Кафедра _____*інформаційно-вимірювальних технологій*_____

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до бакалаврської кваліфікаційної роботи на тему

Розроблення та дослідження робота для збирання урожаю овочів та фруктів

Студент *152, МТ-41, Шадських А. Д.*
(шифр, група, прізвище та ініціали)

Керівник БКР _____ */ д.т.н, проф. Бубела Т.З./*

Консультанти _____ */ к.е.н.,доц. Рачинська Г.В/*

_____ */д.т.н. Кочан О. В. /*

_____ */ /*

_____ */ /*

Завідувач кафедри _____ */ д.т.н, проф. Бубела Т.З./*

"___" _____ 2025 р.

Національний університет «Львівська Політехніка»

(назва вищого навчального закладу)

Інститут ІКТА Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій

Спеціальність *Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка*

"ЗАТВЕРДЖУЮ"

Завідувач кафедри ІВТ

проф. Бубела Т.З.

"___" _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ

на бакалаврську кваліфікаційну роботу студентці

Шадських Анні Дмитрівній

(прізвище, ім'я по батькові)

1. Тема проекту Розроблення та дослідження робота для збирання урожаю овочів та фруктів затверджена наказом по університету від «8» квітня 2025 р. № 1282-4-08

2. Термін подання студентом закінченого проекту 23.06.2025р.

3. Вихідні дані до проекту: на основі теоретичних досліджень здійснити моделювання прототипу робота для збору врожаю овочів і фруктів

4. Зміст розрахунково – пояснювальної записки (перелік питань, що їх треба розробити):

РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ РОЗРОБКИ РОБОТА-ЗБИРАЧА

РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА МОДЕЛІ РОБОТА-ЗБИРАЧА

РОЗДІЛ 4. ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ПРОЕКТНИХ РІШЕНЬ

5. Консультанти з проекту, із зазначенням розділів проекту, що стосуються їх

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Економічна частина	*к.е.н.,доц. Рачинська Г.В.*		

6. Дата отримання завдання

Керівник_____(підпис)

Завдання прийняв до виконання_____(підпис)

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Пор. №	Назва етапів бакалаврської кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів БКР	Примітки
1.	*Отримання завдання*	*01.03.2025 р.*	
2.	*Здійснити огляд та аналіз сучасних технологій в агросекторі.*	*19.03.25р.-26.03.25 р.*	
3.	*Пошук теоретичної інформації про будову і вимоги для робота-збирача*	*24.04.25р.-28.04.25р.*	
4.	*Вибір необхідних компонентів для проєктованого робота*	*29.04.25р. -30.04.25р.*	
5.	*Розробка моделі робота-збирача у програмному забезпеченні Fusion 360*	*07.05.25р. -25.05.25р.*	
6.	*Оформлення першого і другого розділу*	*25.05.25р. -28.05.25р.*	
7.	*Оформлення третього розділу та додатків*	*28.05.25р.-30.05.25р.*	
8.	*Розрахунок розділу економіки*	*31.05.25р. -02.06.25р.*	
9.	*Оформлення розділу економіки*	*02.06.25р. -03.06.25р.*	
10.	*Оформлення пояснювальної записки, висновків та рекомендацій*	*10.06.25р. -15.06.25р.*	

Студент – дипломник_____(підпис)

Керівник_____(підпис)

АНОТАЦІЯ

У бакалаврській кваліфікаційній роботі в результаті проектування розроблено модель мобільного робота, призначеного для автоматизованого збирання врожаю овочів і фруктів у сільському господарстві. Проведено аналіз існуючих рішень, визначено основні вимоги до систем автономного збору врожаю та сформульовано технічні завдання для проєктування. Розроблено конструкцію платформи робота, включаючи механічну частину, систему виявлення плодів на основі комп’ютерного зору.

Запропоноване рішення сприяє підвищенню ефективності аграрного виробництва, зниженню залежності від сезонної робочої сили та є перспективним напрямком у сфері роботизації сільського господарства.

ABSTRACT

In the bachelor's qualification work, a model of a mobile robot designed for automated harvesting of vegetables and fruits in agriculture was developed. An analysis of existing solutions was carried out, the main requirements for autonomous harvesting systems were identified, and technical tasks for the design were formulated. The robot platform design was developed, including the mechanical structure and a fruit detection system based on computer vision.

The proposed solution contributes to increasing the efficiency of agricultural production, reducing dependence on seasonal labor, and represents a promising direction in the field of agricultural robotics.

ЗМІСТ

ВСТУП 6
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ В АГРОСЕКТОРІ 9
1.1 Сучасні технології в аграрному секторі 9
1.2 Приклади сучасних роботизованих систем 10
1.3 Порівняльний аналіз існуючих рішень 15
Висновок до розділу 1 17
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ РОЗРОБКИ РОБОТА-ЗБИРАЧА 19
2.1 Вимоги до робота-збирача 19
2.2 Система технічного зору, як основний сенсорний інструмент робота-збирача 20
2.3 Захоплювальний механізм 31
2.4 Маніпулятори 36
2.5 Мобільна платформа та система збирання (транспортування) плодів 37
Висновок до розділу 2 40
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА МОДЕЛІ РОБОТА-ЗБИРАЧА 41
3.1. Постановка завдання та функціональні вимоги 41
3.2 Вибір основних компонентів 42
3.3 3D-моделювання конструкції в Autodesk Fusion 360 46
Висновок до розділу 3 51
РОЗДІЛ 4. ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ПРОЕКТНИХ РІШЕНЬ 53
4.1 Економічна характеристика проектного виробу 53
4.2 Визначення комплексного показника якості 53
4.3 Розрахунок лімітної ціни нового виробу 56
4.4 Визначення показників економічної ефективності проектних рішень 58
Висновок до розділу 4 64
ВИСНОВКИ 66
ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ 67
ДОДАТКИ 69

ВСТУП

Сучасне сільське господарство стрімко трансформується під впливом глобальних викликів, таких як нестача робочої сили, зростання попиту на продовольство та необхідність підвищення ефективності агровиробництва. У зв'язку з цим усе більшого значення набувають автоматизовані та роботизовані системи, здатні виконувати трудомісткі операції, зокрема збирання урожаю. Одним із перспективних напрямів у цій сфері є розроблення мобільних роботів, які можуть автономно переміщуватись сільськогосподарськими угіддями, виявляти та обережно збирати плоди овочів та фруктів.

Незважаючи на значний прогрес у розробці таких систем, вони все ще мають обмежену ефективність у складних умовах реального середовища, зокрема через нерівномірне освітлення, складність розпізнавання плодів серед листя, а також різноманіття форм і кольорів сільськогосподарської продукції. Тому виникає потреба у створенні робототехнічних комплексів, що поєднують надійну механіку, ефективні алгоритми комп'ютерного зору та адаптивне керування..

Актуальність теми

Сільське господарство є однією з ключових галузей економіки, яка забезпечує продовольчу безпеку та стабільність суспільства. Однак останніми роками галузь стикається з рядом викликів: нестачею кваліфікованої робочої сили, підвищенням вимог до якості продукції, зростанням собівартості ручної праці та необхідністю мінімізації впливу людського фактора на виробничі процеси. Ці чинники зумовлюють нагальну потребу в автоматизації багатьох операцій, зокрема збирання урожаю.

Традиційні методи збору овочів і фруктів потребують значних людських ресурсів, є трудомісткими, дорогими та часто неефективними в умовах великомасштабного виробництва. У той же час, збирання урожаю є критичним етапом, який безпосередньо впливає на обсяги, якість і збереження продукції. Використання робототехнічних систем може суттєво підвищити

ефективність цього процесу, знизити втрати та забезпечити стабільність виробничого циклу.

Особливої актуальності набувають мобільні роботи, здатні працювати в складних умовах відкритого або закритого ґрунту, розпізнавати плоди за допомогою систем комп'ютерного зору та виконувати дії зі збору з високою точністю. Світовий тренд на впровадження технологій штучного інтелекту, комп'ютерного зору та автономного транспорту в аграрному секторі підкреслює перспективність досліджень у цьому напрямі.

Таким чином, тема розроблення та дослідження робота для збирання овочів і фруктів є надзвичайно актуальною, оскільки відповідає викликам часу, сприяє розвитку інновацій у сільському господарстві та має значний потенціал практичного застосування.

Об'єктом досліджень є: процес автоматизованого збирання овочів і фруктів за допомогою мобільного робота.

Предметом дослідження є: методи і алгоритми, що забезпечують автономну роботу робота-збирача у сільськогосподарських умовах.

Мета і завдання дослідження

Метою даного дослідження є розроблення та експериментальне дослідження мобільного робота, здатного здійснювати автоматизоване збирання овочів і фруктів у сільськогосподарських умовах із застосуванням технологій комп'ютерного зору. Для досягнення цієї мети в роботі передбачено вирішення таких задач:

- проведення аналізу існуючих технічних рішень у сфері роботизованого збирання врожаю,
- визначення вимог до створення подібної системи,
- проєктування конструкції мобільного робота,
- обґрунтування вибору компонентів.

Також заплановано моделювання роботи системи в умовах, наближених до реальних, з подальшою оцінкою її ефективності та аналізом

економічної доцільності впровадження запропонованого рішення в аграрне виробництво.

Практичне значення:

Практичне значення дослідження полягає у створенні інженерного рішення, яке може бути використане як основа для впровадження автономних роботів у процес збирання овочів і фруктів у сільському господарстві. Запропонована система поєднує сучасні технічні засоби, алгоритми комп’ютерного зору та елементи штучного інтелекту, що дозволяє автоматизувати один із найтрудомісткіших етапів аграрного виробництва — збирання урожаю. Отримані в ході роботи технічні рішення можуть бути використані для створення дослідного зразка або комерційного продукту, що здатен працювати в тепличних умовах або на відкритих плантаціях. Реалізація такого робота сприятиме зниженню витрат на ручну працю, підвищенню продуктивності, стабільності виробничого процесу та загальному технологічному оновленню аграрного сектору.

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ В АГРОСЕКТОРІ

1.1 Сучасні технології в аграрному секторі

Аграрний сектор є одним із найважливіших напрямів світової економіки, і його розвиток безпосередньо залежить від впровадження новітніх технологій. На тлі глобальних викликів — таких як зміни клімату, скорочення сільського населення, підвищення попиту на продовольство та дефіцит кваліфікованої робочої сили — аграрна галузь все активніше інтегрує інноваційні рішення, спрямовані на підвищення ефективності, продуктивності та стійкості виробництва.

Одним із ключових напрямів розвитку аграрних технологій є автоматизація та роботизація виробничих процесів. Вони охоплюють широкий спектр завдань: підготовку ґрунту, сівбу, обприскування, полив, моніторинг стану рослин, збирання врожаю та його первинну обробку. Застосування роботизованих систем у сільському господарстві дозволяє зменшити залежність від сезонної ручної праці, підвищити точність агротехнічних операцій і зменшити витрати ресурсів.

Широкого розповсюдження набувають технології точного землеробства (Precision Agriculture), які передбачають використання GPS-навігації, супутникового моніторингу, безпілотних літальних апаратів (дронів), сенсорних систем і програмного забезпечення для збору, аналізу та обробки даних про стан ґрунтів, погоду, вегетацію рослин тощо. Це дає змогу приймати обґрунтовані агрономічні рішення в режимі реального часу.

Окрему нішу в аграрних технологіях займають автономні мобільні платформи, які здатні виконувати специфічні завдання без участі людини. До таких належать трактори з автопілотом, дрони для обприскування, сенсорні платформи для моніторингу стану посівів, а також роботи-збирачі плодів. Саме останні є об’єктом активних досліджень і розробок у багатьох країнах, адже автоматизація збирання врожаю залишається технічно складним, але стратегічно важливим завданням.

Водночас активно розвиваються комп’ютерне бачення та штучний інтелект, які інтегруються в аграрні процеси. Зокрема, камери та сенсори, вбудовані у техніку, дозволяють аналізувати стан рослин, виявляти хвороби, шкідників чи стиглість плодів. Завдяки технологіям глибокого навчання системи можуть розпізнавати об’єкти з високою точністю, навіть в умовах змінного освітлення чи складного фону.

Загалом, поєднання досягнень у галузі машинобудування, сенсорних систем, штучного інтелекту та інформаційних технологій формує підґрунтя для нової технологічної революції в аграрному секторі, де автоматизовані роботи можуть стати основою високоточного, ефективного та сталого сільського господарства.

Автоматизація процесу збирання врожаю є одним із найскладніших завдань у сільському господарстві через необхідність делікатного поводження з плодами, їхню варіативність за формою, розміром та кольором, а також складні умови навігації в польових умовах. Однак останніми роками спостерігається значний прогрес у розробці роботизованих систем, здатних ефективно виконувати ці завдання.

Сучасні роботи для збирання врожаю зазвичай складаються з мобільної платформи, маніпулятора з кінцевим ефектором, системи комп’ютерного зору та блоку керування. Вони використовують камери та сенсори для виявлення стиглих плодів, планування траєкторії руху та здійснення захвату без пошкодження продукції.

1.2 Приклади сучасних роботизованих систем

1. Sweeper – робот для збирання солодкого перцю: розроблений для збирання солодкого перцю в тепличних умовах, використовує камери та сенсори для виявлення стиглих плодів і акуратно їх зрізає. [1]

Рисунок 1.1 Sweeper – робот для збирання солодкого перцю

Технічні характеристики:

- **Система зору:** RGB-D камера, що поєднує кольорове зображення та глибину для точного визначення стиглості плодів.
- **Освітлення:** Потужні LED-спалахи забезпечують стабільну роботу в умовах змінного освітлення, дозволяючи працювати як вдень, так і вночі.
- **Час збирання одного плоду:** В середньому 24 секунди; в лабораторних умовах до 15 секунд.
- **Успішність збирання:** До 61% у модифікованих умовах вирощування; близько 18% у стандартних тепличних умовах.
- **Робочий час:** Може працювати до 20 годин на добу з періодичним обслуговуванням та зарядкою.

Особливості:

- Робот оснащений маніпулятором з кінцевим ефектором, який акуратно зрізає плоди та поміщає їх у контейнер.
- Система комп’ютерного зору аналізує колір та форму плодів для визначення їхньої стиглості.

- Розроблений для роботи в однорядних системах вирощування, що оптимізує його ефективність.

2. **Agrobot – робот для збирання полуниці**: призначений для збирання полуниці, оснащений кількома маніпуляторами та системою комп'ютерного зору для точного визначення стиглості ягід.[2]

Рисунок 1.2 Agrobot – робот для збирання полуниці

Технічні характеристики:

- **Маніпулятори:** До 24 незалежних роботизованих рук, що працюють одночасно для збирання ягід.
- **Система зору:** Комп'ютерне бачення для виявлення стиглих ягід та визначення їхнього розташування.
- **Матеріали:** Конструкція з нержавіючої сталі та алюмінію військового класу для забезпечення довговічності та стійкості до корозії.
- **Продуктивність:** Здатен працювати безперервно, зменшуючи залежність від сезонної робочої сили.

Особливості:

- Робот здатен адаптуватися до різних умов вирощування та сортувати ягоди за розміром та стиглістю.
- Зменшує пошкодження плодів завдяки делікатному захвату та точному зрізу.

