УДК 621.865.8:004.896
DOI https://doi.org/10.15589/znp2024.2(495).11

ANALYSIS OF THE FEATURES OF MODERN MANIPULATOR ROBOTS

АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ СУЧАСНИХ РОБОТІВ-МАНІПУЛЯТОРІВ

Hennadii H. Uholnikov
Genchik98@gmail.com
ORCID: 0009-0003-0508-1997
Anton O. Nedo
antoxa1081@gmail.com
ORCID: 0009-0008-8482-9866
Oleksandr S. Gerasin
oleksandr.gerasin@nuos.edu.ua
ORCID: 0000-0001-5107-9677

Г. Г. Угольніков,
аспірант
А. О. Недо,
магістр
О. С. Герасін,
канд. техн. наук, доцент

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв

Abstract. *Purpose*. The purpose of this article is to carry out a comprehensive review of the current state and prospects of robotics in the field of manipulator robots, to identify key aspects of technology development in this field, as well as to define possible ways to solve existing technological problems.
Method. To achieve the goal the methods of searching scientific and technical literature, analysis, classification, systematization and generalization of available data on robotic solutions were used. A comprehensive analysis of the features of ready-made projects of modern manipulator robots was carried out on the basis of the found key industry publications. A generalized functional scheme of the manipulator robot was formed using the system approach, and the means of increasing the efficiency of its components were defined. The main classifications of robots by mobility, kinematics and purpose are highlighted. A comparative analysis of different types of robots was carried out according to the classifications, their advantages and disadvantages were revealed. With the help of the method of generalization, the feasibility of further research in the direction of the development of manipulator robots on suspended cable systems is substantiated, the key aspects that affect the development of the industry as a whole are determined, and the current important tasks for engineers and researchers are identified.
Results. As a result of the analysis, the main technological problems in the field of robotics were identified, in particular: integration of technologies, safety of use, productivity and energy efficiency. The latest engineering solutions and technologies that are revolutionizing this industry were also identified, such as: artificial intelligence tools, machine learning, computing systems and the Internet of Things. The analysis of key achievements and innovations of robotic solutions made it possible to identify the possibilities of expanding the applications of manipulator robots in new areas, such as agriculture, medicine, service and others.
Practical importance. The conducted analysis will contribute to the further development of modern technologies in the field of robotics and to their effective application in practice. The obtained results can be useful for specialists in the field of robotics, researchers, students and all those interested in this direction. They provide a generalized picture of the current state and directions of development of robot-manipulators, and will also help define the possibilities of applying these technologies in practical areas, which is important for the further development of robotics.
Key words: manipulator robot; robotics; computer-integrated technologies, control system; cable robot; intelligent technologies.

Анотація. *Мета*. Метою даної статті є проведення комплексного огляду сучасного стану та перспектив робототехніки у сфері роботів-маніпуляторів, визначення ключових аспектів розвитку технологій у цій галузі, а також виявлення можливих шляхів вирішення існуючих технологічних проблем.
Методика. Для досягнення поставленої мети використовувалися методи пошуку науково-технічної літератури, аналізу, класифікації, систематизації та узагальнення наявних даних про робототехнічні рішення. На основі знайдених ключових галузевих публікацій проведено комплексний аналіз особливостей готових проектів сучасних роботів-маніпуляторів. Використовуючи системний підхід, сформовано узагальнену функціональ-

ну схему робота-маніпулятора, визначено засоби підвищення ефективності його складових. Виділено основні класифікації роботів за рухомістю, кінематикою та призначенням. Відповідно до класифікацій проведено порівняльний аналіз різних типів роботів, виявлено їх переваги та недоліки. За допомогою методу узагальнення обґрунтовано доцільність подальших досліджень у напрямку роботів-маніпуляторів на підвісних кабельних системах, визначено ключові аспекти, які впливають на розвиток галузі в цілому, ідентифіковані поточні важливі задачі для інженерів та дослідників.

Результати. У результаті аналізу були виявлені основні технологічні проблеми у галузі робототехніки, зокрема: інтеграція технологій, безпека використання, продуктивність та енергоефективність. Також були визначені новітні інженерні рішення та технології, які революціонізують цю галузь, такі як: засоби штучного інтелекту, машинне навчання, системи обчислення та Інтернет речей. Аналіз ключових досягнень та інновацій робототехнічних рішень дав змогу виявити можливості розширення застосувань роботів-маніпуляторів у нові сфери, такі як сільське господарство, медицина, обслуговування та інші.

Практична значимість. Проведений аналіз сприятиме подальшому розвитку сучасних технологій у галузі робототехніки та їх ефективному застосуванню в практиці. Отримані результати можуть бути корисними для фахівців у галузі робототехніки, дослідників, студентів та всіх зацікавлених у цьому напрямку. Вони надають узагальнену картину сучасного стану та напрямків розвитку роботів-маніпуляторів, а також допоможуть визначити можливості застосування цих технологій у практичних сферах, що має важливе значення для подальшого розвитку робототехніки.

Ключові слова: робот-маніпулятор; робототехніка; комп'ютерно-інтегровані технології; система керування; кабельний робот; інтелектуальні технології.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Сучасний технологічний розвиток призводить до широкого використання робототехнічних рішень у різних галузях. Роботи-маніпулятори з автоматизованим керуванням виявляються незамінними у виробництві, логістиці, медицині, археології, сільському господарстві, будівництві та дослідженнях. Проте, незважаючи на високі досягнення у цій галузі, залишаються технічні виклики, пов'язані з покращенням гнучкості, ефективності, безпеки та зниженням складності та вартості роботів-маніпуляторів для успішного впровадження їх у сучасні технологічні процеси.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Останні дослідження та публікації в галузі роботів-маніпуляторів зосереджені на різноманітних аспектах їхнього функціонування, вдосконаленні конструкцій, систем керування, покращенні мобільності, гнучкості та застосуваннях у різних сферах.

