. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1161030125001480>
3. Singh P., Kumar R., Sharma A., Kaur J. Computer Vision for Site-Specific Weed Management in Precision Agriculture. *Agriculture*. 2025. Vol. 15, No. 21. Article 2296. URL: <https://www.mdpi.com/2077-0472/15/21/2296>

*Лисюк М.Ю., здобувач
Ткачук А.Г., доцент
Кравчук А.Р., доцент*

Державний університет «Житомирська політехніка»

АВТОНОМНИЙ АГРОРОБОТ ДЛЯ НАВІГАЦІЇ МІЖРЯДДЯМИ ТА ОЦІНЮВАННЯ СТАНУ РОСЛИН У РЕАЛЬНОМУ ЧАСІ

Сучасне агровиробництво характеризується активним впровадженням цифрових технологій, автоматизованих систем керування та засобів точного землеробства, що дають змогу підвищити ефективність використання ресурсів і забезпечити своєчасне прийняття агротехнологічних рішень. Одним із перспективних напрямів розвитку аграрної робототехніки є створення автономних агророботів, здатних самостійно переміщуватися міжряддями сільськогосподарських культур, збирати інформацію про стан рослин і виконувати первинний аналіз отриманих даних безпосередньо під час руху. Такий підхід дозволяє перейти від періодичного ручного огляду посівів до безперервного або регулярного автоматизованого моніторингу, що є важливим для своєчасного виявлення стресових станів рослин, дефіциту вологи, ознак хвороб, пошкоджень шкідниками та нерівномірності розвитку культур.

Автономний агроробот для навігації міжряддями є складною мехатронною системою, яка поєднує мобільну платформу, сенсорний комплекс, систему локалізації, бортовий обчислювальний модуль, алгоритми комп'ютерного зору та програмні засоби прийняття рішень. Основним завданням такої системи є безпечне переміщення вздовж міжрядь без пошкодження рослин, підтримання заданої траєкторії руху, розпізнавання меж рядків і одночасне оцінювання параметрів стану культур. У дослідженнях із навігації аграрних роботів підкреслюється, що розпізнавання рядків культур є однією з базових технологій для автономного руху, планування траєкторії та виконання польових операцій, зокрема обприскування, удобрення, прополювання та моніторингу.

Конструктивно автономний агроробот може бути реалізований на базі колісного або гусеничного шасі з електроприводом, що забезпечує достатню прохідність, маневреність і стабільність руху на ґрунтовій поверхні. До складу сенсорної підсистеми можуть входити RGB-камери, глибинні камери, мультиспектральні камери, лідари, ультразвукові датчики, GNSS-приймачі, інерціальні вимірювальні модулі, енкодери коліс, датчики освітленості, температури та вологості. Поєднання різних типів сенсорів дозволяє роботу не лише визначати власне положення відносно міжряддя, а й отримувати інформацію про морфологічні, спектральні та просторові характеристики рослин.

Особливе значення для такої системи має навігація міжряддями. У відкритому полі робот повинен розпізнавати напрямки рядків, виявляти зміщення відносно центральної лінії міжряддя, коригувати траєкторію руху та своєчасно реагувати на перешкоди. Для цього можуть використовуватися алгоритми обробки зображень, методи виявлення ліній, сегментація рослинності, аналіз геометрії рядків, візуальна одометрія, SLAM-алгоритми та методи машинного навчання. Сучасні роботи з реального часу показують, що комп'ютерний зір може бути використаний для виявлення рядків культур шляхом перетворення перспективи, сегментації рослинності, кластеризації пікселів і побудови ліній рядків, що є основою для автономного руху платформи в полі.

Оцінювання стану рослин у реальному часі передбачає автоматичне збирання та аналіз даних під час руху робота. За допомогою RGB-камер можна визначати густоту сходів, площу листової поверхні, наявність механічних пошкоджень, зміну кольору листків і загальну рівномірність розвитку культури. Мультиспектральні камери дають змогу обчислювати вегетаційні індекси, які відображають фізіологічний стан рослин, активність фотосинтезу та можливі ознаки стресу. Глибинні камери або лідари можуть використовуватися для оцінювання висоти рослин, структури крони, просторового розміщення листків і перешкод у міжрядді. Роботизовані системи польового фенотипування розглядаються як ефективний засіб автоматизованого вимірювання морфологічних, фізіологічних і просторових характеристик рослин, які складно або трудомістко оцінювати вручну.

Типова архітектура автономного агроробота може включати декілька взаємопов'язаних рівнів. На першому рівні відбувається сприйняття середовища за допомогою сенсорів. На другому — попередня обробка даних, фільтрація шумів, синхронізація зображень і прив'язка вимірювань до координат. На третьому рівні виконуються розпізнавання міжряддя, оцінювання положення робота та планування локальної траєкторії. На четвертому рівні здійснюється аналіз стану рослин: виявлення відхилень у розвитку, визначення проблемних зон, класифікація ознак стресу або формування кількісних показників. На п'ятому рівні результати передаються оператору, зберігаються в базі даних або використовуються для формування карти поля. Така структура забезпечує одночасне вирішення двох завдань: автономного руху та агромоніторингу.