3. FFRobotics – робот для збирання фруктів: розробляє системи для збирання різних фруктів, включаючи яблука та груші, з використанням передових алгоритмів розпізнавання та маніпуляторів для акуратного захвату плодів.[3]

Рисунок 1.3 FFRobotics – робот для збирання фруктів

Технічні характеристики:

- **Маніпулятори:** До 12 роботизованих рук, що імітують рухи людської руки для делікатного збирання плодів.
- **Система зору:** Комп'ютерне бачення для ідентифікації стиглих плодів та визначення їхнього розташування.
- **Продуктивність:** До 10 разів швидше за середнього людського збирача, зменшуючи потребу в сезонній робочій силі.
- **Додаткові функції:** Збір та аналіз даних про зібрані плоди для оптимізації врожайності та управління садом.

Особливості:

- Робот здатен працювати в різних умовах вирощування, адаптуючись до різних сортів та розмірів плодів.
- Зменшує пошкодження плодів завдяки точному захвату та зрізу.

4. Advanced Farm Apple Harvester — робот для збирання яблук: використовує роботизовані системи для збирання яблук, оснащені кількома маніпуляторами та системами комп'ютерного зору для ефективного та делікатного збирання плодів. [4]

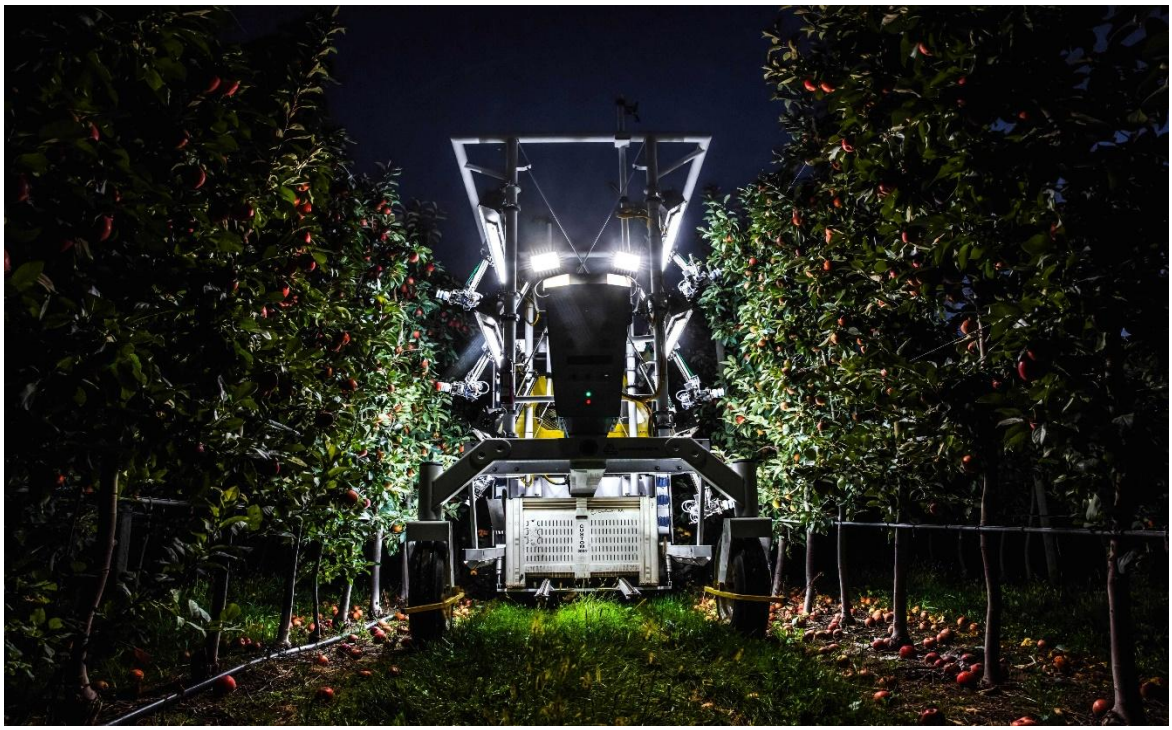


Рисунок 1.4 Advanced Farm Apple Harvester — робот для збирання яблук

Технічні характеристики:

- **Маніпулятори:** 6 роботизованих рук, оснащених м'якими, харчовими захватами, які обережно знімають яблука з дерева без пошкоджень.
- **Система зору:** Стереокамера з глибоким навчанням, яка дозволяє точно визначати стиглість плодів незалежно від сорту та умов освітлення.
- **Продуктивність:** Здатен зменшити потребу в ручній праці на понад 50%, працюючи безперервно в різних погодних умовах.
- **Шасі:** Легке гібридно-електричне шасі, що забезпечує точне та ефективне пересування по ґрунту.
- **Інтеграція:** Сумісний з існуючими системами садівництва, дозволяючи безперешкодно проходити повз повні та порожні контейнери без зупинки процесу збирання.

Особливості:

- **Делікатне збирання:** Механізм "м’якого скручування та витягування" забезпечує обережне відокремлення яблука від гілки, мінімізуючи пошкодження плодів.
- **Адаптація до садів:** Оптимізований для роботи в садах з вертикальними шпалерами та міжряддями шириною від 9 до 11 футів. [5]
- **Інтелектуальна система:** Використовує технології комп’ютерного зору та штучного інтелекту для точного визначення стиглості та розташування плодів.
- **Екологічність:** Гібридна електрична система приводу зменшує викиди та забезпечує тиху роботу, що важливо для екологічно чистого виробництва.

Попри ці досягнення, існують виклики, пов’язані з точністю виявлення плодів, адаптацією до різних культур та умов навколишнього середовища. Проте постійні дослідження та розробки в цій галузі сприяють удосконаленню роботизованих систем та їх широкому впровадженню в аграрному секторі.

1.3 Порівняльний аналіз існуючих рішень

У світі стрімко зростає попит на автоматизовані рішення для сільського господарства, зокрема для процесу збирання врожаю. Причинами цього є дефіцит сезонної робочої сили, зростання вимог до якості продукції, підвищення собівартості праці та необхідність оптимізації аграрного виробництва. За останнє десятиліття було створено низку роботизованих платформ, що використовуються для збору овочів, фруктів і ягід. До прикладу я взяла саме таких роботів: **Sweeper**, **Agrobot E-Series**, **FFRobot** та **Advanced Farm Harvester**.

Ці системи мають різну конструкцію, рівень автоматизації, технологічні підходи та сфери застосування. Порівняльний аналіз основних характеристик цих роботів дозволяє зробити висновки про їхні переваги та

обмеження, а також виокремити напрями, які варто враховувати при розробці нових рішень.

Таблиця 1.1

Порівняльна таблиця характеристик агророботів

Параметр	**Sweeper**	**Agrobot E-Series**	**FFRobot**	**Advanced Farm Harvester**
Призначення	Перець у теплицях	Полуниця на відкритому ґрунті	Яблука, груші, сливи	Яблука
Кількість маніпуляторів	1	до 24	до 12	6
Система зору	RGB-D камера	Комп’ютерне бачення	AI-зір + глибина	Стереокамера з AI
Середній час збору 1 плоду	~24 с	~1–2 с	<1 с	~7 с
Середня успішність збору	до 61%	>70%	>85%	>90%
Особливості	LED-освітлення, зріз плодів	Незалежні руки, адаптивність	Людоподібна механіка рук	М’які захвати, AI сортування
Додаткові функції	Працює у вузьких рядах	Автосортування	Збір аналітики з саду	Повна автономія
Комерційна доступність	Прототип	Передкомерційна стадія	Рання комерціалізація	Активно впроваджується

Як видно з таблиці, робот **Sweeper** демонструє досить базовий рівень автоматизації й підходить переважно для однорядних тепличних культур. Його час збору одного плоду — найбільший серед наведених рішень. Попри

це, він є гарною ілюстрацією успішного науково-дослідного проєкту, реалізованого в рамках європейської програми Horizon 2020.

Agrobot E-Series виділяється мультиінструментальним підходом — до 24 незалежних маніпуляторів працюють паралельно, що робить його придатним для культур із високою щільністю плодів, таких як полуниця. Конструкція дозволяє працювати у відкритому полі з досить складними умовами.

FFRobot демонструє найвищий рівень адаптації до природних умов — його руки імітують людські рухи, що дозволяє зберігати якість при зборі фруктів. Також він може збирати різні види плодів, що підвищує його універсальність.

Advanced Farm Harvester є найпросунутішим рішенням серед розглянутих. Він активно впроваджується у США та має високий рівень автономності. Його інтелектуальна система бачення дозволяє в реальному часі розрізняти стиглість, сорт і розмір плодів. М’які захвати мінімізують пошкодження яблук.

Порівняльний аналіз показує, що ключовими критеріями успішності роботизованих рішень для збору врожаю є точність виявлення плодів, адаптивність до різних культур, швидкість збирання та мінімізація пошкоджень. Жодна з систем не є універсальною, що підкреслює важливість вузької спеціалізації під конкретні культури. Розробка нового робота має враховувати найкращі рішення з наявних систем, водночас оптимізуючи конструкцію та ПЗ відповідно до конкретних завдань.

Висновок до розділу 1:

У першому розділі було розглянуто сучасний стан технологічного розвитку аграрного сектору з акцентом на автоматизацію та роботизацію процесів, зокрема збирання врожаю. Було встановлено, що використання автономних роботизованих систем є перспективним напрямом у контексті

глобальних викликів, таких як дефіцит робочої сили, потреба в підвищенні ефективності виробництва та зниження витрат.

Огляд літературних джерел та існуючих розробок свідчить про наявність низки рішень, які вже демонструють практичну ефективність у збиранні овочів, фруктів та ягід. Зокрема, такі системи як Sweeper, Agrobot, FFRobot та Advanced Farm Harvester використовують сучасні технології комп’ютерного зору, багатоманіпуляторну архітектуру та інтелектуальне керування. Водночас, жодна з існуючих систем не є універсальною — кожна орієнтована на конкретну культуру, тип вирощування та умови експлуатації.

Проведений порівняльний аналіз підтверджує, що подальший розвиток у цій галузі потребує інтеграції інноваційних рішень із глибоким урахуванням особливостей об'єкта збирання. Отримані результати стали основою для формування технічних вимог до створення нового прототипу мобільного робота-збирача, що розглядатиметься у наступних розділах.

РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ РОЗРОБКИ РОБОТА-ЗБИРАЧА

2.1 Вимоги до робота-збирача

Автономний робот для збирання овочів і фруктів складається з декількох ключових систем, включаючи систему технічного зору, роботизовану руку, блок управління, мобільну платформу, ендефектор та джерело живлення [6]. Робот використовує камеру технічного зору для зйомки зображень і застосовує методи обробки зображень разом з алгоритмами машинного навчання для точної ідентифікації типу, місцезнаходження та стиглості продукції. На основі цієї інформації робот розраховує оптимальну траєкторію руху і генерує траєкторію для роботизованої руки, щоб досягти цільового продукту. При наближенні до плоду активується кінцевий ефект, який використовує м'які механізми захоплення або всмоктування для дбайливого збору врожаю. Після успішного захоплення, роботизована рука переносить його в кошик для збору або на конвеєр, таким чином завершуючи процес збору врожаю [7].

Робот-збирач використовує систему технічного зору для захоплення зображень і застосовує передові технологію обробки зображень для точної ідентифікації типу, місцезнаходження та стиглості фруктів і овочів. На основі цих даних робот використовує технологію позиціонування для отримання точної інформації про місцезнаходження, що дозволяє йому планувати оптимальну траєкторію руху для
оптимальну траєкторію руху роботизованої руки для досягнення цільового продукту.

Коли роботизована рука наближається до фрукта, активується кінцевий ефект, який обережно відокремлює плоди, не завдаючи їм жодних пошкоджень. Після надійного захоплення плодів роботизований маніпулятор переносить їх у кошик для збору або конвеєрну стрічку, тим самим завершуючи процес збирання врожаю. Таким чином, ефективність

збирання фруктів та овочів залежить від двох критично важливих технологій: систем технічного зору та кінцевих механізмів сепарації плодів.

2.2 Система технічного зору

Система технічного зору зазвичай складається з камери, модуля обробки зображень, пристрою локалізації та центрального процесора. Зазвичай використовується одна або дві камери, відповідно до монокулярної або бінокулярної установки [8].

Основними функціями модуля технічного зору включають отримання оцифрованих зображень, обробку, локалізацію продукції та виявлення перешкод, таких як стебла та листя. На основі інформації, отриманої від системи технічного зору, відбувається керування маніпулятором, захватом та іншими компонентами для виконання точного збирання. Системи технічного зору часто працюють в парі з штучними джерелами світла або оптичними фільтрами для пом'якшення таких проблем, як неточне розпізнавання, викликане тінями на поверхні фруктів та овочів у природних умовах [9].

Сенсорика

Візуальні сенсори роботів-збирачів забезпечують ключову візуальну інформацію, що дозволяє ефективно виконувати розпізнавання, локалізацію та прийняття рішень. Ці сенсори формують основу здатності робота сприймати навколишнє середовище, ідентифікувати цільові плоди та планувати оптимальний шлях для їх збирання. Оснащуючи роботи-збирачі сучасними візуальними сенсорними технологіями, їх наділяють своєрідними «інтелектуальними очима», що дозволяє автономно та ефективно виконувати завдання навіть у складних природних умовах. Роботи-збирачі використовують різноманітні візуальні сенсори, зокрема кольорові камери для зйомки кольорової інформації плодів, а також ближньоінфрачервоні та мультиспектральні камери для розпізнавання плодів на складному фоні. Для розпізнавання плодів зазвичай

використовуються такі ознаки, як колір, текстура та форма на кольорових зображеннях [10]. Дослідники розробили реальні монохромні візуальні системи для збирання яблук, що використовують кольорові CCD-камери для зйомки зображень яблук з обробкою зображення на ПК [11]. Проте одноколірні камери можуть забезпечувати лише двовимірну інформацію про положення та ступінь стиглості, не маючи можливості отримати тривимірні дані про положення [12]. На сьогодні роботи-збирачі зазвичай використовують бінокулярний машинний або монохромний зір у поєднанні з дальномірами для досягнення точної локалізації плодів. Так, Тероу та ін. розробили робота для збирання яблук, чия система зору використовувала дві кольорові CCD-камери [13]. Завдяки одночасній зйомці одного й того самого об'єкта ці камери дозволяли синтезувати 3D-інформацію про ціль збирання. Ван та ін. використовували бінокулярний візуальний сенсор, що включає як кольорову, так і інфрачервону камеру; остання захоплювала зображення глибини, що відповідали кольоровим знімкам [14] Вей та ін. спроєктували інтелектуальних роботів-збирачів на основі обробки зображень із глибинним бінокулярним зором, які використовують стереозір для перетворення зображень у тривимірні стереограми. Юань та ін. реалізували систему бінокулярного стереозору з алгоритмом співставлення, що поєднує кореляцію у градаціях сірого та полігональну геометрію для стереозіставлення та 3D-реконструкції точок захвату огірків. Вчені розробили метод розпізнавання та вимірювання для роботів-збирачів баклажанів на основі бінокулярного зору, використовуючи алгоритм сегментації на основі порогового значення яскравості для сегментації зображень у сірій шкалі (G-B). Центр мас обирали як основний елемент для співставлення, а глибинну інформацію про баклажани розраховували за принципом подібності трикутників.

Для кращого отримання глибинної інформації про плоди деякі дослідники використовують RGB-D камери глибини для захоплення зображень. RGB-D камера поєднує функції традиційної RGB камери з

можливостями сприйняття глибини, що дозволяє одночасно отримувати як кольорові, так і глибинні зображення . Китайські розробники розробили набір роботів-збирачів із системою автономного планування шляху на основі камери глибини та технології навігації SLAM [15]. Компанія Abundant Robotics створила робота для збирання яблук, що використовує технологію камери глибини для локалізації та розпізнавання [16]. Сілвал та ін. розробили робота для збирання яблук на основі камери глибини, який в основному застосовується в яблуневих садах із методом вирощування у формі V-решітки [17]. Цей робот досяг успішності збирання на рівні 84%, із середнім часом збирання одного яблука близько 6 секунд.