Деякі дослідження [1, 2] присвячені використанню нових конструкційних рішень та матеріалів у роботах-маніпуляторах, що дозволяє знизити їх вагу, збільшити маневреність та підвищити надійність. Наприклад, застосування підвісних систем чи квадропедальних роботів можуть мати значний потенціал у мобільних, гнучких та адаптивних роботах-маніпуляторах [3].

Інші дослідження спрямовані на розробку нових алгоритмів керування та засобів їх реалізації [4], зокрема з використанням сучасних технологій, таких як: Інтернет речей, штучний інтелект та машинне навчання. Впровадження цих підходів дозволяє роботам-маніпуляторам адаптуватися до змінних умов, оптимізувати свою роботу та вдосконалювати ефективність виконання завдань.

Крім того, в різних країнах виконуються дії по впровадженню маніпуляторів у відносно нових для роботів сферах діяльності [5], таких як: медицина, будівництво, агропромисловий комплекс, археологія та інші. Інтеграція робототехніки у ці галузі дозволяє підвищити продуктивність, автономність та безпеку робочих процесів.

Загалом останні дослідження та публікації підтверджують постійний інтерес до проблем робототехніки та роботів-маніпуляторів і вказують на перспективи їхнього подальшого розвитку та впровадження.

ВІДОКРЕМЛЕННЯ НЕВИРІШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

Вдалі робототехнічні рішення демонструють великий потенціал для сучасної трансформації в різних сферах, зокрема: заміна ручної праці, робота у важких та екстремальних умовах, підвищення продуктивності, зниження витрат та покращення якості. Стрімке впровадження роботів-маніпуляторів у різні сфери людського життя обумовлено їх важливою роллю у сучасному промисловому виробництві та інших сферах діяльності. Проте, незважаючи на значні досягнення у цій галузі, існують ряд викликів та проблем, які потребують уваги та вирішення. Зокрема, доцільно чітко визначити перспективні технології та рішення, які дозволять покращувати гнучкість, ефективність, безпеку, зменшувати складність та вартість роботів-маніпуляторів та систем керування ними для їх успішного впровадження у сучасні виробничі та інші, нетипові для роботів, процеси.

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Мета роботи полягає у ретельному аналізі сучасних технічних рішень та інновації у роботах-маніпуляторах та їх системах керування, визначенні

технічних проблем, ключових досягнень та новітніх технологій у галузі, які впливають на їх функціональні можливості та ефективність у сучасному технологічному середовищі.

МЕТОДИ, ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

Об'єктом дослідження є процеси моніторингу і керування сучасними роботами-маніпуляторами, які використовуються в різних сферах людської діяльності. **Предметом дослідження** є моделі та програмно-технічні засоби підвищення ефективності роботів-маніпуляторів.

Для досягнення поставленої мети використовувалися методи пошуку, аналізу, класифікації, систематизації та узагальнення наявних даних науково-технічної літератури з питань новітніх рішень у галузі робототехніки.

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

Взагалі будь-який робот-маніпулятор можна представити як об'єкт дослідження, який містить а) конструктивні компоненти, що забезпечують жорсткість та стійкість конструкції, та б) систему керування, яка поєднує окремі виконавчі пристрої та забезпечує їх сумісну роботу відповідно до заданих показників якості. В сучасних умовах автоматизоване керування роботами-маніпуляторами є ключовим аспектом їхньої ефективності та визначається комплексом технічних рішень та алгоритмів, спрямованих на забезпечення ефективності їх функціонування в різноманітних умовах. На рис. 1 показані основні компоненти узагальненої функціональної схеми робота-маніпулятора з автоматизованим керуванням. Такий робот-маніпулятор працює наступним чином. На систему обчислення надходить вхідний (цільовий) сигнал, який обробляється вбудованою системою обчислення або за допомогою хмарних технологій та генерується відповідна команда, що передається на драйвер. У свою чергу драйвер перетворює команди керування у сигнали, які відповідають виконанню заданого руху робота механізмами приводів та маніпулятора. Сенсори збирають інформацію про фактичний стан робота, яка передається у систему обчислення для корекції команд керування. Далі для досягнення поставленої мети доцільно більш детально розглянути основні програмно-технічні складові робота-маніпулятора.

Сенсори. Однією з ключових складових автоматизованого керування є сенсорне забезпечення (давачі), яке надає роботам-маніпуляторам здатність отримувати інформацію про своє оточення. Воно містить різнотипні сенсори, такі як: камери, лазерні сканери, датчики тиску, проковзування, енкодери та інші. Ці дані використовуються для створення точної моделі оточуючого середовища та забезпечення функціонування робота в реальному часі [6].