Важливою вимогою до автономного агроробота є робота в реальному часі. Оскільки платформа рухається міжряддями, затримка в обробці даних може призвести до неточного керування, сходження з

траєкторії або пошкодження рослин. Тому алгоритми комп'ютерного зору та оцінювання стану культур повинні бути оптимізовані для виконання на бортовому обчислювальному пристрої. У практичних системах доцільно використовувати компактні нейронні мережі, апаратні прискорювачі, edge-computing-модулі та алгоритми, здатні працювати без постійного підключення до хмарних сервісів. Це підвищує автономність, зменшує залежність від якості зв'язку та дозволяє застосовувати роботу на віддалених агрополях.

Окремою перевагою автономного агроробота є можливість формування просторово прив'язаних карт стану рослин. Під час руху міжряддями робот може фіксувати координати ділянок із нерівномірним ростом, ознаками нестачі вологи, пошкодженнями, хворобами або забур'яненістю. Надалі ці дані можуть використовуватися для диференційованого внесення добрив, локального обприскування, планування поливу, оцінювання ефективності агротехнічних заходів і прогнозування врожайності. Таким чином, автономний агроробот може виконувати роль мобільного вимірювального комплексу, який забезпечує фермерське господарство актуальною інформацією про фактичний стан поля.

Разом із тим практичне впровадження таких систем пов'язане з низкою проблемних питань. Насамперед це складність навігації в реальних польових умовах, де рядки можуть бути викривленими, частково пошкодженими, перекритими бур'янами або рослинними рештками. Рельєф поля може мати нерівності, колії, вологі ділянки та перешкоди, що ускладнює рух платформи. Додатковими чинниками є змінне освітлення, тіні, пил, дощ, вітер і вібрації, які погіршують якість сенсорних даних. Для підвищення надійності навігації перспективним є поєднання комп'ютерного зору, GNSS, інерціальних датчиків і лідарів. Зокрема, дослідження LiDAR-орієнтованої навігації показують можливість виявлення рядків за різних культур, фаз росту, наявності бур'янів, криволінійних рядків і розривів у посівах.

Не менш важливим є питання достовірності оцінювання стану рослин. Зовнішні ознаки стресу можуть бути подібними для різних причин, наприклад дефіциту вологи, нестачі поживних речовин, хвороб або пошкодження шкідниками. Тому для точнішого аналізу доцільно поєднувати візуальні ознаки з мультиспектральними даними, показниками ґрунтових датчиків і результатами попередніх спостережень. Використання штучного інтелекту, сенсорних технологій і робототехніки в рослинному фенотипуванні дає змогу швидше вимірювати морфологічні, фізіологічні та хімічні параметри рослин, однак потребує якісних даних і стійких алгоритмів аналізу.

Для умов сучасного агровиробництва автономний агроробот для навігації міжряддями та оцінювання стану рослин може застосовуватися у вирощуванні зернових, технічних, овочевих, ягідних і садових культур. Особливо доцільним є його використання на дослідних ділянках, у фермерських господарствах, тепличних комплексах і на полях із високою потребою в регулярному моніторингу. У перспективі такі роботи можуть працювати як окремо, так і у складі групових роботизованих систем, де кілька платформ одночасно виконують моніторинг різних ділянок поля, обмінюються даними та формують єдину цифрову карту стану посівів.

Як висновок, автономний агроробот для навігації міжряддями та оцінювання стану рослин у реальному часі є перспективним технічним рішенням для розвитку точного землеробства. Він поєднує мобільну робототехніку, комп'ютерний зір, сенсорні технології, штучний інтелект і системи автономного керування. Його застосування дозволяє підвищити оперативність моніторингу, зменшити трудові витрати, своєчасно виявляти проблемні ділянки поля та створювати інформаційну основу для прийняття обґрунтованих агротехнологічних рішень. Подальший розвиток таких систем має бути спрямований на підвищення точності навігації, стійкості до змінних польових умов, енергоефективності, швидкодії алгоритмів обробки даних і інтеграції з цифровими платформами управління агровиробництвом.

Список використаних джерел:

1. Ma Z., Zhang B., Diao Z., Wang H. Advances in Crop Row Detection for Agricultural Robots. *Agriculture*. 2025. Vol. 15, No. 20. Article 2151. URL: <https://www.mdpi.com/2077-0472/15/20/2151>
2. Khan M.N., Dildar M., Ahsan M., Kim J. Real-Time Crop Row Detection Using Computer Vision: Application in Agricultural Robots. *Frontiers in Artificial Intelligence*. 2024. URL: <https://www.frontiersin.org/journals/artificial-intelligence/articles/10.3389/frai.2024.1435686/full>
3. Shi J., Zhang B., Diao Z., Li X. Row Detection-Based Navigation and Guidance for Agricultural Robots and Autonomous Vehicles in Row-Crop Fields: Methods and Applications. *Agronomy*. 2023. URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/3791/a786b1e905e259c47ef8f30bc95222b29cb9.pdf>