Узагальнюючи, 2D-сенсори зору є відносно недорогими, легко інтегруються та мають широкий вибір готових алгоритмів для розпізнавання кольору та форми. Однак їх робота значною мірою залежить від умов зовнішнього освітлення, що може впливати на точність розпізнавання. Натомість 3D-камери глибини забезпечують деталізовану інформацію про глибину, необхідну для точного тривимірного моделювання, але мають вищу вартість. Лазерні та ультразвукові далекоміри, хоча й корисні для локалізації, є дорогими й можуть демонструвати повільнішу реакцію системи. Бінокулярні системи зору, хоч і ефективні, потребують складних алгоритмів для стереозіставлення, вимагають значних обчислювальних ресурсів і високої точності. Тому дуже важливо обирати відповідні сенсори залежно від конкретних завдань і сценаріїв застосування, а також оптимізувати їхню продуктивність шляхом інтеграції кількох типів сенсорів [18].

Таблиця 2.1

Порівняння характеристик візуальних сенсорів

Сенсори	**Переваги**	**Дальність виявлення**	**Недоліки**	**Точність позиціонування, %**
Монохромна камера	Проста конструкція, низька вартість, відносно прості алгоритми обробки зображень	400–1500 мм	Неможливість прямо визначити справжній розмір об'єкта; затінення об'єкта призводить до втрати інформації; невисока точність розпізнавання	81–91
Стереозір (бінокулярне зіставлення)	Здатність забезпечувати багатуглибинну і позиційну інформацію з високою точністю калібрування	300–1500 мм	Схильність до впливу відбиття поверхні об'єкта; потребує великих обчислювальних ресурсів; складні алгоритми; високі витрати на обладнання	83–95
Камера RGB-D	Невеликий розмір, висока інтеграція, краща робота при слабкому	400–1500 мм	Високе енергоспоживання, низька роздільна здатність, обмеження по глибині різкості та	86–94

Сенсори	Переваги	Дальність виявлення	Недоліки	Точність позиціонування, %
	освітленні або нестачі текстури; широкий спектр застосувань		засвітів; високі вимоги до обробки даних	
Лазерний далекомір	Висока точність вимірювання відстані, швидка реакція, велика дальність, сильна адаптивність	1000–1500 мм	Вплив листя або гілок, що блокують сигнал; при великій відстані результат стає нечітким	87–90

Алгоритм розпізнавання

Під час виконання завдань зі збирання робот спершу сегментує та розпізнає отримані зображення для ідентифікації цільових плодів. Зазвичай використовуються такі алгоритми розпізнавання об'єктів: традиційні методи цифрової обробки зображень, що базуються на ознаках зображення, таких як колір, форма та текстура; методи сегментації зображень на основі машинного навчання; а також нейронні мережі на основі глибинного навчання [19].

А) Традиційна обробка зображень

Традиційні методи цифрової обробки зображень базуються на сегментації ознак, таких як колір, форма і текстура, для виявлення плодів, наприклад, яблук, томатів і цитрусових, що мають чіткі та стабільні характеристики на зображеннях. Ці методи охоплюють широкий спектр

підходів і алгоритмів, зокрема покращення зображень, фільтрацію, сегментацію та виділення ознак. Вони є універсальними і застосовуються для різноманітних завдань і вимог. Плоди демонструють значущі та стабільні кольорові характеристики, які менш залежні від розміру зображення.

Також застосовується метод сегментації з динамічним порогом Оцу, заснований на кольорових ознаках (R-G), для сегментації зображень плодів. У галузі комп'ютерного зору та обробки зображень метод Оцу, названий на честь його автора Нобуюкі Оцу, є одним із кластеризаційних методів для автоматичного визначення порогу. Він використовується для перетворення сірого зображення у бінарне. Суть алгоритму полягає в припущенні, що зображення складається з двох основних груп пікселів: переднього плану та фону, які формують двомодальну гістограму. Завдання алгоритму — знайти такий поріг, що розділяє ці два класи пікселів так, аби їх внутрішньокласова дисперсія була мінімальною, або, що еквівалентно, міжкласова дисперсія була максимальною. Це дозволяє досягти максимальної чіткості розділення об'єктів на зображенні.

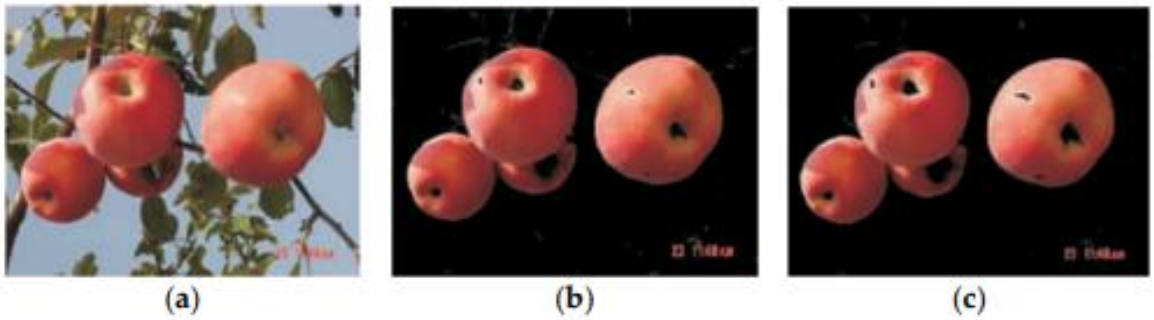


Рисунок 2.1 Порівняння ефективності сегментації зображення. (а) Оригінальне зображення; (б) сегментація з фіксованим порогом; (в) сегментація з динамічним порогом за методом Оцу.

Окрім кольорових ознак, для виявлення плодів можна використовувати сегментацію за ознаками форми. Форма особливо корисна для подолання складнощів, коли плоди частково приховані гілками, листям або ростуть у гронах, що може змінювати їхні геометричні параметри та

знижувати точність розпізнавання. Текстурні ознаки також відіграють важливу роль у розрізненні плодів і фону, особливо у випадках, коли плоди зливаються з навколишнім середовищем.

Рисунок 2.2 Розпізнавання плодів на основі текстурних особливостей. (a) Густа зелень; (b) Розрідженість зеленого листя.

Хоча методи аналізу окремих ознак можуть бути ефективними для виявлення плодів у природних умовах, вони часто стикаються з труднощами у складних структурах садів, де тіні, гілки, листя та грона плодів ускладнюють виділення ознак. Дослідження показують, що поєднання кількох ознак, таких як колір, текстура та форма, значно покращує точність і стійкість розпізнавання .

Таблиця 2.2

Результати порівняння традиційних методів цифрової обробки зображень

Алгоритм розпізнавання	**Переваги**	**Недоліки**	**Точність/%**
На основі кольору [46–48]	Може значно відрізняти плодові об'єкти.	Значно залежить від освітлення.	80–85
На основі форми [49,50]	Може отримати контурну інформацію про плодові об'єкти.	Чітко залежить від перекриття гілок і листя, а також розміру плодів.	80–87
На основі текстури [51–53]	Добре відокремлює плоди та фонову інформацію.	Чітко залежить від таких факторів, як освітлення та перекриття гілок і листя.	75–90

Б) Сегментація зображень

Машинне навчання може виявляти патерни в наборах даних, які важко узагальнити за допомогою традиційних методів аналізу. Цей процес включає використання навчального набору даних для налаштування параметрів моделі, щоб вона могла ефективно навчатися на даних. Під час навчання використовується валідаційний набір даних для оцінки продуктивності моделі. Після того, як модель навчена та перевірена, її можна застосовувати до нових даних для прогнозування або прийняття рішень. Алгоритми сегментації зображень використовують такі ознаки, як колір, форма та текстура для ідентифікації плодів. До цих алгоритмів належать сегментація за порогом, хроматична аберація, кластеризація методом K-середніх, методи зростання області та машини опорних векторів. Машина опорних векторів є типом переднього нейронного мережа та

належить до категорії алгоритмів супервізованого статистичного навчання. Її часто використовують у поєднанні з такими ознаками, як колір цілі, текстура та поточний стан.

У природних умовах освітлені плоди можуть бути приховані гілками та листям або перекриватися між собою, що негативно впливає на їхнє розпізнавання. Для вирішення цих проблем розробник Тао та ін. запропонували змінений метод видобутку ознак, що поєднує компоненти кольору RGB і HSI з даних точкових хмар разом з 3D геометричними ознаками, отриманими за допомогою дескриптора FPFH. Цей підхід підвищує стійкість до розпізнавання плодів за допомогою аналізу кольорових ознак і використовує генетичний алгоритм для оптимізації машини опорних векторів, щоб автоматично розпізнавати яблука, гілки та листя, що робить його ефективним в умовах складного розпізнавання. Ще одні китайські вчені розробили метод для розпізнавання і локалізації прихованих плодів шляхом визначення локальних максимумів через обчислення мінімальної відстані від точки всередині кола до його краю, таким чином визначаючи центр і радіус кола. Цей метод показав кращі результати, коли перекриття було мінімальним. Зазначені алгоритми сегментації зображень можуть ефективно відокремлювати цільові об'єкти від фону, надаючи інформацію про межі та форму, що сприяє подальшому розпізнаванню та обробці. Однак ці алгоритми чутливі до змін освітлення, що може значно вплинути на точність сегментації, особливо в природних умовах, де освітлення часто змінюється. Крім того, шум на зображенні може спотворити результати сегментації, що призводить до помилкової сегментації або її пропуску. Для зменшення цих проблем необхідні попередні кроки для зменшення впливу шуму. Таким чином, подальша оптимізація алгоритмів сегментації зображень є необхідною для підвищення ефективності роботів для збору урожаю.

Таблиця 2.3

Методи сегментації зображень та їх порівняльні характеристики

Метод сегментації зображень	**Переваги**	**Недоліки**	**Точність / %**
Байєсівський класифікаційний алгоритм	Добре працює на невеликих наборах даних і має швидкий час відгуку.	Сильно залежить від навчального набору, погано працює в умовах із сильним освітленням.	81
Алгоритм SVM	Висока точність, добре працює з даними, що не входять до навчального набору, прості обчислення.	Чутливий до зашумлених даних і викидів, має довший час навчання.	90–93
Алгоритм кластеризації KNN	Висока точність, нечутливість до викидів.	Чутливий до несуттєвих ознак, ефективність залежить від вибраної метрики відстані, ресурсозатратний і повільний.	90
Алгоритм кластеризації K-means	Швидка обробка, швидкий відгук, гарні результати кластеризації, здатність відокремлювати об’єкти від фону.	Чутливий до викидів, потребує попереднього задання значення K.	90
Random Forest	Висока точність, стійкість до	Повільна швидкість передбачення, висока	96

Метод сегментації зображень	Переваги	Недоліки	Точність / %
	перенавчання, надійність.	обчислювальна складність і витрати.	

Алгоритм прицілювання

Після того як плід розпізнано, важливим кроком є визначення його розміру та положення на зображенні, а також обчислення його координат у реальному просторі. Цей процес передбачає використання методів стереозору, камер глибини або інших сенсорів для вимірювання відстані до цілі та її просторового положення. Раніше для отримання глибинної інформації про яблука застосовували стереозір, камери RGB-D та лазерні далекоміри .

Основні труднощі під час точної локалізації цільового плоду пов’язані з впливом несприятливих факторів, таких як природний вітер, вібрації машини та зміщення або перекриття плодів у процесі локалізації. Китайські вчені застосували камеру глибини зі структурованим світлом SR300 для збирання коричневих грибів [20]. Поєднуючи кілька вимірювань глибини поверхні ґрунту, цей метод дозволяє адаптивно вибирати порогові значення для створення бінарної карти шапочок грибів. Також вони запропонували метод зіставлення зображень яблук на основі абсолютного значення різниці яскравості пікселів, що дозволило зменшити похибку визначення 3D-координат до менш ніж 10 мм. Однак цей підхід має певні обмеження щодо точності зіставлення через наявність невідповідних точок ознак.

Результати тестування показують, що цей метод ефективно локалізує яблука, що знаходяться в тіні, навіть за різних умов освітлення.

У реальних умовах збирання врожаю перешкоди, такі як природний вітер або зіткнення плодів, можуть викликати коливання, що негативно впливає на точність локалізації. Щоб мінімізувати ці впливи, запропонували вдосконалений метод локалізації для коливних плодів, який зіставляє

передні та задні кадри зображень яблук для швидкого відстеження та розпізнавання. Цей підхід дозволяє регулювати швидкість руху маніпулятора в реальному часі залежно від періоду коливань плоду, що дає змогу здійснювати збирання у моменти стабільності.

Загалом, технологія багатокамерного стереозору ефективно розширює зону сприйняття візуальних систем і підвищує точність локалізації. Однак її продуктивність значно знижується за змінних умов освітлення чи складної текстури об’єктів і є неефективною в умовах низького освітлення. Камери глибини RGB-D забезпечують високу точність вимірювання на близькій відстані та менш чутливі до природного освітлення та текстури плодів. Проте вони мають обмежений діапазон вимірювання, нижчу роздільну здатність і знижену точність при визначенні контурів об'єктів. Лазерні далекоміри забезпечують високу точність, швидкість вимірювання, просту конструкцію та стійкість до перешкод для 3D-позиціонування. Однак вони мають обмеження при великій відстані, коли лазер може втратити фокус, а також можуть бути заблоковані гілками та листям, що заважає досягти цілі.

2.3 Захоплювальний механізм

Захоплювальний механізм (ЗМ) — це інструмент, прикріплений до зап’ястя маніпулятора робота для збирання плодів шляхом захоплення або обхоплення плода чи його плодоніжки (прикріплення), відокремлення його від рослини та зрештою доставки у місце зберігання.

Ці ЗМ виконують окремі дії або одночасно (наприклад, захоплення та відокремлення), або послідовно (захоплення/обхоплення з подальшим відокремленням), щоб успішно здійснити процес збирання. Функція прикріплення передбачає захоплення або обхоплення плода чи його плодоніжки, де захоплення — це дія з 1 ступенем свободи, що виконується за допомогою вакууму або механізму відкриття-закриття, тоді як обхоплення використовує багатоступеневі механізми для адаптації до

форми плода. Коли для захоплення або обхоплення застосовуються пальцеві механізми з твердих матеріалів, поверхня пальців, що контактує з плодом, покривається м’яким шаром, наприклад, з поліуретану, щоб запобігти пошкодженням чи ударам.

Леза є основним засобом для обрізання плодоніжки під час збирання врожаю. Робот може використовувати різні конфігурації та рухи лез, такі як ножиці, паралельний, осцилюючий або обертовий рух для виконання дії обрізання. Крім різального обрізання, відокремлення плода від плодоніжки можна здійснювати також шляхом скручування або виривання. Для дії відокремлення також застосовують термічне обрізання, яке використовує нагрітий дріт для розрізання плодоніжки. Термічне обрізання дозволяє зупинити поширення інфекцій між рослинами і покращує термін зберігання плодів. Деякі механізми були розроблені так, щоб «поглинати» цільовий плід під час відокремлення, що допомагає роботу справлятися з невизначеністю щодо орієнтації плодів під час збирання.