Система обчислення: апаратні засоби, алгоритми обробки даних, механізми прийняття рішень та інтелектуальні технології. Системи обчислення відіграють важливу роль у функціонуванні роботів-маніпуляторів. Комп'ютери, контролери та мікропроцесори використовуються для обробки великої кількості даних з сенсорів, виконання алгоритмів та керування всією системою [7]. Ця взаємодія дозволяє створити ефективну систему керування, що забезпечує точність та координацію рухів. Для ефективного опрацювання отриманої сенсорної інформації необхідні потужні алгоритми обробки даних, які базуються на методах комп'ютерного зору, машинного навчання та інших техніках [8]. Механізми прийняття рішень враховують обмеження робота, які можуть виникнути в ході виконання завдань у реальному світі. Засоби штучного інтелекту забезпечують роботів-маніпуляторів здатністю вчитися та адаптуватися до нових умов [9]. Це робить систему керування більш гнучкою та здатною пристосовуватися до різних вимог та умов роботи.

Хмарні технології як складова Інтернету речей. У сучасних умовах Інтернет речей (IoT) є важливим елементом в контексті автоматизованого керування роботами-маніпуляторами. За допомогою IoT роботи

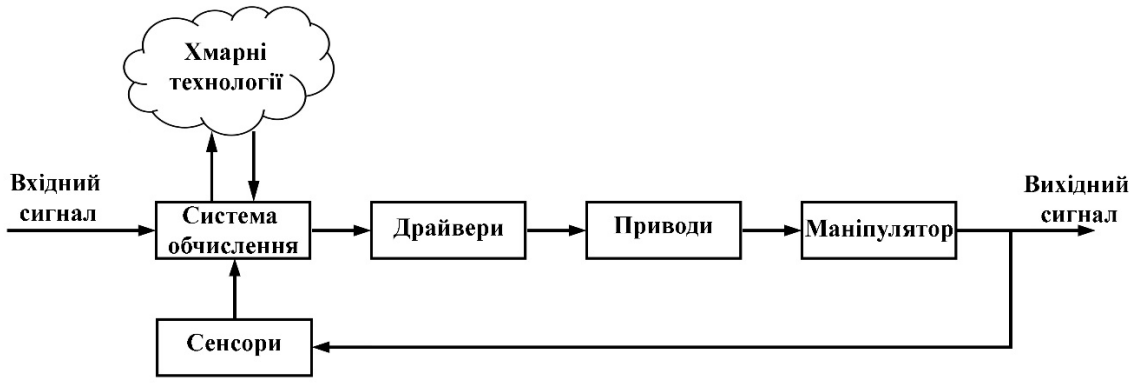

Рис. 1. Узагальнена функціональна схема робота-маніпулятора

можуть бути підключені до мережі, обмінюватися даними та взаємодіяти з іншими пристроями та системами. Відповідно відкриваються нові можливості для збору даних у реальному часі та аналізу великих обсягів інформації, що дозволяє покращити ефективність та функціональність роботів-маніпуляторів.

Хмарні технології є важливою складовою IoT, оскільки дозволяють використовувати значні обчислювальні ресурси та зберігати великі обсяги даних в хмарному середовищі. Це сприяє збільшенню потужності обчислень та вдосконаленню алгоритмів обробки даних, що підвищує продуктивність та адаптивність роботів-маніпуляторів до змін у завданнях та оточенні.

Завдяки IoT-технологіям, роботи-маніпулятори можуть здійснювати моніторинг стану обладнання, відстежувати ефективність функціонування та взаємодіяти з іншими роботами та системами в реальному часі. Це розширює їх можливості, забезпечуючи гнучкість, адаптивність та динамічність.

Інтеграція технологій для оптимального керування. Оптимальне керування роботами-маніпуляторами вимагає інтеграції сенсорів, систем обчислення, класичних та інтелектуальних алгоритмів обробки даних та механізмів прийняття рішень. Інтернет речей з хмарними технологіями дозволяють роботам-маніпуляторам ефективно функціонувати, забезпечуючи точність, адаптивність та динамічність виконання завдань. Інтеграція цих технічних засобів у системи керування роботами-маніпуляторами робить їх більш ефективними та гнучкими в керуванні. Робототехніка швидко розвивається, приводячи до появи різнотипних роботів-маніпуляторів, які класифікують за різними критеріями. Особливості конструктивного виконання роботів є дуже важливими для розуміння їх потенційних можливостей та областей застосування.

Для більш детального дослідження роботів-маніпуляторів доцільно розглянути основні класифікації за рухомістю, кінематикою та призначенням. Зокрема за рухомістю виділяють стаціонарні та мобільні.

Стаціонарні роботи – це роботи, які зазвичай залишаються на одному місці під час роботи і не мають можливості активного переміщення. Вони часто використовуються в ситуаціях, де завдання робота сконцентроване в певному місці або в межах обмеженого простору. Прикладами таких роботів є промислові маніпулятори, встановлені на лініях збирання, де їх завдання – виконання точних операцій в межах заданої області. Переваги стаціонарних роботів включають точність і стабільність, оскільки вони не піддаються впливу зовнішніх факторів при переміщенні. Крім того, такі роботи можуть бути ефективно використані в ситуаціях, де переміщення не потрібне або неможливе, наприклад, в умовах обмеженого простору або на висоті. Недолік цих роботів – це обмежений радіус дії та гнучкість відповідно до розмірів та конструктивних особливостей.

Мобільні роботи: на сьогоднішній день мобільна робототехніка є однією з галузей наукових досліджень, що швидко розвивається. Основна відмінність мобільних роботів полягає в їх здатності рухатися. Вони можуть бути оснащені колесами, гусеницями або навіть ногами для руху по різних поверхнях, а також маніпуляторами із захоплювальними пристроями. Вони можуть рухатися напівавтономно, тобто за допомогою кваліфікованого оператора, або автономно, де немає потреби в зовнішніх операторах. Здатність реагувати та приймати рішення на основі інтелектуальної системи сприйняття інформації, отриманої з навколишнього середовища, відрізняє автономних мобільних роботів від інших роботів. Крім того, щоб реагувати на змінне середовище, роботам потрібне певне джерело вхідних даних, певний спосіб декодування вхідних даних і спосіб виконання дій. Додатково потрібна потужна система керування, щоб координувати всі підсистеми, які складають робота, і змусити його адаптуватися до невідомого середовища.

Основи мобільної робототехніки складаються з областей руху, сприйняття, пізнання та навігації. Проблеми переміщення вирішуються шляхом розуміння механізму та кінематики, динаміки та теорії керування. Сприйняття охоплює методи аналізу сигналів і спеціалізовані області, такі як комп'ютерне бачення та сенсорні технології. Когнітивні функції системи керування відповідають за аналіз вхідних даних від датчиків і виконання відповідних дій для досягнення цілей робота. Навігація вимагає реалізації алгоритмів планування, теорії інформації та штучного інтелекту. Для правильного та узгодженого функціонування такого робота, його підсистеми переміщення, кінематики, сприйняття (сенсори), локалізації та навігації повинні бути синхронізовані блоком керування [10].

Наступна класифікація роботів за їх кінематикою, яка описує рух та розташування їх зв'язків та елементів.

Послідовні системи – це роботи, у яких зв'язки з'єднані послідовно, утворюючи ланцюгову структуру [11]. Кожен зв'язок має одну ступінь свободи, і рух від базового зв'язку передається послідовно через всі інші зв'язки. Цей тип кінематики часто зустрічається у промислових роботах. Послідовна кінематика дозволяє реалізувати великий робочий простір, має високу маневреність, але їй не вистачає жорсткості та точності через формування сумарної похибки вихідних координат за рахунок додавання похибок кожної ланки.

Паралельні системи – це роботи, у яких декілька зв'язків з'єднані паралельно один до одного, а не послідовно. Цей тип кінематики використовується у дельта-роботах та роботах на підвісній кабельній

системі. Вони часто використовуються в задачах, де потрібна висока точність і жорсткість, наприклад, у медичних та космічних застосуваннях. Паралельні системи більш жорсткі та легші, але вони мають більш обмежений робочий простір та складну кінематику [3, 12].

Гібридні системи – це роботи, які об'єднують у собі переваги паралельної і послідовної робототехніки. Такі роботи оснащені паралельними руховими та послідовними виконавчими механізмами [13].

Роботи-маніпулятори вирізняються різноманітністю їх функціональності та застосуваннями. Далі розглянемо основні типи роботів-маніпуляторів та їх характеристики, що визначають їхню ефективність у відповідних областях використання.

Промислові роботи. Такі роботи-маніпулятори використовуються для автоматизації виробничих процесів у промисловості. Вони зазвичай мають множину ступенів свободи та здатні виконувати різні завдання, такі як: зварювання, підняття і пересування важких вантажів, розміщення компонентів на виробничій лінії, тощо [14].

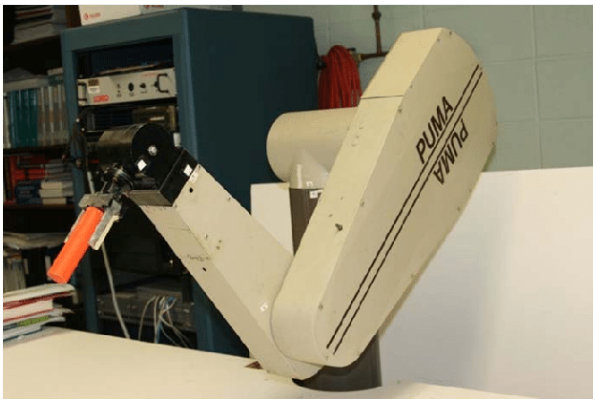

Рис. 2. Промисловий робот PUMA 560

PUMA 560 (рис. 2) з відкритою архітектурою – це високоточний та високонадійний робот, розроблений для використання в промисловості та дослідницьких цілях. PUMA 560 має широкий спектр застосувань, включаючи збирання, монтаж, зварювання та інші процеси автоматизації виробництва. У наукових статтях PUMA 560 часто використовується для дослідження різних аспектів робототехніки та розвитку нових методів керування та взаємодії з навколишнім середовищем завдяки тому, що це один з найкраще математично описаних роботів [15].

Робот PUMA 560 з відкритою архітектурою оснащений двигунами постійного струму з постійними магнітами та енкодерами з точністю 1000 імпульсів за оберт. Для керування двигунами використовується драйвер DC motor driver (60 В, ±10 А). Передача даних здійснюється через плату Humusoft 634, яка під'єднана до інтерфейсної плати.

Медичні роботи-маніпулятори. Медичні робототехнічні комплекси використовуються в складних та малоінвазивних хірургічних операціях. Вони можуть бути оснащені високоточними інструментами та камерами, що дозволяє хірургам виконувати точні та важливі операції.

The CyberKnife Robotic (рис. 3) – це передова система радіохірургії, що поєднує в собі точність робототехніки та передові методи лікування раку. Ця система дозволяє лікарям точно та неінвазивно лікувати пухлини та інші патологічні утворення у різних частинах тіла за допомогою високоінтенсивного променевого випромінювання. Завдяки своїй унікальній технології CyberKnife може адаптувати лікування під рухи пацієнта під час процедури, забезпечуючи максимальну точність та мінімальний вплив на навколишні тканини. Цей роботизований апарат забезпечує інноваційний підхід до радіохірургії, допомагаючи пацієнтам отримувати ефективне та безпечне лікування.