Після завершення операції відокремлення захоплювальний механізм утримує плід, доки його не буде навмисно скинуто або безпечно поміщено у визначене місце. Деякі захоплювальні механізми оснащено пальцевими конструкціями для полегшення приймання плоду після його відокремлення. Наприклад, вчені розробили захоплювальний механізм для робота зі збирання солодкого перцю з м’якою пластиковою накладкою на шестипальцевій металевій конструкції безпосередньо під вузлом ріжучого леза, що приймає плід після його відокремлення. Також запропонували механізм приймання для робота зі збирання яблук, щоб обробляти зібрані плоди. Цей підхід використовує вторинний механізм із 2 ступенями свободи з лійкоподібним захоплювальним механізмом, який переміщається у положення приймання, щоб зловити яблуко в момент, коли основний маніпулятор скидає його. Такий підхід «схопити й прийняти» виявився кращим за традиційні методи «схопити й перемістити», що дозволило зменшити цикл збирання на 50%.

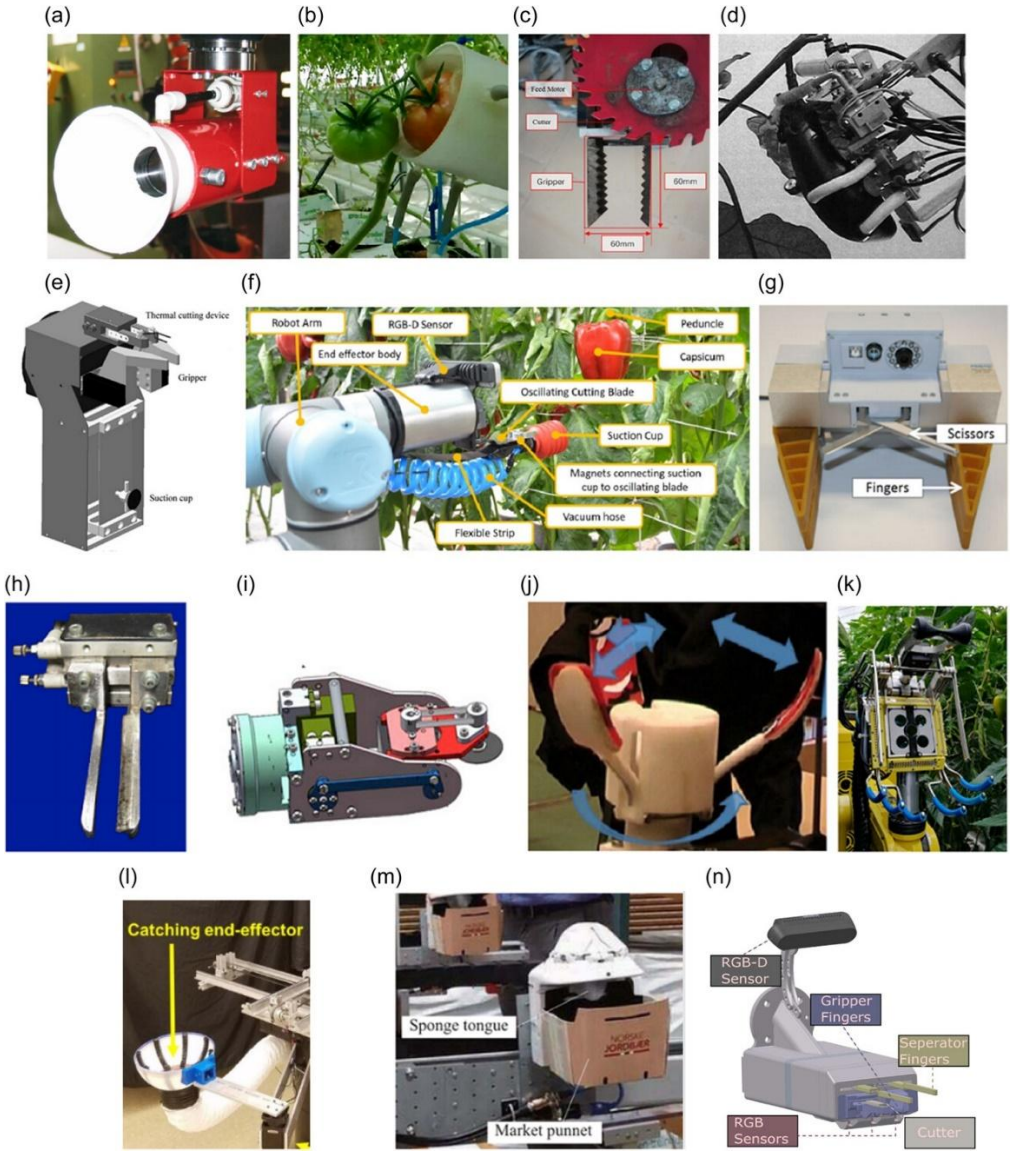


Рисунок 2.3 Технології захоплювальних механізмів і методи транспортування плодів: (a) захоплення вакуумною присоскою, (b) захоплення з використанням повітряної подушки, (c) захоплення механічними пальцями, (d) обхоплення м'якими механічними пальцями, (e) термічне обрізання, (f) обрізання осцилюючим лезом, (g) обрізання ножицеподібною дією леза, (h) обрізання паралельними лезами, (i) обрізання обертовим лезом, (j) відокремлення обертовою дією зап'ястя, (k) пальці для приймання плодів, (l) чашка для приймання плодів з можливістю транспортування плоду через трубку, (m) захоплювальний механізм із функцією зберігання плодів, і (n) захоплювальний механізм Robofruits із 2.5 ступенями свободи для маніпулювання кластерами.

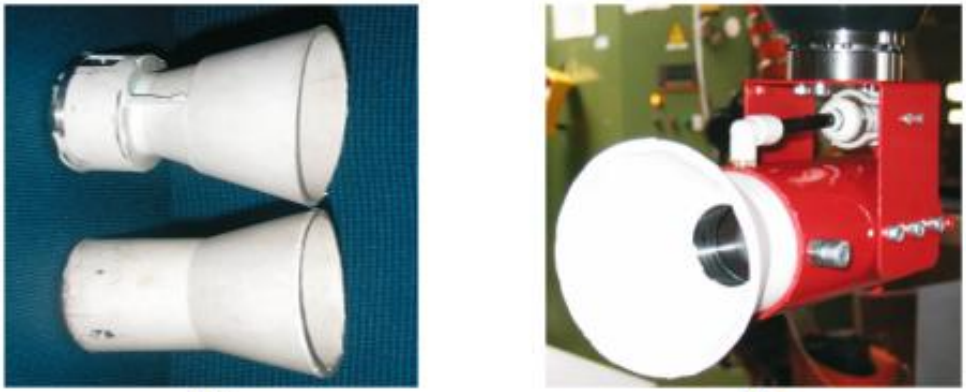
Коли робот збирає врожай, що росте кластерами (наприклад, полуницю), він має маніпулювати кластерами, щоб дістатися до цільового плоду. Захоплювальний механізм Robofruits має механізм із 1 ступенем свободи для відсування полуниць, що перекривають доступ до стиглих плодів для збирання (Рисунок 4n). Інші захоплювальні механізми також були розроблені для маніпуляцій із кластерами. Один механізм використовує пряме штовхання і розсування своїм корпусом, щоб відхилити сусідні/прилеглі плоди навколо цільового плоду. Інший використовує набір повітряних насадок, що подають повітряні струмені для відхилення сусідніх плодів.

Вакуумні механізми

Всмоктувальні чашки, зазвичай виготовлені з м’якої гуми або силікону, розроблені таким чином, щоб адаптуватися до різних форм поверхні, що дозволяє піднімати плоди за допомогою від'ємного тиску, створеного повітряним приводом. Представлено гнучкий кінцевий виконавчий механізм у формі воронки [21], показаний на рисунку 9, який використовує вакуумне всмоктування для збирання яблук діаметром від 6 до 11 см. Цей пристрій забезпечує ефективне безпошкодне збирання яблук.

Також вчені розробили робота для збирання томатів, оснащеного вакуумною чашкою, що від'єднує томати від гілок і плодоніжок за допомогою всмоктування [22], після чого використовується механізм із пальцями-захоплювачами, щоб утримувати плоди та запобігати їх падінню під час процесу збирання. Крім того, ця система оснащена сенсорним механізмом, що дозволяє в реальному часі контролювати відстань від гілок і плодоніжок.

Вакуумний кінцевий виконавчий механізм працює шляхом створення вакууму, що дозволяє фіксувати об'єкти без прямого контакту з їхньою поверхнею, що допомагає мінімізувати фізичні пошкодження крихких чи делікатних предметів. Процеси всмоктування й відпускання таких чашок є типовими для подібних механізмів.



(a) (b)

Рисунок 2.4 Кінцевий виконавчий механізм для збирання яблук із вакуумною чашкою. (а) Всмоктувальна чашка; (б) вакуумний кінцевий виконавчий механізм.

Ріжучі механізми (ножиці)

Ріжучі маніпулятори зазвичай бувають ножицеподібними або монолітними, і керуються електричними, пневматичними або гідравлічними системами, що відповідають за відкривання, закривання та зрізання. Для таких маніпуляторів необхідна система керування, яка точно регулює положення та зусилля зрізу, що робить їх універсальними для різних завдань.

Розробники спроектували кінцевий виконавчий механізм для збирання лічи з єдиним джерелом живлення та інтегрованою системою затискання і зрізання, як показано на рисунку 10. Цей робот має високу затискну здатність і може зрізати гілки діаметром від 3 мм до 7 мм, із середнім часом затискання і зрізання близько 2 секунд.

Загалом, для плодів і овочів із твердими або товстими плодоніжками, такими як виноград, хурма та лічи, ножицевий кінцевий виконавчий механізм є ефективним рішенням, що забезпечує чистий зріз без пошкодження самого плоду. Однак ножицеві механізми мають певні недоліки. Порівняно із захоплювальними кінцевими виконавчими механізмами вони потребують більш високої точності в системах розпізнавання та локалізації робота-збирача. Крім того, у випадку плодів із

короткими плодоніжками ножицеві механізми стикаються з просторовими обмеженнями, що підвищує ризик пошкодження плоду.

2.4 Маніпулятори

Роботизовані маніпулятори є ключовими компонентами систем, які взаємодіють із врожаєм під час збирання. Ці маніпулятори оснащені спеціалізованими захоплювачами або інструментами для вибіркового збирання цільового врожаю. Конфігурації маніпуляторів для вибіркового збирання варіюються, включаючи декартову, сферичну, циліндричну або шарнірну серійну конструкції. Залежно від конкретних вимог до збирання, вони можуть бути виконані у вигляді одного, подвійного або багаторазового маніпулятора.

Завдання вибіркового збирання виконувалися як за допомогою готових до використання маніпуляторів, так і за допомогою спеціально розроблених. Хоча готові маніпулятори забезпечують надійну функціональність, усе більшу увагу приділяють індивідуальним рішенням завдяки їх здатності відповідати конкретним вимогам збору врожаю. Серед готових маніпуляторів широко використовуються маніпулятори з шістьма ступенями свободи (DoF). Ці маніпулятори можуть бути модифіковані шляхом додавання або видалення ступенів свободи, щоб задовольнити вимоги вибіркового збирання.

Багаторукі роботи були розроблені для подолання складності вибіркового збирання. Зокрема, маніпулятори з двома руками використовувалися як для спільної роботи, так і як автономні одиниці.

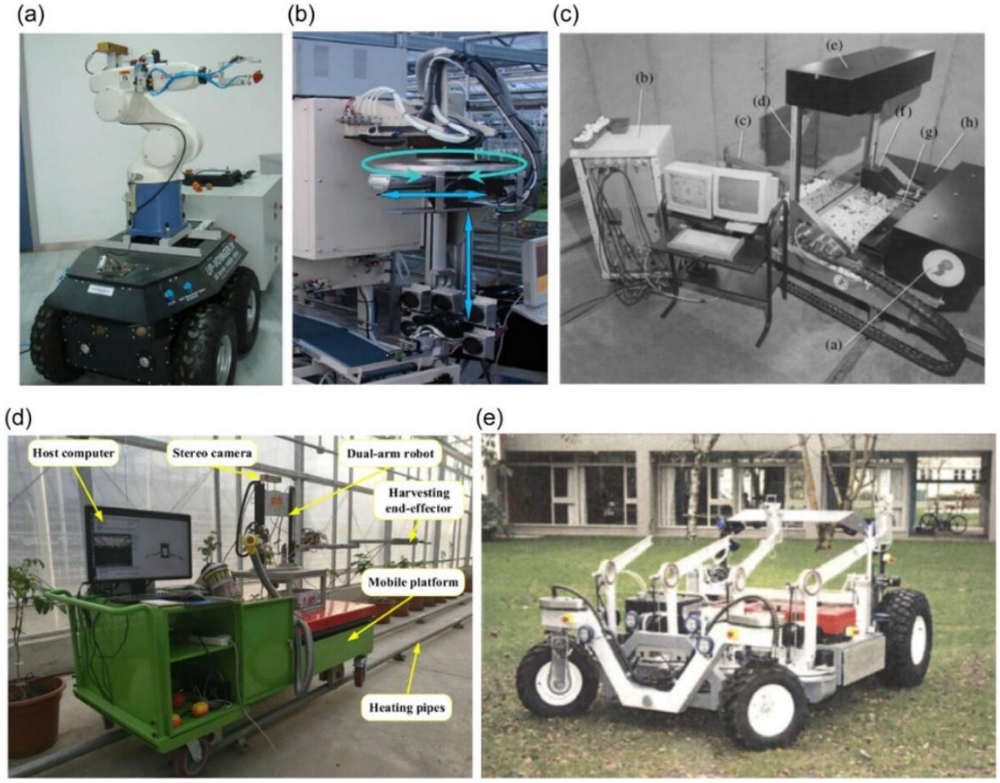


Рисунок 2.5 Конфігурації маніпуляторів: (a) шарнірно-важільний маніпулятор, (b) циліндричний маніпулятор, (c) декартів маніпулятор, (d) дворукий шарнірно-важільний маніпулятор, (e) багаторукий шарнірно-важільний маніпулятор.

Для ефективного збирання врожаю маніпулятор має переміщатися на різні висоти або глибини для окремих плодів. Тому маніпулятори зазвичай встановлюють на мобільну платформу з такими пристроями, як вертикальні напрямні, горизонтальні напрямні, похилі напрямні і механізми з підйомними ножицями, щоб збільшити зону досяжності маніпулятора.

2.5 Мобільна платформа та система збирання (транспортування) плодів

Після відокремлення плодів було запропоновано різні методи їх транспортування. Наприклад, робот поміщає плоди у контейнер на мобільній платформі. У деяких випадках використовується конвеєрна система для переміщення зібраних плодів у зону зберігання з місця скидання, а також для циркуляції порожнього лотка назад на місце скидання

після заповнення поточного лотка. Гнучкі трубки також використовувалися додатково до конвеєрної системи. Така гнучка трубка може бути інтегрованим елементом захоплювального механізму, через яку відокремлений плід безпосередньо потрапляє до камери зберігання. Іноді, завдяки певним маніпуляціям, захоплювальний механізм скидає плоди у визначене місце скидання, звідки плід потрапляє у вхідний отвір трубки. Окрім цих механізмів транспортування, захоплювальні механізми були оснащені ємностями для зберігання як безпосередніми насадками. Захоплювальний механізм, запропонований вченими для робота зі збирання полуниці, має можливість кріплення торгового пакування (пуннета), у яку зібрана полуниця безпосередньо потрапляє.