Рис. 3. Медичний робот The CyberKnife Robotic

Робот складається з лінійного прискорювача (LINAC), встановленого на роботі-маніпуляторі KR240-2 (Series 2000, Kuka Roboter GmbH, Augsburg, Germany), який має повторюваність положення 0,12 мм і має шість ступенів свободи, що дозволяє позиціонувати робочий простір навколо пацієнта з високою точністю. LINAC використовує магнетрон X-діапазону для створення рентгенівського променя потужністю 6 MeV з продуктивністю 1000 cGy/хв. Коліматори лінійного прискорювача можуть бути встановлені вручну або автоматично за допомогою роботизованого змінювача коліматорів Xchange® Robotic Collimator Changer [16].

Службові та військові роботи. Роботи-маніпулятори використовуються у сферах обслуговування та військових застосуваннях. Службові роботи застосовують для пошуку, перевезення, або інших рутинних завдань у побуті, громадському та комерційному секторах, а військові – можуть використовуватися для розмінування, розвідувальних місій, розміщення вибухових пристроїв та інших військових завдань.

Рис. 4. Службовий робот SPOT

SPOT (рис. 4) є чотириногим роботом з можливістю встановлення та інтеграції додатків завдяки SDK (набір інструментів для розробки програмного забезпечення). Одним з таких додатків є лазерний сканер FARO S-350. Завдяки установці сканерів, наприклад FARO S-350, на платформу автономної мобільності, підключенню додатку до SPOT та виконанню дій через інтегрований режим автономного керування, існує можливість виконання сканування без необхідності втручання людини. Сканер на основі робота SPOT має об'єктив сканера на рівні 50–190 мм. Інша апаратура – сканер Velodyne LiDAR і процесор SPOTCore – надає можливість розрізняти об’єкти на відстані до 100 метрів [17].

Дослідницькі роботи. У галузі науки та досліджень роботи-маніпулятори використовуються для виконання експериментів, збору даних та вивчення невідомих територій. Вони можуть бути обладнані різноманітними сенсорами та інструментами для проведення високоточних досліджень. Прикладом такого робота є мобільний робот-маніпулятор Clearpath Robotics Husky, показаний на рис. 5 [18].

Clearpath Robotics Husky – це мобільний робот-платформа на колесах, розроблений компанією Clearpath Robotics. Він використовується для досліджень, освіти та промислових застосувань. Може керуватися дистанційно за допомогою планшета або комп'ютера, який використовується для різних завдань, зокрема: доставка вантажів, картографування, інспекція, збір даних та навчання.

Рис. 5. Дослідницький робот Clearpath Robotics Husky

Модульна платформа Husky може бути легко модифікована для різних завдань, має відкриту архітектуру, що дає можливість розробникам створювати власне програмне забезпечення. Це надійний та стійкий робот, який може працювати в складних умовах, але він не може працювати в екстремальних умовах та приймати складні рішення.

Побутові роботи. Побутові роботи-маніпулятори призначені для допомоги в повсякденних завданнях в домашньому господарстві, як-то: прибирання, готування їжі, догляд за басейном, рослинами та інші.

FarmBot (рис. 6) – це автоматизований комплекс для вирощування рослин, розроблений компанією FarmBot. Він використовується для вирощування овочів, трав, ягід та фруктів у домашніх умовах. FarmBot складається з чотирьох основних компонентів: платформа, яка тримає рослини; поливальна система; освітлення та робоча рука-маніпулятор. Комплекс оснащений програмним забезпеченням та мобільним додатком, який використовується для моніторингу та керування. FarmBot може автоматично саджати насіння, поливати рослини, виконувати прополку, забезпечувати освітлення, відстежувати ріст рослин.

Рис. 6. Система для вирощування рослин FarmBot

Система керування FarmBot створена на базі мініком’ютера Raspberry Pi 3, який підключено через USB до плати Arduino Mega 2560. Raspberry Pi використовується для доступу до додатку через Інтернет або Wi-Fi і зв'язку з Arduino через послідовне з'єднання USB для передачі команд у вигляді G-коду. До Arduino під’єднані драйвери крокових двигунів A4988, та інші датчики та прилади, такі як: датчики ґрунту, датчики протікання води, вакуумний насос, водяний насос та інші [19].

FarmBot є простою у використанні системою, яка не потребує спеціальних знань у садівництві, вона економить час, може використовуватися для вирощування рослин в будь-якому місці, навіть у невеликих квартирах. Але вона не може використовуватися для всіх видів рослин, а також потребує постійного підключення до Інтернету.

Спеціалізовані роботи. Спеціалізовані роботи-маніпулятори адаптовані для виконання конкретних завдань у специфічних галузях, таких як: сільське господарство, археологія, будівництво, транспорт.

На рис. 7 показаний NU-Spidercam – спеціально розроблений аграрний робот-маніпулятор для роботи на полях на основі робота Spidercam. Він дозволяє високоякісно слідкувати за рослинами, завдяки гнучкості і точність сенсорів. За допомогою NU-Spidercam вимірюються характеристики відбивання світла рослинами. Робот може збирати дані про різні параметри рослин, використовуючи мультиспектральні та теплові зображення, а також дані з метеостанцій. Це дозволяє аналізувати енергетичний баланс на полі та робити розрахунки щодо випаровування різних сортів рослин для подальших досліджень. Змінюючи умови вирощування, наприклад, кількість добрив або густоту посадки, можна детально вивчати їх вплив на зростання, структуру і характеристики рослин для різних культур. За допомогою NU-Spidercam можна отримувати фундаментальні знання, які мають широкі наслідки в дослідженнях агрономії та моделюванні врожаю.