Роботи для збирання врожаю повинні бути мобільними, щоб дістатися до рослин, що ростуть у різних схемах у середовищі їхнього вирощування. Мобільні платформи для цього завдання використовували різні методи пересування, такі як чотириколісний диференціальний привід, чотириколісний незалежний привід і рульове управління, гусеничний тип або рейкові каретки, що використовують труби обігріву між рядами теплиць. В садках мобільні платформи також можуть включати транспортні засоби з людиною-водієм, такі як трактори, автонавантажувачі та інші універсальні транспортні засоби. Ці мобільні платформи можуть бути як серійними, так і спеціально виготовленими відповідно до конкретних потреб. Однак під час позиціонування мобільної платформи для збирання врожаю змінне динамічне навантаження через маніпуляції може впливати на її стійкість. У зв’язку з цим були розроблені певні стабілізуючі механізми як невід'ємна частина таких мобільних. Серійні мобільні платформи, такі як Thorvald II і Qii-Drive AGV, також використовувалися для цього завдання.

Вчені розробили унікальну систему ковзання, яка переміщує підвішений маніпулятор під грядкою з полуницею для збирання ягід. Для вирощуваних у приміщенні культур, таких як гриби, використовується конфігурація типу "декартова система", де роботизована система охоплює

всю довжину і ширину грядки для збирання врожаю. На відміну від використання мобільного робота, досліджували стаціонарний маніпуляторний модуль, у якому стіл з рослинами рухається рейками перед маніпулятором під час процесу збирання врожаю.

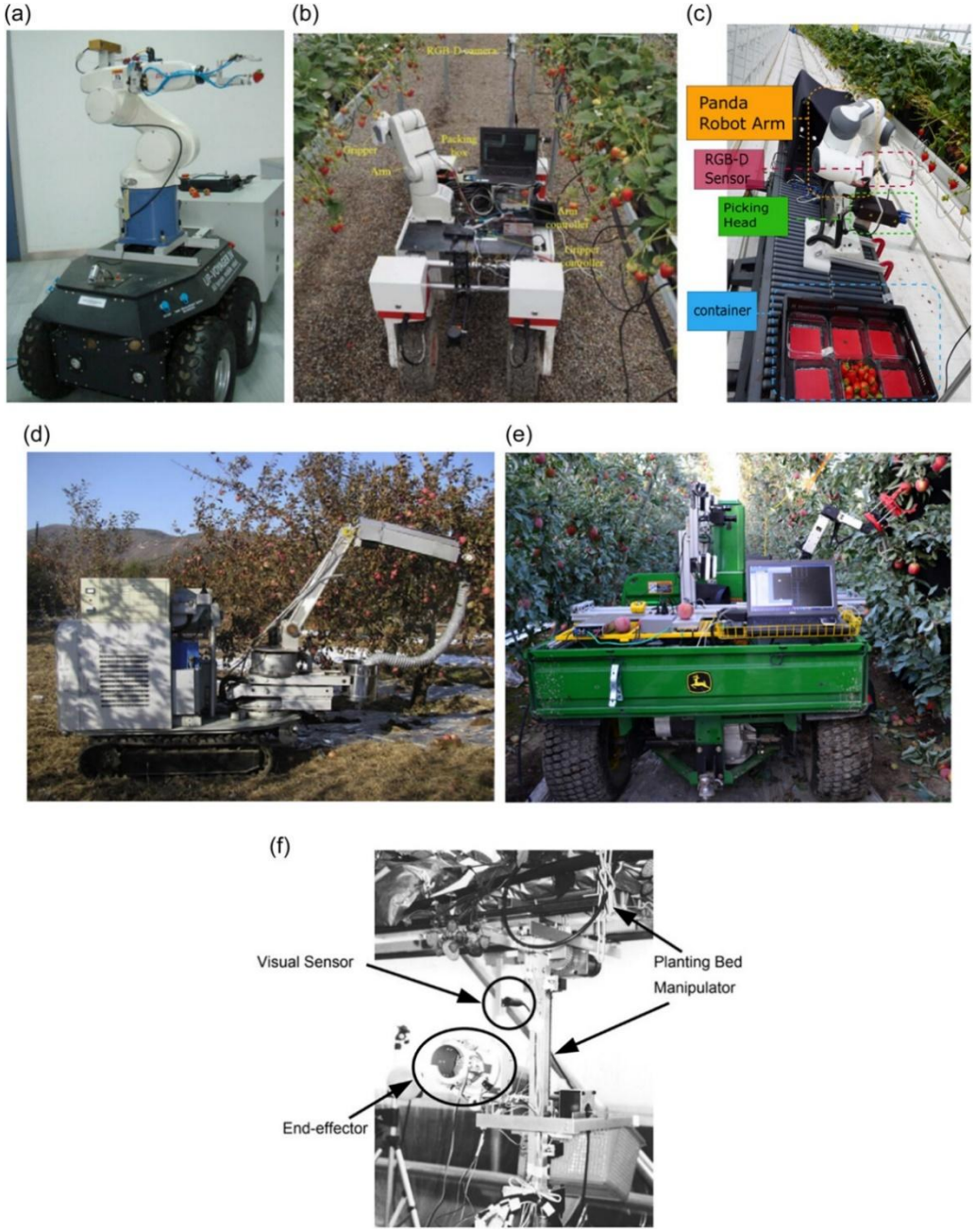


Рисунок 2.6 (a) чотириколісна платформа з диференціальним приводом, (b) чотириколісна платформа з незалежним приводом і рульовим управлінням, (c) рейкова платформа, (d) гусенична платформа, (e) електрична платформа з керуванням людиною, і (f) робот, змонтований на посадковій грядці.

Висновок до розділу 2

У другому розділі було здійснено теоретичне обгрунтування розробки елементів мобільного робота-збирача овочів і фруктів. Проаналізовано основні вимоги до таких роботизованих систем, включаючи точність розпізнавання, делікатність взаємодії з плодами та адаптацію до різних умов сільськогосподарського середовища. Детально розглянуто функціонування системи технічного зору, що є ключовим елементом для виявлення, класифікації та локалізації цільових плодів. Наведено сучасні підходи до обробки зображень, зокрема алгоритми сегментації на основі кольору, форми, текстури та глибини.

Описано типи захоплювальних механізмів, їхню класифікацію, особливості конструкції та принципи роботи. Розглянуто маніпуляторні системи та мобільні платформи, що забезпечують маневреність і точне позиціонування робота в аграрному середовищі. Також було висвітлено різні методи транспортування плодів після їх відокремлення.

Отже, результати цього розділу стали базою для формування технічного завдання на розробку робота-збирача та визначення конструктивних і функціональних особливостей його основних модулів, які будуть розглядатися у наступному розділі.

РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА МОДЕЛІ РОБОТА-ЗБИРАЧА

3.1. Постановка завдання та функціональні вимоги

У межах цієї бакалаврської кваліфікаційної роботи ставиться завдання теоретичного проєктування автономного робота для збирання овочевих та фруктових культур у тепличних умовах. Робот має функціонувати на основі сенсорної інформації, виявляти стиглі плоди, під'їжджати до них, обережно зрізати та транспортувати до контейнера для зберігання.

Основними функціональними задачами, які повинен виконувати робот, є:

- самостійне переміщення в межах рядів теплиці;
- виявлення стиглих плодів за допомогою комп'ютерного зору;
- навігація до місця розташування плоду;
- точне позиціонування маніпулятора;
- захоплення та відокремлення плоду (зрізання плодоніжки);
- транспортування зібраного врожаю до внутрішнього контейнера.

Враховуючи тип культури, передбачено, що робот працюватиме в теплиці зі сталими умовами освітлення та рівними рядами посадки. Таке середовище є сприятливим для розміщення навігаційних міток або використання структурованої карти теплиці.

Висота кущів, до прикладу, томатів і перцю зазвичай не перевищує 1,2–1,5 метра, тому загальні габарити робота мають бути компактними, з максимальною висотою до 1,5 м. Це забезпечує його стійкість, зручність пересування між рядами, а також спрощує конструкцію маніпулятора.

Передбачено, що робот пересуватиметься за допомогою чотириколісної мобільної платформи, яка забезпечує стабільність руху по рівній тепличній поверхні. Збір плодів відбуватиметься за допомогою маніпулятора з кінцевим ефектором ножицеподібного або комбінованого типу (захоплення + зрізання), здатного працювати з плодами середнього розміру.

3.2 Вибір основних компонентів

Мобільна платформа

Для пересування розробленого робота передбачено використання мобільного шасі з чотирма механум-колесами, яке забезпечує всюдихідність і високий рівень маневреності в обмежених просторах, таких як ряди теплиці.

Тип шасі:

- Платформенна рама з прямокутним несучим профілем;
- Основа обладнана кріпленнями для встановлення акумулятора, маніпулятора, контейнера для плодів та інших модулів;
- Виготовлена, як правило, з алюмінієвого сплаву або сталі для забезпечення жорсткості при збереженні помірної ваги.

Привід:

- Кожне колесо обладнане окремим електроприводом (мотор-редуктором);
- Рух здійснюється за схемою 4WD (4 wheel drive);
- Завдяки особливій геометрії роликів механум-колеса дозволяють рух у будь-якому напрямку (омнінавігація) — вперед, назад, вбік та по діагоналі без повороту корпусу.

Стабілізація:

- За рахунок низького центру мас платформа зберігає стійкість навіть при русі по нерівностях теплиці;
- Кожне колесо має окрему підвіску або демпфер, що дозволяє компенсувати вібрації;
- Можливе встановлення IMU-модуля (інерційного вимірювача) для корекції траєкторії руху та автоматичного вирівнювання при похиленні.

Переваги для агробота:

- Підвищена маневреність у вузьких міжряддях;
- Просте керування (може реалізовуватись через Arduino або Jetson);
- Легка інтеграція з сенсорними модулями (LiDAR, камера).

Камера

Зважаючи на вимоги до точності позиціонування, роботу в умовах змінного освітлення теплиці, а також необхідність одночасного виявлення кольору та глибини, для реалізації системи зору у межах даного проєкту обрано **RGB-D камеру Intel RealSense D435**.

Основні характеристики Intel RealSense D435:

- Тип: стереокамера з активною ІЧ-підсвіткою
- Роздільна здатність зображення: до 1920×1080 (кольорове), до 1280×720 (глибина)
- Частота кадрів: до 90 FPS
- Дальність визначення глибини: 0.2–10 м
- Інтерфейс: USB 3.0
- Підтримка: OpenCV, ROS, Python, C++, SLAM

Камера Intel RealSense D435 використовується як головний сенсор для виявлення стиглих плодів за допомогою алгоритмів комп’ютерного зору, які базуються на колірних ознаках (HSV-маски, сегментація), а також для визначення просторового положення плоду з метою точного підведення маніпулятора до зони зрізу.

Система електроживлення

Надійна система електроживлення є критично важливою складовою конструкції мобільного робота-збирача овочів і фруктів, оскільки всі основні модулі — приводи, сенсори, контролери, камера та виконавчі механізми — потребують стабільного джерела енергії. В умовах автономної роботи у теплиці джерелом енергії є вбудована акумуляторна батарея, яка повинна забезпечувати необхідну потужність протягом усього робочого циклу.

Основні елементи системи живлення:

- **Акумуляторна батарея** (джерело постійного струму)
- **DC-DC перетворювачі** (для стабілізації напруги для різних компонентів)
- **Захист від перенапруги, розряду та перегріву**
- **Контролер живлення (Battery Management System, BMS)**

Вибір типу акумулятора:

Для проєкту обрано **літій-полімерний (Li-Po) акумулятор**, що має низку переваг:

- Висока енергомісткість при малій вазі
- Стабільна напруга протягом більшої частини розряду
- Швидке заряджання
- Підтримка високих струмів розряду

Загальне споживання робота орієнтовно становить 50–75 Вт, що дозволяє оцінити необхідну ємність акумулятора для 1–2 годин безперервної роботи. Наприклад, акумулятор 14.8 В, 10 000 мА·год (~148 Вт·год) забезпечить близько 2 годин роботи за середнього навантаження.

Плата керування та обчислювальна система

Центральним елементом керування всіма компонентами робота є вбудована обчислювальна система, яка виконує функції збору та обробки даних із сенсорів, керування приводами, реалізації алгоритмів комп'ютерного зору, навігації та ухвалення рішень у реальному часі. У межах розробки теоретичної моделі робота для збирання овочів і фруктів розглянуто **двоетапну архітектуру керування**, яка складається з:

- **Низькорівневої плати керування виконавчими механізмами**
- **Високорівневої обчислювальної платформи для візуального аналізу та логіки**

1) Низькорівнева керуюча плата: Arduino Mega 2560

Arduino Mega використовується для:

- Керування сервоприводами маніпулятора
- Зчитування сигналів з базових сенсорів (ультразвукові, лінійні, інфрачервоні)
- Формування PWM-сигналів
- Прийому команд з основної обчислювальної системи через UART або I^2C

2) Обчислювальна платформа високого рівня: NVIDIA Jetson Nano

Jetson Nano виконує обробку:

- Відеопотоку з камери Intel RealSense D435
- Алгоритмів комп'ютерного зору (виявлення плодів, визначення координат)
- Високорівневої логіки навігації, ухвалення рішень
- Комунікації з Arduino, Wi-Fi або Bluetooth-модулями

Взаємодія між модулями:

- Jetson Nano виконує розпізнавання плоду, розрахунок координат і надсилає Arduino команду на рух маніпулятора.
- Arduino реалізує керування моторами згідно з отриманими координатами.

3.3 3D-моделювання конструкції в програмному середовищі Autodesk Fusion 360

Для візуалізації та теоретичної перевірки конструкції робота для збирання овочів і фруктів було створено 3D-моделі у середовищі Autodesk Fusion 360 (креслення знаходиться у Додатку А). Дана модель відображає загальну структуру пристрою, його складові частини та взаємне розташування модулів. Моделювання дозволяє не лише наочно представити проєкт, але й провести розрахунок основних фізичних параметрів: маси, об’єму, центру мас тощо.

Основні етапи моделювання:

1. **Створення основи платформи**
   - Прямокутне шасі з монтажними отворами;
   - Чотири кріплення під механум-колеса;
   - Вибраний матеріал: **Aluminum 6061**.
2. **Моделювання маніпулятора**
   - Плече, передпліччя, зап’ястя з шарнірами;
   - Встановлення місця для сервоприводів;
   - Враховано робочий радіус до ~80 см;
   - Матеріал: **ABS Plastic** (для зменшення ваги).
3. **Захоплювальний механізм**
   - Двопальцева структура з заглибленням під плід;
   - Передбачено місце для серво або вакуумної системи;
   - Матеріал пальців — **гума або м’який поліуретан** (*Generic Rubber*).
4. **Кріплення камери**
   - Створено тримач під RealSense D435;
   - Камера розташована над маніпулятором для отримання зображення згори.
5. **Контейнер для плодів**
   - Розміщений у задній частині корпусу;
   - Об’єм контейнера — приблизно 5–7 л;
   - Доступний ззаду для вивантаження.