Рис. 7. Аграрний робот-маніпулятор NU-Spidercam

На платформі робота зібрано ряд спеціалізованих модулів датчиків, які призначені для вимірювання різних характеристик рослин. До цих датчиків належать чотириполосна RGB-NIR (мультиспектральна) камера, теплова ІЧ камера, 3D скануючий LiDAR та портативний спектрометр VNIR. Безвентиляторний вбудований комп'ютер NDiS B535 Nexcom керує рушіями та всіма модулями сенсорів, здійснює зчитування даних і зберігає вимірювання [20]. Платформа NU-Spidercam живиться двома батареями на 48В постійного струму. Для живлення комп'ютера та різноманітних модулів сенсорів використовується блок перетворення напруги, який перетворює 48В на 12В та 24В. При повністю зарядженій батареї робот працює до 6–8 годин.

Проведений огляд вказує на доцільність подальших досліджень у напрямку розвитку роботів на підвісних кабельних системах (кабельні роботи типу «Spidercam»). Ці роботи є інноваційним класом роботів-маніпуляторів, які використовують систему кабелів для утримання та руху. Така технологія відкриває широкі можливості в сфері робототехніки та маніпулювання, що розширює уявлення про те, як роботи можуть взаємодіяти з навколишнім середовищем. Перевагами кабельних роботів є:

– гнучкість та маневреність. Кабельні роботи можуть пристосовуватися до різних об'єктів та середовищ за допомогою розтяжних кабелів, що забезпечує їм велику гнучкість у виконанні завдань у складних умовах;

– великий робочий простір. Завдяки своїй конструкції, кабельні роботи можуть охоплювати великі робочі області, що робить їх зручними для застосувань у ситуаціях опрацювання великих просторів або об'єктів;

– висока точність та стабільність робочих режимів;

– широкі області застосування, зокрема у виробництві, логістиці, археології, сільському господарстві, будівництві, дослідженнях та багатьох інших галузях.

Незважаючи на обмежений робочий простір (у порівнянні з мобільними роботами), складну кінематику та систему керування, вивчення кабельних роботів може призвести до винайдення нових технологій та інновацій у робототехніці. Вони відкривають нові можливості для використання роботів у різних галузях, що може привести до розвитку нових продуктів та послуг. Кабельні роботи можуть забезпечити ефективні рішення для складних та вимогливих завдань, які важко або неможливо виконати іншими типами роботів.

Підсумовуючи вищевикладене, можна зазначити, що рішення технологічних, інженерних та наукових проблем сприяють розвитку робототехніки та автоматизованого керування роботами-маніпуляторами. Підкреслимо далі ключові аспекти, які визначають розвиток галузі в цілому, та поточні важливі задачі для інженерів та дослідників.

Інтеграція технологій у єдину систему. Забезпечення взаємодії між сенсорами, системами обчислення, алгоритмами машинного навчання та хмарними технологіями вимагає розробки універсальних та ефективних інтеграційних рішень.

Впровадження роботів-маніпуляторів у нові сфери. Впровадження роботів-маніпуляторів у нові сфери потребує розвитку функціональності цих систем в контексті сучасних викликів і потреб. Нові сфери використання роботів-маніпуляторів створюють не лише технологічні виклики, але і можливості для інновацій та покращення багатьох аспектів суспільства. Наприклад, впровадження роботів-маніпуляторів у мобільні платформи, як-то: дрони, роботи на підвісних системах або автономні транспортні засоби – відкриває нові можливості для доставки, обробки полів, моніторингу середовища та інших завдань у різних місцях та умовах.

Безпека та етика використання. Розвиток робототехніки щільно пов'язаний з питаннями безпеки та

етики використання. Роботи-маніпулятори, особливо в промисловості та медицині, повинні відповідати високим стандартам надійності та безпеки, а їхній вплив на суспільство та працюючих вимагає уважного регулювання. У зв'язку з цим, широкого поширення набувають колаборативні роботи-маніпулятори, які здатні співпрацювати з людьми у виробничих або інших середовищах, що є важливим досягненням сучасної робототехніки. Такі роботи використовуються безпосередньо поряд з людьми, що полегшує автоматизацію рутинних завдань та підвищує спільну продуктивність, але потребує спеціалізованих засобів по забезпеченню безпеки та керуванню (керування голосом, жестами) [21].

Продуктивність та енергоефективність. Для забезпечення стабільної та ефективної роботи важливо вдосконалювати системи керування та енергозберігаючі технології. Оптимізація алгоритмів, використання ефективних компонентів та розробка нових джерел енергії є важливими аспектами вирішення цих завдань.

Інтерфейси та взаємодія з користувачем. Розвиток інтерфейсів та систем взаємодії з користувачем є важливим аспектом у вдосконаленні роботів-маніпуляторів. Забезпечення зручності та ефективності керування роботами в реальному часі, а також розробка інтуїтивно зрозумілих інтерфейсів є викликами для інженерів та дизайнерів.