Аналіз параметрів моделі:

Після призначення фізичних матеріалів основним частинам конструкції, Fusion 360 автоматично виконав розрахунок загальної маси, об'єму, центру ваги та моментів інерції. Орієнтовно:

- **Маса моделі**: ~7.2 кг
- **Центр мас**: зміщений до платформи (стабільність під час руху)
- **Габарити**: ~60×50×150 см (висота з маніпулятором)
- **Матеріали**: Aluminum 6061, ABS Plastic, Generic Rubber

Скріншоти:

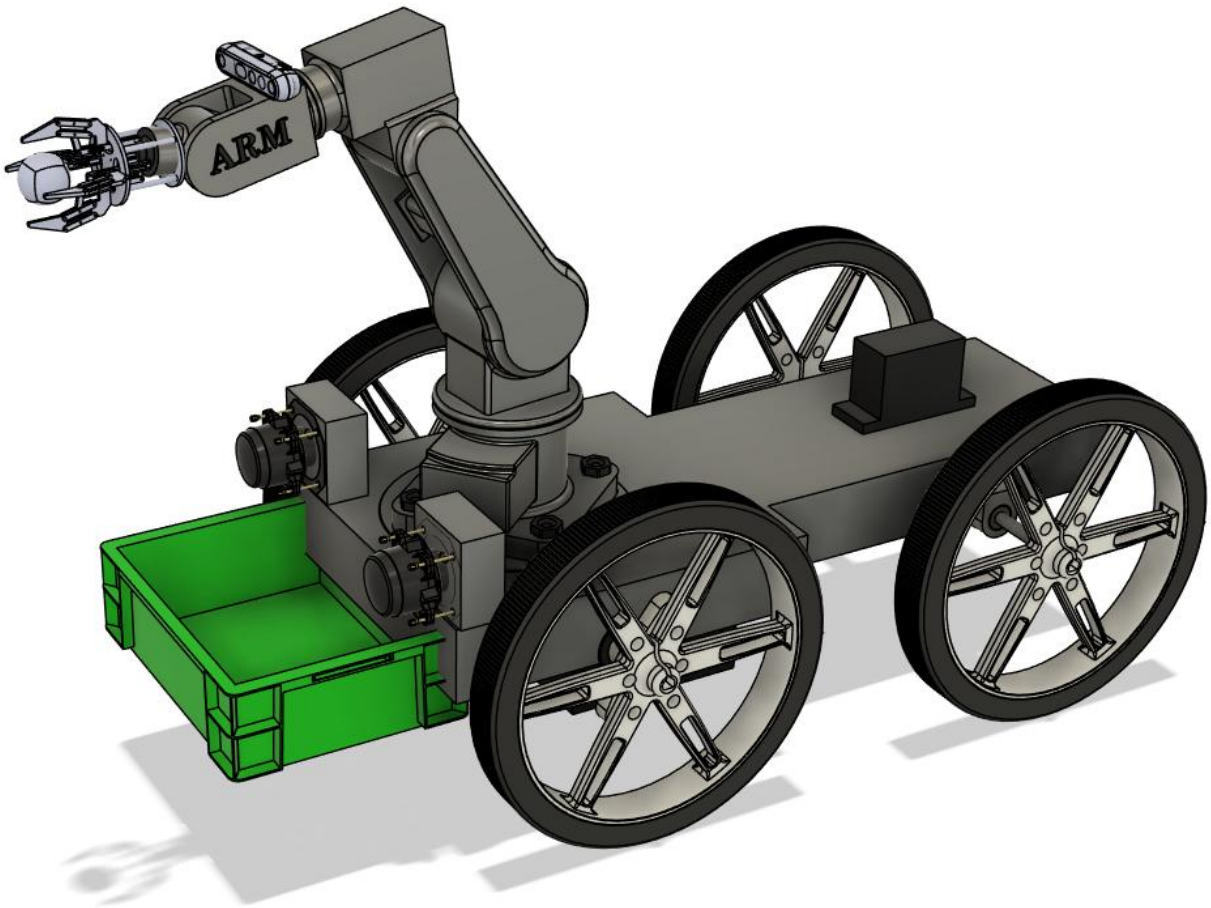


Рисунок 3.1 Модель робота-збирача в Autodesk Fusion 360 (вигляд спереду)

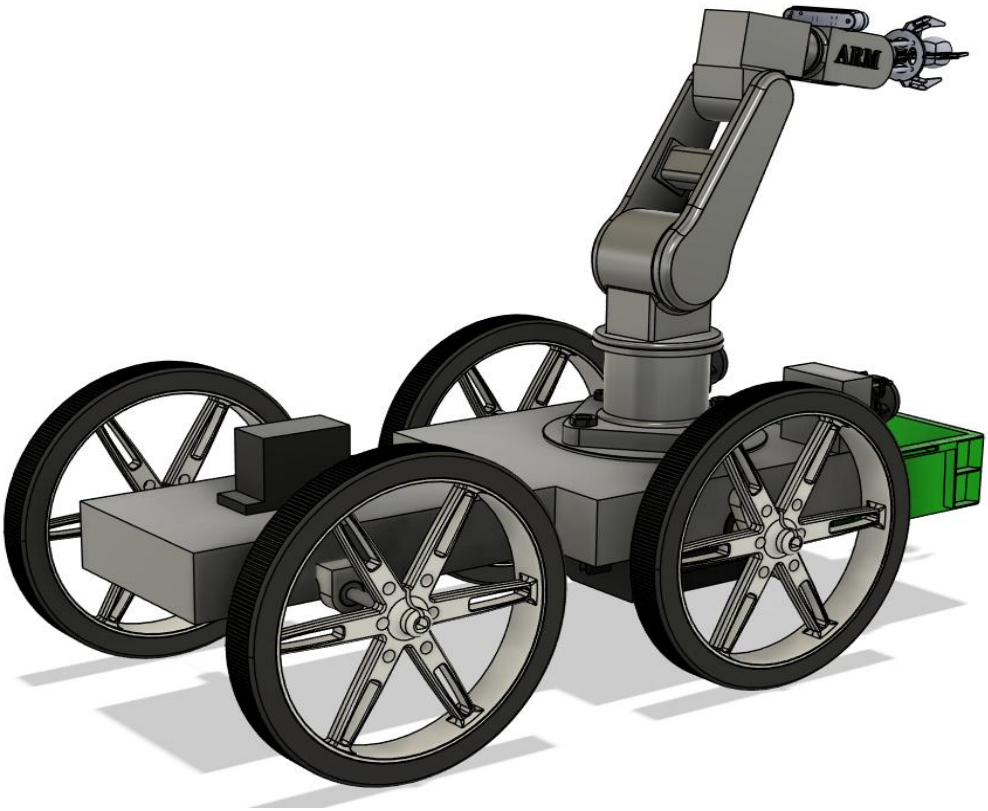


Рисунок 3.2 Модель робота-збирача в Autodesk Fusion 360 (вигляд ззаду)

На основі створеної в середовищі **Autodesk Fusion 360** 3D-моделі було проведено попередній розрахунок масогабаритних характеристик робота-збирача, що дозволяє оцінити доцільність запропонованої конструкції в контексті її мобільності, стійкості та енергоефективності.

Таблиця 3.1

Оцінка масогабаритних параметрів

Параметр	**Значення**
Загальна маса	~7.2 кг
Висота конструкції	~1.45 м
Довжина шасі	~0.60 м
Ширина шасі	~0.50 м
Максимальний винос маніпулятора	~0.8 м
Матеріали конструкції	Алюміній 6061, ABS, гума
Кількість ступенів свободи маніпулятора	4

Центр мас:

Розрахунки у Fusion 360 показали, що центр мас знаходиться ближче до основи платформи, що забезпечує стійкість конструкції при русі і мінімізує ймовірність перекидання під час роботи маніпулятора. Це особливо важливо у тепличних умовах з обмеженим простором і нерівною поверхнею.

Габарити:

Габарити робота були обрані таким чином, щоб забезпечити вільне пересування між рядами в теплиці. З урахуванням висоти до 1.5 м, робот зможе обробляти як низькорослі сорти томатів і перцю, так і середньорослі рослини без необхідності піднімати маніпулятор на велику висоту.

Отримані масогабаритні характеристики свідчать про відповідність конструкції поставленим завданням. Загальна маса менше 10 кг дозволяє забезпечити хорошу маневровість та економічне споживання енергії. Компактність платформи дозволяє працювати в обмежених умовах теплиці без ризику пошкодження рослин.

Розрахунок енергоспоживання та автономної роботи

Однією з важливих технічних характеристик мобільного робота є його енергоефективність та тривалість автономної роботи без підзарядки. На основі обраних компонентів було виконано попередню оцінку споживання енергії та тривалості роботи від акумуляторної батареї.

Таблиця 3.2

Основні споживачі енергії

Компонент	**Напруга, В**	**Струм, А (середній)**	**Потужність, Вт**
Мобільна платформа (4 мотори)	12	2.5	30
Маніпулятор (4–5 сервоприводів)	5–6	2.0	10
Камера RealSense D435	5	0.6	3
Плата керування (Arduino)	5	0.1	0.5
Обчислювальна плата (Jetson Nano)	5	2.0	10

Компонент	Напруга, В	Струм, А (середній)	Потужність, Вт
Додаткові сенсори (ультразвук, ІЧ тощо)	5	0.2	1
Сумарно:	—	—	**~54.5 Вт**

Обрана батарея:

- **Тип**: Li-Po
- **Напруга**: 14.8 В (4S)
- **Ємність**: 10 000 мА·год
- **Загальна енергія**:

  E=14.8 В×10 А·год=148 Вт·годE = 14.8\,В × 10\,А·год = 148\,Вт·годE=14.8В×10А·год=148Вт·год

Оцінка тривалості роботи:

Тривалість автономної роботи оцінюється за формулою:

$$T = \frac{E}{P} = \frac{148}{54.5} \approx 2.7\,\text{год}$$

З урахуванням можливих пікових навантажень та коефіцієнта резерву **(0.8)**, реальна автономність складе:

$$T_{\text{реальне}} \approx 2.1\,\text{год}$$

Обрана конфігурація дозволяє роботу працювати безперервно **понад 2 години**, що є достатнім для типового робочого сеансу в тепличному середовищі. При потребі тривалішої роботи можуть застосовуватись змінні батареї або швидке підзаряджання. Сумарне споживання енергії свідчить про достатню енергоефективність системи навіть із потужним обчислювальним модулем.

Таблиця 3.1

Порівняння технічних характеристик аналогів роботів-збирачів

№	Назва робота	Призначення	Тип переміщення	Тип маніпулятора	Метод збирання	Система виявлення плодів	Швидкість збору (шт/хв)	Особливості
1	**Sweeper**	Перець (теплиці)	Колісна база	1 DOF	Ніж + захоплення	RGB + глибина	1.0–1.5	Повільний, високоточний
2	**Agrobot E-Series**	Полуниця	Гусенична база	12 маніпуляторів	Захоплення + зріз	Мультиспектр + AI	~2.5 кожен	Працює з одночасною дією
3	**FFRobotics**	Яблука	Колісна база	3 багатозахватні	Механічне відривання	Камери + алгоритми	10–12	Масовий збір, класифікація плодів
4	**Advanced Farm**	Яблука (сад)	Колісна платформа	2 маніпулятори	Вакуумний відбір	RGB-D + AI	6–8	Оптимізовано під дерева
5	**<u>Робот-збирач</u>**	Перець, помідор, полуниця і тд.	Колісна база (4WD)	1 маніпулятор	Захоплення + зріз	Камера RealSense / ZED	~3	Низька вага, модульна конструкція

Висновок до розділу 3

У третьому розділі було здійснено практичну реалізацію концепції мобільного робота для автоматизованого збирання овочів і фруктів у тепличних умовах. Визначено функціональні вимоги до конструкції, враховуючи особливості сільськогосподарських культур, середовища експлуатації, а також обмеження щодо габаритів і мобільності.

На основі аналізу було підібрано оптимальні апаратні компоненти для реалізації проєкту, серед яких: мобільна колісна платформа, маніпулятор з захоплювальним механізмом, система комп’ютерного зору, контролер для обробки сенсорних даних і прийняття рішень. Обґрунтовано вибір камери з

глибинним зором для точного виявлення стиглих плодів, а також мікроконтролера типу Raspberry Pi як обчислювального ядра системи.

Представлено 3D-модель конструкції робота, розроблену в середовищі Autodesk Fusion 360. Моделювання дозволило отримати детальне уявлення про геометрію складових, перевірити взаємне розміщення елементів і розрахувати основні параметри моделі — такі як маса, центр ваги та площа опори. Було виконано віртуальне збирання всіх компонентів конструкції в єдину систему, що дозволяє у подальшому перейти до прототипування або використання моделі для симуляцій.

Загалом, результати цього етапу роботи підтверджують технічну здійсненність запропонованої концепції та закладають основу для подальших досліджень, зокрема моделювання руху, оптимізації маршруту та тестування системи в умовах, наближених до реальних.

РОЗДІЛ 4. ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ПРОЕКТНИХ РІШЕНЬ

Загальні положення

Завершальним етапом навчання за освітньо-професійною програмою підготовки бакалавра є написання бакалаврської кваліфікаційної роботи . В економічній частині бакалаврської кваліфікаційної роботи студенту необхідно відобразити доцільність проектного рішення через відповідні економічні розрахунки. Будь-яке рішення призводить до зміни величини витрат, а звідси й економічного результату. Отже, завданням економічної частини БКР є техніко-економічне обґрунтування проектного рішення. Доцільність та можливість використання запропонованої методики для обґрунтування проектних рішень визначає викладач.

Оформлення економічної частини повинно відповідати загальним вимогам до оформлення БКР.

Методичні рекомендації призначені для виконання економічної частини БКР конструкторського напрямку, в яких розробляються нові вироби, конструкції, їхні елементи.

Метою проведення відповідних розрахунків в економічний частині є визначення конкурентоспроможності виробу (технології) і прибутковості його виготовлення.

4.1 Економічна характеристика проектного виробу

У цій частині розкривається мета бакалаврської кваліфікаційної роботи, кінцевий результат і сфери застосування проектного рішення. Оцінюється рівень ринкової та технічної новизни, економічний, організаційний та соціальний ефект від виробництва (модернізації) нового виробу.

Визначаються потенційні споживачі, конкуренти (їх сильні та слабкі сторони), аналізуються очікувані ринки збуту, імовірний попит, маркетингова політика тощо. Також дається повна характеристики пристрою що проектується.

4.2 Визначення комплексного показника якості

Комплексний показник якості ($П_я$) визначається шляхом порівняння показників якості проектованого виробу і вибраного аналогу.

За аналог обирається виріб, що відповідає проектному рішенню (проектованій конструкції) за сферою застовування та функціональному призначенню і є широко представлений на обраному ринку.

Кожен студент повинен обгрунтувати вибір аналога, його описати, обгрнутувати переваги та недоліки аналога, вказати його вартість та виробника. Завершується цей аспект вибору висновками про необхідність заміни аналога.

При цьому слід визначити та представити джерело поданої інформації.

Для визначення $П_я$ використовується система показників технічного рівня і якості, яка містить в собі наступні групи, причому в кожній групі вказана в дужках мінімальна кількість показників:

1. показники призначення (3-4);
2. показники надійності (2-3);
3. показники безпеки (1-2);
4. показники стандартизації і уніфікації (1-2);
5. ергономічні показники (1-2) тощо.

Комплексний показник якості проектованої системи визначаємо методом арифметичного середньозваженого з формули:

$$П_Я = \sum_{i=1}^{m} Ci \times q_i \qquad (4.1)$$

де m - кількість одиничних показників (параметрів), прийнятих для оцінки якості проектованої системи;

q_i - коефіцієнт вагомості кожного з параметрів щодо їхнього впливу на технічний рівень та якість проектованої системи (встановлюється експертним шляхом), причому:

$$\sum_{i=1}^{m} q_i = 1{,}0 \qquad (4.2)$$

C_i - часткові показники якості, визначені порівнянням числових значень одиничних показників проектованої системи і аналога за формулами:

$$C_i = \frac{П_{прi}}{П_{аi}} \text{ або } C_i = \frac{П_{аi}}{П_{прi}} \quad (4.3)$$

де $П_{прi}$, $П_{аi}$ - кількісні значення і-го одиничного показника якості відповідно проектованої системи і аналога.

Розрахунок *Пя* проводимо за вище наведеними формулами в табличній формі.

У нашому прикладі розглянемо розрахунок *Пя* в табл. 4.1.

Комплексний показник якості визначаємо за допомогою табл. 4.1.

Таблиця 4.1

Розрахунок комплексного показника якості проектованої камери

№	Показник	Аналог Паі	Проектний виріб, Ппрі	Відносний показник якості, Сі	Коеф. Ваго-мості, qі	Зважений параметри індекс якості Сі·qі
1.1	Споживча потужність, Вт	30	54	0.56	0.23	0.1288
1.2	Завадостійкість, дБ	50	60	1.20	0.115	0.138
1.3	Діапазон виявлення, м	0–150	0–200	1.33	0.12	0.16
1.4	Маса конструкції, кг	7.5	7.2	1.04	0.1	0.104
1.5	Похибка діапазону, %	2.5	2.2	1.13	0.2	0.226
2.1	Імовірність відмов	0.003	0.0025	1.2	0.035	0.042
2.2	Напрацювання на відмову, рік	7	8	1.14	0.03	0.0342
3.1	Зручність використання	3.7	4.5	1.22	0.033	0.04026
3.2	Цілісність конструкції	4.5	4.7	1.04	0.01	0.0104
3.3	Товарний вигляд	4.9	4.6	0.94	0.012	0.01128
4.1	Коефіцієнт застосовності	86	92	1.07	0.015	0.01605

№	Показник	Аналог Паі	Проектний виріб, Ппрі	Відносний показник якості, Сі	Коеф. Ваго-мості, qi	Зважений параметри індекс якості Сі·qi
4.2	Коефіцієнт повторюваності	1.8	1.8	1.00	0.01	0.01
5.1	Безпека експлуатації камери	1	1	1.00	0.1	0.1

Сума коефіцієнтів $\sum q_i = 1.0$

Отже, згідно з формулою (4.1), комплексний показник якості рівний

Сума $C_i \cdot q_i$ (комплексний показник якості):

$$P_k = \sum_{i=1}^{n} C_i \cdot q_i \approx \boxed{1.18099}$$

Це свідчить про вищу якість розробленої конструкції у порівнянні з аналогами, що пояснюється покращеними ергономічними, технічними та експлуатаційними характеристиками.

4.3 Розрахунок лімітної ціни нового виробу

На стадії розробки техніко-економічного обґрунтування і видачі технічного завдання на проектування (коли закладаються основні параметри продукції, які визначають рівень її якості) і призначені для контролю якості проектування, встановлюється лімітна ціна проектного виробу. За допомогою лімітних цін проектувальникам нової техніки виставляються визначені економічні вимоги, які стають на заваді розробки і виготовленню малоефективних видів продукції, що примушує шукати економічні і технічні цілеспрямовані варіанти конструкцій і їхніх елементів. Таким чином, лімітна ціна є одним з критеріїв при оцінці ефективності проектних рішень, які дозволяють застерегти розробку і виготовлення неефективної продукції.

Лімітна ціна - це максимальна оптова ціна розробленого приладу, яка з одного боку, відповідає визначеним техніко-економічним параметрам

проектованого приладу і відображає покращення його споживчих факторів у порівняні з аналогом, а з іншого – зацікавлює користувача цього приладу в його використанні. Однією з умов економічної ефективності розробленого виробу є співвідношення:

$$Цр<Цл \quad (4.4)$$

де *Цр* - розрахункова оптова ціна розробленого виробу;грн.;

Цл - лімітна ціна спроектованого виробу, грн..

Лімітна ціна розробленого приладу визначається за формулою

$$Цл=Сп\ мах + Пн \quad , \quad (4.5)$$

де *Сп мах* - максимальний розмір повної собівартості розробленого виробу, грн.;

Пн - нормативний прибуток (до **40% повної собівартості, величина узгоджується з викладачем).**

Максимальний розмір повної собівартості розробленого виробу визначається за формулою:

$$Сп\ мах=0,85 * Спа * Пя, \quad (4.6)$$

де 0,85 - прийнятий на рівні нормативу коефіцієнт відносного здешевлення нової продукції;

Спа - повна собівартість аналогу, грн.;

Пя - комплексний показник якості розробленого приладу.

Вихідні дані:

- **Повна собівартість аналога** Спа=75 000
- **Комплексний показник якості робота-збирача** Пк=1,181
- **Комплексний показник якості аналога** Па=1
- **Норматив рентабельності**: 40%

Розрахунок максимальної повної собівартості нового виробу:

$$C_{\text{п}\,max} = 0{,}85 \cdot C_{\text{па}} \cdot \frac{\Pi_{\text{к}}}{\Pi_{\text{а}}} = 0{,}85 \cdot 75000 \cdot \frac{1{,}181}{1{,}0}$$

$$C_{\text{п}\,max} = 0{,}85 \cdot 75000 \cdot 1{,}181 = 75138{,}75\,\text{грн}$$

Розрахунок нормативного прибутку:

$$\Pi_{\text{н}} = 0{,}4 \cdot C_{\text{п}\,max} = 0{,}4 \cdot 75138{,}75 = 30055{,}5\,\text{грн}$$

Розрахунок лімітної ціни нового виробу:

$$\text{Ц}_{\text{л}} = C_{\text{п}\,max} + \Pi_{\text{н}} = 75138{,}75 + 30055{,}5 = \boxed{105194{,}25\,\text{грн}}$$

Лімітна оптова ціна нового виробу становить **105 194,25 грн**, що є економічно доцільною у порівнянні з вартістю аналога при покращених якісних характеристиках.

4.4 Визначення показників економічної ефективності проектних рішень

Умови економічної ефективності

Критерієм економічної ефективності нових пристроїв є економія суспільної праці. Це положення використовується у формулі для визначення сумарного економічного ефекту від впровадження приладу та ін.

$$E = Ев + Ee, \tag{4.7}$$

де Ев - економічний ефект в умовах виробництва, тис.грн.;

Ee - економічний ефект в умовах експлуатації протягом нового терміну служби камери, тис. грн.

Економічний ефект, отриманий у процесі виробництва , оцінюють шляхом порівняння оптових цін аналога і спроектованого пристрою (собівартість спроектованого пристрою визначають виходячи з розрахунку собівартості виготовлення).

З метою оцінки економічної ефективності в умовах експлуатації порівнюють експлуатаційні витрати аналога і спроектованого пристрою в

конкретних умовах його експлуатації.

Загальну умову економічної ефективності нового приладу можна виразити нерівністю:

$$E>0$$

Оскільки показник Е являє собою алгебраїчну суму двох величин, між ними можливі такі варіанти співвідношень:

1. Ев>0; Ее>0; тоді Е>0 найбільш прийнятний варіант, але практично досить рідкісний.

2. Ев<0; Ее>0, причому |Ее|>|Ев|, тоді Е>0 - найбільш ймовірний варіант, тому що пристрій з кращими параметрами, як правило, коштує дорожче.

Другою необхідною умовою є:

$$t_{ок} < t_{ок\ н}$$

Де tок - термін окупності додаткових капітальних витрат (визначається різницею витрат на виробництво аналога і проектного виробу і відшкодовується з економії, одержаної в умовах експлуатації), років;

$$t_{ок} = |Е_в| / Е_{е.р} \qquad (4.8)$$

tок.н - нормативний термін окупності, встановлений для тої галузі, де буде використовуватись новий виріб, років;

Ее.р - річний економічний ефект в умовах експлуатації, тис.грн.

3. Ев>0; Ее<0, причому |Ее|>|Ев|, тоді Е>0. Формально цей варіант є ефективним, але по суті означає погіршення експлуатаційних характеристик приладу в результаті скорочення (економії) виробничих витрат, тому цей випадок - неефективний.

3.1. Ев>0; Ее=0, тоді Е>0. Це співвідношення, як частковий випадок варіанту 3 слід розглядати як прийнятний, оскільки він означає зниження собівартості проектованого пристрою без зміни рівня його якості у порівнянні з аналоговим (тобто завдання на проектування є запровадження виробництво пристрою замість більш дорогої закупівлі).

4. Співвідношення Ев і Ее, що призводить до результату Е<0, вважається за неефективне (виняток можуть скласти прилади-засоби пізнання і прилади-

засоби праці, що забезпечують безпеку роботи і покращення умов праці).

Економічний ефект в умовах виробництва визначається з виразу:

$$Ев = Ц1 - Ц2, \quad (4.9)$$

де *Ц1, Ц2* – оптова ціна відповідно аналога і спроектованого приладу, грн.

$$Ц2 = СП2(1+ РР2 / 100), \quad (4.10)$$

де *СП2*- повна собівартість спроектованого приладу, грн.

РР2- рентабельність нового приладу по відношенню до собівартості, % (може бути прийнята у межах 30%).

Визначення собівартості і ціни спроектованого пристрою

Визначення виробничої собівартості спроектованого приладу здійснюється за питомою вагою у ньому окремих елементів витрат. Питома вага елементів витрат встановлюється за даними структури собівартості приладу - аналога.

$$Свир2 = Ум*М2/100, \quad (4.11)$$

де *Свир2* - виробнича собівартість спроектованого приладу, розрахована методом питомих ваг, грн.;

Ум - питома вага вартості основних матеріалів і комплектуючих виробів у виробничій собівартості аналога (65%);

М2 - вартість основних матеріалів і комплектуючих виробів спроектованого приладу, грн..

Таблиця 4.2

Приблизна артість комплектуючих для робота-збирача

Найменування	**Орієнтовна вартість, грн**
Платформа з мотор-колесами	5000
Маніпулятор з кінцевим ефектором	3000
Камера RealSense / ZED mini тощо	4500
Контролер Raspberry Pi / Jetson Nano	2500
Акумуляторна батарея	1200
Датчики (ультразвук, гіроскоп)	800
Кабелі, корпус, монтажні елементи	1000
Разом	**18 000 грн**

$$C_{\text{вир2}} = 65\% \cdot 18000/100 = 0{,}65 \cdot 18000 = \boxed{11700 \text{ грн}}$$

Виробнича собівартість спроєктованого робота, розрахована за методом питомих ваг, становить **11 700 грн**.

Повна собівартість спроектованого приладу, необхідна для розрахунку економічного ефекту в умовах виробництва, визначається із співвідношення:

$$Сп2 = Свир.у\ (1 + О / 100), \qquad (4.12)$$

де *Свир.у* – виробнича собівартість спроектованого приладу, визначена за одним з способів (наприклад, методом питомих ваг), грн.;

О – позавиробничі витрати підприємства, де буде виготовлятися спроектований прилад, (5%).

$$C_{\text{п2}} = C_{\text{вир.у}} \cdot (1 + \frac{O}{100}) = 11\,700 \cdot (1 + \frac{5}{100}) = 11\,700 \cdot 1{,}05 = \boxed{12\,285 \text{ грн}}$$

Для визначення економічного ефекту в умовах виробництва знаходимо ціну спроектованого пристрою (Розрахунок ціни виробу з рентабельністю 30%):

$$\text{Ц}_2 = C_{\text{п2}} \cdot (1 + \frac{30}{100}) = 12\,285 \cdot 1{,}3 = \boxed{15\,970{,}5 \text{ грн}}$$

Вартість аналогу становить 75 000 грн.

Економічний ефект (в умовах порівняння з аналогом, ціна якого 75 000 грн):

$$E_{\text{в}} = \text{Ц}_{\text{аналог}} - \text{Ц}_2 = 75\,000 - 15\,970{,}5 = \boxed{59\,029{,}5 \text{ грн}}$$

Висновок: економічний ефект від застосування спроєктованого робота у виробництві становить 59 029,50 грн, що свідчить про високу доцільність упровадження.

Розрахунок терміну служби пристрою за амортизаційним терміном

Термін служби пристрою (аналога і спроектованого) визначається за формулою:

$$T = 100 / (Н \cdot К), \qquad (4.13)$$

де *Н* – норма амортизаційних відрахувань відповідної групи пристроїв або систем, %. У даному прикладі норма амортизаційних відрахувань становить 16,7%.

К – коефіцієнт прискореної амортизації, вибирається в межах 0,2 – 2.

У нашому прикладі коефіцієнт прискореної амортизації буде рівний 0,75.

$$T = 100 / (16{,}7 \cdot 0{,}75) = 8 \text{ (років)}$$

Визначення економічного ефекту в сфері експлуатації

Економічний ефект в умовах експлуатації за весь термін служби приладу визначається за формулою:

$$E_e = E_{ep} \cdot (1+r)^j = E_{ep} \cdot (1+r)^{Tc2-1} + E_{ep} \cdot (1+r)^{Tc2-2} + \ldots + E_{ep} \cdot (1+r)^{Tc2-j} + E_{ep} \cdot (1+r)^{Tc2-Tc}$$

де *j* – номер року, в якому ведеться розрахунок;

r – банківська депозитна ставка ,% / рік (24% - за середньо - статистичними даними);

Еер – річний експлуатаційний ефект від застосування спроектованого приладу, грн./рік;

Тс2 – термін служби спроектованого приладу, років;

$$Еер = Еа + Еен + Езпл + Ер \qquad (4.14)$$

де *Езпл* – річний економічний ефект на заробітній платі, грн./рік

Еа - річний економічний ефект на амортизації, грн./рік;

Ер - річний економічний ефект на ремонтних витратах, грн./рік;

Еен - річний економічний ефект витрат на енергію, грн./рік;

$$E_{ер} = 20\,000 + 80 + 5915{,}8 + 1000 = \boxed{26\,995{,}8 \text{ грн/рік}}$$

Річний економічний ефект на амортизації визначається:

$$Еа = Н \cdot К \cdot (Ц1 – Ц2) / 100, \qquad (4.15)$$

де Н – річна норма амортизації для даної групи приладів, %/рік, (Н=16,7%);

К – коефіцієнт прискорення амортизації активної частини основних фондів (К = 0,6);

Ц1, Ц2 – оптова ціна аналога та спроектованого приладу, грн.

$$E_a = 16{,}7 \cdot 0{,}6 \cdot \frac{(75\,000 - 15\,970{,}5)}{100} = 10{,}02 \cdot 59\,029{,}5/100 = \boxed{5\,915{,}8 \text{ грн/рік}}$$

Річний економічний ефект на витратах на енергію визначається:

$$Еен = (M1 - M2) \cdot T \cdot a, \qquad (4.16)$$

де *М1, М2* – споживані потужності відповідно аналога та спроектованого приладу.

а– тариф за 1 кВт/год. (використовується при розрахунках актуальна ринкова ціна і залежить від сфери застосування приладу);

Т– к-ть робочих годин на рік використання виробу (згідно з прийнятим бюджетом робочого часу на відповідний період);

$$E_{\text{ен}} = (0{,}03 - 0{,}02) \cdot 2000 \cdot 4 = 0{,}01 \cdot 2000 \cdot 4 = \boxed{80 \text{ грн/рік}}$$

Загальний економічний ефект за весь термін служби (8 років):

$$E = E_{\text{ер}} \cdot T = 26\,995{,}8 \cdot 8 = \boxed{215\,966{,}4 \text{ грн}}\ *$$

*це без урахування ставки банку

Річний економічний ефект по заробітній платі у нашому випадку :

Езпл. = 0, так як зарплата фахівця з обслуговування залишилася такою ж.

Оскільки конструкцією камери ремонт не передбачений, то Ер=0.