Оптимізація маніпуляцій та рухів. Для покращення продуктивності та точності роботів-маніпуляторів необхідно вдосконалювати алгоритми планування рухів та маніпуляцій. Це включає в себе оптимізацію траєкторій руху та вивчення нових методів виконання завдань у складних середовищах, удосконалення засобів вимірювання

Стандартизація та сумісність. Розвиток стандартів та норм для роботів-маніпуляторів є фактором забезпечення сумісності та взаємодії різних систем керування та обладнання. Створення універсальних стандартів може полегшити інтеграцію та обмін інформацією між різними системами.

ВИСНОВКИ

У даній статті розглянуто сучасний стан робототехніки та автоматизованого керування роботами-маніпуляторами. Виявлені особливості технологічних та інженерних рішень, які сприяють покращенню функціональності та робочих характеристик цих робототехнічних комплексів відповідно до основних класифікацій. В рамках розглянутих досліджень проводяться експерименти та випробування нових концепцій роботів-маніпуляторів. Ці праці допомагають виявити нові можливості, що виходять за межі традиційних рішень та становлять фундамент подальших інновацій.

Серед великої кількості різнотипних маніпуляційних роботів, виділяються підвісні робототехнічні системи. Незважаючи на невелику увагу з боку розробників та дослідників, вони слугують альтернативою до класичних наземних мобільних роботів, оснащених маніпуляторами, через свої унікальні переваги. Зокрема, ці роботи універсальні та можуть адаптуватися до змінних умов та завдань, мають підвищену точність та надійність, а також широкі перспективи по масштабуванню.

В процесі аналізу основних принципів автоматизованого керування роботами визначено основні актуальні завдання до створення та удосконалення таких систем: інтеграція технологій, безпека використання, підвищення продуктивності та енергоефективності. При цьому використання сучасних систем обчислення, засобів Інтернету речей та штучного інтелекту прискорюють розвиток робототехніки та розширюють сфери застосування готових пристроїв на інші галузі (сільське господарство, обслуговування, енергетика, медицина тощо).

REFERENCES

[1] Hughes, D., Heckman, C., & Correll, N. (2019). Materials that make robots smart. The International Journal of Robotics Research, 38(12–13), 1338–1351.

[2] Yogeswaran, N., Dang, W., Navaraj, W. T., Shakthivel, D., Khan, S., Polat, E. O., ... & Dahiya, R. (2015). New materials and advances in making electronic skin for interactive robots. Advanced Robotics, 29(21), 1359–1373.

[3] Tho, T. P., & Thinh, N. T. (2021). Using a cable-driven parallel robot with applications in 3D concrete printing. Applied Sciences, 11(2), 563.

[4] Kondratenko, Y., Gerasin, O., Kozlov, O., Topalov, A., & Kilimanov, B. (2021). Inspection mobile robot's control system with remote IoT-based data transmission. Journal of Mobile Multimedia. Special issue "Mobile Communication and Computing for Internet of Things and Industrial Automation", Vol. 17, Is. 4. 2021. P. 499–526.

[5] Uholnikov H. H., & Gerasin O. S. (2023). Ohlyad suchasnykh robotiv-manipulyatoriv z avtomatyzovanym keruvannyam [A review of modern robotic manipulators with automated control]. Materialy vseukrayins′koyi naukovo-tekhnichnoyi konferentsiyi studentiv, aspirantiv ta molodykh vchenykh. – Mykolaiv: NUK 2023. S. 48–51 [in Ukrainian].

[6] Li, P., & Liu, X. (2019, July). Common sensors in industrial robots: A review. In Journal of Physics: Conference Series (Vol. 1267, No. 1, p. 012036). IOP Publishing.

[7] Wahde, M. (2012). Introduction to autonomous robots. Lecture Notes from the course Autonomous Agents, Chalmers university of technology.

[8] Zhou, C., Huang, B., & Fränti, P. (2022). A review of motion planning algorithms for intelligent robots. J. of Intelligent Manufacturing, 33(2), 387-424.

[9] Ding, Y., Hua, L., & Li, S. (2022). Research on computer vision enhancement in intelligent robot based on machine learning and deep learning. Neural Computing and Applications, 1–13.

[10] Tzafestas, S. G. (2018). Mobile robot control and navigation: A global overview. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 91, 35–58.

[11] Singh, R., Kukshal, V., & Yadav, V. S. (2021). A review on forward and inverse kinematics of classical serial manipulators. Advances in Engineering Design: Select Proceedings of ICOIED 2020, 417–428.

[12] Patel, Y. D., & George, P. M. (2012). Parallel manipulators applications—a survey. Modern Mechanical Engineering, 2(03), 57.

[13] Butkar, M. U. D., & Waghmare, M. J. (2023). Hybrid Serial-Parallel Linkage Based six degrees of freedom Advanced robotic manipulator. Computer Integrated Manufacturing Systems, 29(2), 70–82.

[14] Hägele, M., Nilsson, K., Pires, J. N., & Bischoff, R. (2016). Industrial robotics. Springer handbook of robotics, 1385–1422.

[15] Jokić, D., Lubura, S., Rajs, V., Bodić, M., & Šiljak, H. (2020). Two open solutions for industrial robot control: The case of puma 560. Electronics, 9(6), 972.

[16] Kilby, W., Dooley, J. R., Kuduvalli, G., Sayeh, S., & Maurer Jr, C. R. (2010). The CyberKnife® robotic radiosurgery system in 2010. Technology in cancer research & treatment, 9(5), 433–452.

[17] Wetzel, E. M., Liu, J., Leathem, T., & Sattineni, A. (2022). The use of boston dynamics SPOT in support of LiDAR scanning on active construction sites. In ISARC. Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction (Vol. 39, pp. 86–92). IAARC Publications.

[18] Davis, B., & Johnson, R. (2019). Development of a Workshop on Automated Vehicle Technologies.

[19] Murdyantoro, B., Atmaja, D. S. E., & Rachmat, H. (2019). Application design of farmbot based on Internet of Things (IoT). International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology, 9(4), 1163–1170.

[20] Bai, G., Ge, Y., Scoby, D., Leavitt, B., Stoerger, V., Kirchgessner, N., ... & Awada, T. (2019). NU-Spidercam: A large-scale, cable-driven, integrated sensing and robotic system for advanced phenotyping, remote sensing, and agronomic research. Computers and Electronics in Agriculture, 160, 71–81.

[21] Kragic, D., Gustafson, J., Karaoguz, H., Jensfelt, P., & Krug, R. (2018, July). Interactive, Collaborative Robots: Challenges and Opportunities. IJCAI (P. 18–25).

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

[1] Hughes, D., Heckman, C., Correll, N. (2019). Materials that make robots smart. The International Journal of Robotics Research, 38(12–13), 1338–1351.

[2] Yogeswaran, N., Dang, W., Navaraj, W. T., Shakthivel, D., Khan, S., Polat, E. O., Dahiya, R. (2015). New materials and advances in making electronic skin for interactive robots. Advanced Robotics, 29(21), 1359–1373.

[3] Tho, T. P., Thinh, N. T. (2021). Using a cable-driven parallel robot with applications in 3D concrete printing. Applied Sciences, 11(2), 563.

[4] Kondratenko, Y., Gerasin, O., Kozlov, O., Topalov, A., Kilimanov, B.(2021) Inspection mobile robot's control system with remote IoT-based data transmission. Journal of Mobile Multimedia. Special issue "Mobile Communication and Computing for Internet of Things and Industrial Automation", Vol. 17, Is. 4. 2021. P. 499–526.

[5] Угольніков Г.Г., Герасін О.С. (2023) Огляд сучасних роботів-маніпуляторів з автоматизованим керуванням. Матеріали всеукраїнської науково-технічної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених. – м. Миколаїв: НУК 2023. С. 48–51.

[6] Li, P., Liu, X. (2019, July). Common sensors in industrial robots: A review. In Journal of Physics: Conference Series (Vol. 1267, No. 1, p. 012036). IOP Publishing.

[7] Wahde, M. (2012). Introduction to autonomous robots. Lecture Notes from the course Autonomous Agents, Chalmers university of technology.

[8] Zhou, C., Huang, B., Fränti, P. (2022). A review of motion planning algorithms for intelligent robots. J. of Intelligent Manufacturing, 33(2), 387–424.

[9] Ding, Y., Hua, L., Li, S. (2022). Research on computer vision enhancement in intelligent robot based on machine learning and deep learning. Neural Computing and Applications, 1–13.

[10] Tzafestas, S. G. (2018). Mobile robot control and navigation: A global overview. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 91, 35–58.

[11] Singh, R., Kukshal, V., Yadav, V. S. (2021). A review on forward and inverse kinematics of classical serial manipulators. Advances in Engineering Design: Select Proceedings of ICOIED 2020, 417–428.

[12] Patel, Y. D., & George, P. M. (2012). Parallel manipulators applications—a survey. Modern Mechanical Engineering, 2(03), 57.

[13] Butkar, M. U. D., Waghmare, M. J. (2023). Hybrid Serial-Parallel Linkage Based six degrees of freedom Advanced robotic manipulator. Computer Integrated Manufacturing Systems, 29(2), 70–82.

[14] Hägele, M., Nilsson, K., Pires, J. N., Bischoff, R. (2016). Industrial robotics. Springer handbook of robotics, 1385–1422.

[15] Jokić, D., Lubura, S., Rajs, V., Bodić, M., Šiljak, H. (2020). Two open solutions for industrial robot control: The case of puma 560. Electronics, 9(6), 972.

[16] Kilby, W., Dooley, J. R., Kuduvalli, G., Sayeh, S., Maurer Jr, C. R. (2010). The CyberKnife® robotic radiosurgery system in 2010. Technology in cancer research & treatment, 9(5), 433–452.

[17] Wetzel, E. M., Liu, J., Leathem, T., Sattineni, A. (2022). The use of boston dynamics SPOT in support of LiDAR scanning on active construction sites. In ISARC. Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction (Vol. 39, pp. 86–92). IAARC Publications.

[18] Davis, B., Johnson, R. (2019). Development of a Workshop on Automated Vehicle Technologies.

[19] Murdyantoro, B., Atmaja, D. S. E., & Rachmat, H. (2019). Application design of farmbot based on Internet of Things (IoT). International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology, 9(4), 1163–1170.

[20] Bai, G., Ge, Y., Scoby, D., Leavitt, B., Stoerger, V., Kirchgessner, N., ... Awada, T. (2019). NU-Spidercam: A large-scale, cable-driven, integrated sensing and robotic system for advanced phenotyping, remote sensing, and agronomic research. Computers and Electronics in Agriculture, 160, 71–81.

[21] Kragic, D., Gustafson, J., Karaoguz, H., Jensfelt, P., & Krug, R. (2018, July). Interactive, Collaborative Robots: Challenges and Opportunities. IJCAI (P. 18–25).

Дата надходження статті до редакції: 25.04.2024
Дата затвердження статті до друку: 13.05.2024