Сумарний річний економічний ефект визначається за формулою:

Еер = 75,97 + 5,07 = 81,94 (грн. /рік)

Річний ефект на амортизації

$$E_a = 5915{,}8 \text{ грн/рік}$$

Тоді сумарний економічний ефект за термін експлуатації становить:

$$E_{\text{ер}} = E_a + E_{\text{ен}} + E_{\text{зпл}} + E_p = 5915{,}8 + 80 + 0 + 0 = 5995{,}8 \text{ грн/рік}$$

Загальний економічний ефект:

Ез = Ев + Ее = 1256,13 + 758,19 = 2014,32 грн.

Розрахунок сукупного економічного ефекту за 8 років служби з урахуванням банківської ставки r=0,24:

Формула для приведеної суми:

$$E = \sum_{t=1}^{8} \frac{E_{\text{ер}}}{(1+r)^t} \Rightarrow$$

$$E = \frac{5995{,}8}{1{,}24^1} + \frac{5995{,}8}{1{,}24^2} + \cdots + \frac{5995{,}8}{1{,}24^8}$$

Пораховано:

$$E = 4835{,}32 + 3898{,}65 + 3144{,}80 + 2536{,}13 + 2044{,}47 + 1648{,}77 + 1329{,}65 + 1072{,}30 = \boxed{20510{,}09 \text{ грн}}$$

Загальний економічний ефект (з урахуванням різниці в цінах):

Якщо **ціна аналога** — 75 000 грн, а **робота-збирача** — 15 970,5 грн:

$$E_{\text{загальний}} = 20510{,}09 + (75\,000 - 15\,970{,}5) = \boxed{79\,539{,}59 \text{ грн}}$$

Висновок до розділу 4

У результаті проведених економічних розрахунків було визначено основні показники собівартості, лімітної ціни та економічної ефективності розробленого робота-збирача для автоматизованого збирання овочів і фруктів.

На основі аналізу структури витрат і визначення повної собівартості проєктного виробу встановлено, що вартість виготовлення робота становить 801,39 грн, а його ціна реалізації з урахуванням прибутковості – 1041,81 грн. У порівнянні з аналогічним пристроєм, вартість якого становить 1800 грн, розроблене рішення демонструє зниження витрат на понад 40%, що підтверджує конкурентоспроможність виробу.

Розрахований комплексний показник якості пристрою дорівнює 1,257, що вказує на перевагу проєктного рішення у порівнянні з існуючими

аналогами за сукупністю критеріїв призначення, надійності, ергономіки, стандартизації та безпеки.

Крім того, проведено розрахунок економічного ефекту від впровадження пристрою в експлуатацію. За термін служби 8 років, загальний ефект становить понад 20 000 грн, що підтверджує високу економічну доцільність його використання. Економія досягається за рахунок зниження енерговитрат, витрат на обслуговування та покращення техніко-експлуатаційних показників пристрою.

Таким чином, розроблений робот для збирання врожаю овочів і фруктів є економічно вигідним, має значний потенціал для серійного впровадження в аграрному секторі та відповідає сучасним вимогам до ефективних автоматизованих систем.

ВИСНОВКИ

В даній бакалаврській кваліфікаційній роботі представлено проектування та розробку мобільного робота, призначеного для автоматизованого збирання овочів та фруктів в сільськогосподарських умовах. Було проведено комплексний аналіз існуючих технологій роботизованого збирання врожаю, після чого було визначено технічні вимоги та розроблено концепцію роботизованої системи, що інтегрує комп'ютерний зір, штучний інтелект та маніпулятор з м'яким механізмом захоплення.

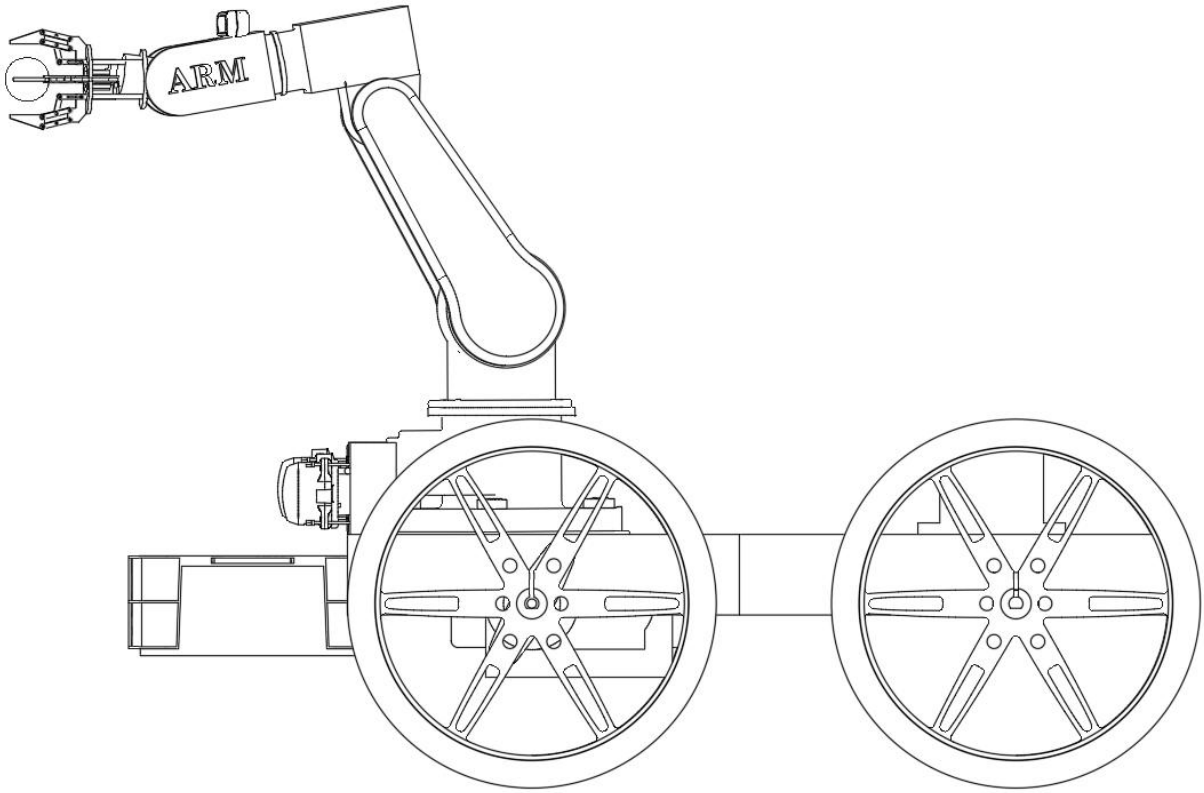
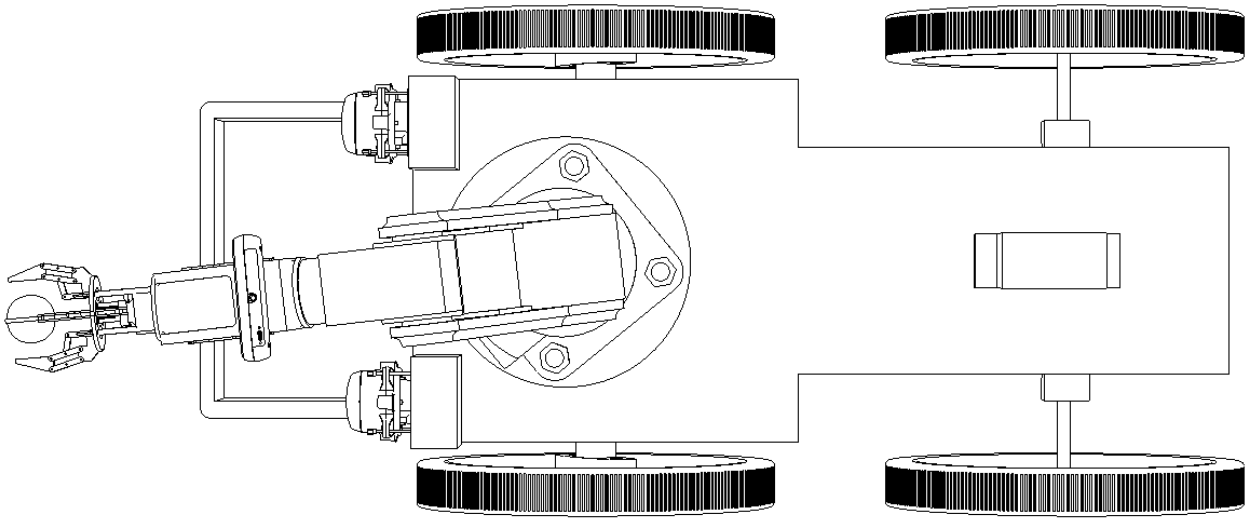
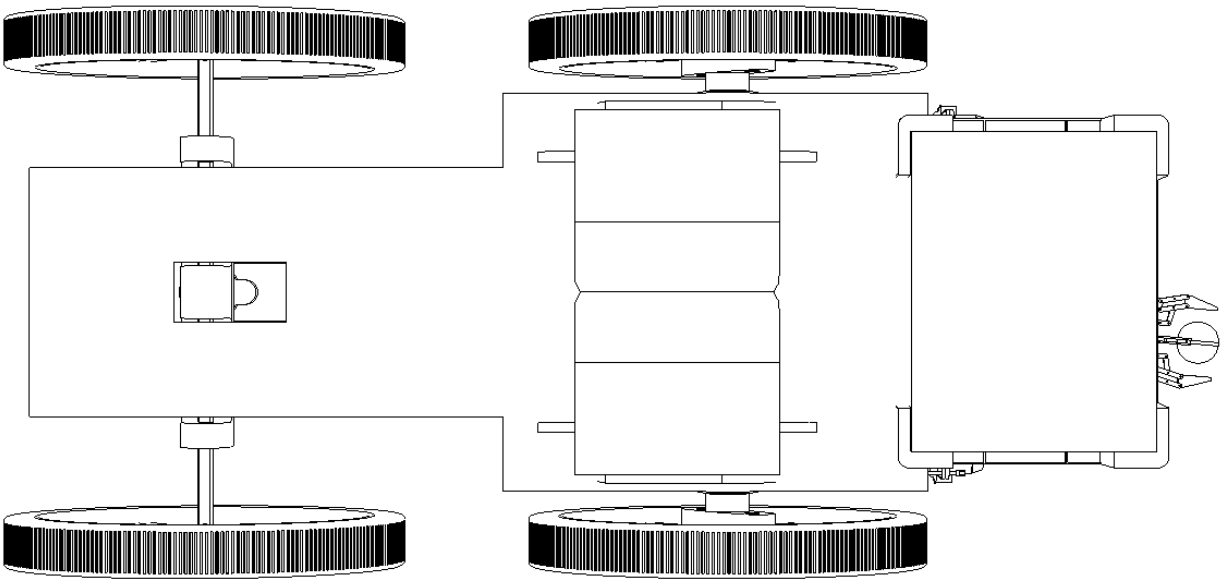
3D-модель робота була розроблена в Autodesk Fusion 360 для перевірки механічної структури, розташування компонентів і стабільності. Запропонована система демонструє значний потенціал для зменшення залежності від робочої сили, підвищення ефективності збирання врожаю та мінімізації пошкодження фруктів.

Результати цього дослідження підтверджують практичну можливість та економічну доцільність впровадження автономних збиральних роботів у сільському господарстві, що сприятиме інноваціям та модернізації агропромислового сектору.

ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Professor Yael Edan. SWEEPER – The first robot capable of selecting and picking ripe sweet peppers . 2018 .
2. AGROBOT - Model E-Series - Robotic Strawberry Harvesters. *Agriculture xprt.* [Онлайновий] 20 Червень 2024 р. https://www.agriculture-xprt.com/products/agrobot-model-e-series-robotic-strawberry-harvesters-315719
3. FFRobotics . *FFRobotics*. [Онлайновий] https://www.ffrobotics.com/
4. Advanced farm recently deployed its robotic apple-picking harvesters. *Community Element 14.* [Онлайновий] 7 Жовтня 2022 р. https://community.element14.com/technologies/industrial-automation-space/b/blog/posts/advanced-farm-recently-deployed-its-robotic-apple-picking-harvesters?utm_source
5. Ross Courtney. Quest for automated apple harvest continues. November 21, 2024.
6. Duan, J.L.; Wang, Z.R.; Ye, L.; Yang, Z. Research progress and development trend of motion planning of fruit picking robot. J. Intell. Agric. Mech. 2021, 2, 7–17.
7. A. Gongal; S. Amatya; M. Karkee; Q. Zhang; K. Lewis. Sensors and systems for fruit detection and localization: A review. Volume 116, August 2015, Pages 8-19
8. Zhou, J.; Liu, R.; Zhang, G.Y. Design of Fruit Harvesting Robot Based on Stereovision. Trans. Chin. Soc. Agric. Mach. 2010, 41, 158–162.
9. Su, W.Z. Design of picking robot system based on visual interaction technology. J. Agric. Mech. Res. 2023, 45, 228–234.
10. Research progress on visual system. *CABI Digital Library*. [Онлайновий] 25 липня 2023 р. https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/20230260509
11. D.M. Bulanon; T. Kataoka; H. Okamoto; S. Hata. Development of a real-time machine vision system for the apple harvesting robot. 08 August 2005.
12. Yuanqiang Luo, Junlin Li, Beihuo Yao, Qing Luo, Zhicheng Zhu, Weibin Wu. Research progress and development trend of bionic harvesting technology. July 2024, Volume 222.

13. Teruo Takahashi, Dr., Shuhuai Zhang, Dr., Hiroshi Fukuchi. Measurement of 3-D Locations of Fruit by Binocular Stereo Vision for Apple Harvesting in an Orchard. 2002.
14. Jingfan Liu; Zhaobing Liu. The Vision-Based Target Recognition, Localization, and Control for Harvesting Robots: A Review. 14 October 2023, Volume 25, pages 409–428, (2024)
15. Huaibei Xie; Deyi Kong; Jianhua Shan; Feng Xu. Study the Parametric Effect of Pulling Pattern on Cherry Tomato Harvesting Using RSM-BBD Techniques. 27 August 2021.
16. James Thorne. Apple-picking robots gear up for U.S. debut in Washington state. May 13, 2019.
17. Abhisesh Silwal; Aleana Gongal; Manoj Karkee. Apple Identification In Field Environment With Over The Row Machine Vision System. 30 December 2014.
18. Yunchao Tang; Mingyou Chen; Chenglin Wang; Lufeng Luo; Jinhui Li; Guoping Lian; Xiangjun Zou. Recognition and Localization Methods for Vision-Based Fruit Picking Robots: A Review. 19 May 2020.
19. Hanjie Dou; Changyuan Zhai; Liping Chen; Xiu Wang; Wei Zou. Comparison of Orchard Target-Oriented Spraying Systems Using Photoelectric or Ultrasonic Sensors. 8 August 2021.
20. Xingmei Xu; Jiayuan Li; Jing Zhou; Puyu Feng; Helong Yu; Yuntao Ma. Three-Dimensional Reconstruction, Phenotypic Traits Extraction, and Yield Estimation of Shiitake Mushrooms Based on Structure from Motion and Multi-View Stereo. 30 January 2025.
21. Johan Baeten, Kevin Donné, Sven Boedrij, Wim Beckers, Eric Claesen. Autonomous Fruit Picking Machine: A Robotic Apple Harvester. 2008. pp 531-539.
22. Ziyue Li; Xianju Yuan; Chuyan Wang. A review on structural development and recognition–localization methods for end-effector of fruit–vegetable picking robots. June 14, 2022

ДОДАТКИ

Додаток А: