

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій
(повна назва)

Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА Пояснювальна записка

другий (магістерський)

(рівень вищої освіти)

Розроблення комп'ютеризованої системи керування складального
виробництва за принципами Lean production

(тема)

Виконав:

здобувач 2 року навчання,
групи КТРСм-23-2

Петров Едуард Сергійович

Спеціальності 174 Автоматизація,
комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка

Тип програми Освітньо-професійна

Освітня програма Комп'ютеризовані та
робототехнічні системи

Керівник доц. Демська Н. П.

Допускається до захисту
Зав. кафедри КІТАР

(підпис)

Невлюдов І. Ш.

(прізвище, ініціали)

2025р.

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

Факультет _____ АКТ _____
Кафедра _____ КІТАР _____
Рівень вищої освіти _____ другий (магістерський) _____
Спеціальність 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка _____
Тип програми _____ Освітньо-професійна _____
Освітня програма Комп'ютеризовані та робототехнічні системи _____
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:
Зав. кафедри КІТАР _____
(підпис)
« ____ » _____ 2024 р.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

здобувачеві _____ Петрову Едуарду Сергійовичу _____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розроблення комп'ютеризованої системи керування
складального виробництва за принципами Lean production

Затверджена наказом по університету від 25.11.2024 р. № 1239 Ст _____

2. Термін подання здобувачем роботи до екзаменаційної комісії 25.01.2025 р.

3. Вихідні дані до роботи _____

3.1 Робот LR4-R560 компанії Suzhou LINKHOU Robot Co., Ltd; 3.2 Камера
Hikvision MVS SDK V2.3.1; 3.3 Для встановлення зв'язку з камерою
використовувалася мова C++; 3.4 Зображення, зібрані камерою,
обробляються оператором Halcon за допомогою мови C#; 3.5 Зв'язок із
роботом було встановлено через протокол керування передачею/Інтернет-
протокол (TCP/IP) і керування роботом для захоплення заготовки;
3.6 Програми запускалися у Visual Studio 2013.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі _____

4.1 Аналіз існуючих методів підвищення ефективності складального
виробництва; 4.2 Аналіз моделей складальних процесів; 4.3 Дослідження
розроблюваної системи; 4. Експериментальні дослідження; 4.6 Висновки

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій

Графічний матеріал у вигляді презентації – 12 арк. ф. А 4

6. Консультанти розділів роботи

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз існуючих методів підвищення ефективності складального виробництва	25.09.2024	виконано
2	Аналіз моделей складальних процесів	15.10.2024	виконано
3	Дослідження розроблюваної системи	15.11.2024	виконано
4	Експериментальні дослідження	20.12.2024	виконано
5	Безпека життєдіяльності	21.01.2025	виконано
6	Подання роботи на перевірку Інтернет-сервісом StrikePlagiarism	22.01.2025	виконано
7	Оформлення пояснювальної записки	23.01.2025	виконано
8	Подання роботи на рецензію	24.01.2025	виконано
9	Подання роботи на підпис зав. кафедри	25.01.2025	виконано
11	Подання кваліфікаційної роботи в ЕК	26.01.2025	виконано

Дата видачі завдання 01.09.2024 р.

Здобувач _____ Петров Е. С.
(підпис)

Керівник роботи _____ доц. Демська Н. П.
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

Я, як здобувач вищої освіти ХНУРЕ, розумію і підтримую політику закладу із академічної доброчесності. Я не надавав і не одержував недозволену допомогу під час підготовки кваліфікаційної роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

21 січня 2025 р.

Z X C

Петров Е. С.

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 63 с., 6 табл., 20 рис., 2 дод., 42 джерела.

АВТОМАТИЗАЦІЯ СКЛАДАННЯ, РОБОТОТЕХНІЧНІ СИСТЕМИ, КАЛІБРУВАННЯ, МАШИННИЙ ЗІР, МОБІЛЬНІ ТЕЛЕФОНИ, АЛГОРИТМ МІНІМАЛЬНОГО ПРЯМОКУТНИКА, ДИНАМІЧНЕ ЗАХОПЛЕННЯ.

Об'єкт дослідження – процес автоматизації складання мобільних телефонів.

Предмет дослідження – методи та алгоритми автоматизації складальних операцій із використанням робототехнічних систем, машинного зору та технологій динамічного захоплення.

Мета роботи – розробити робототехнічну систему для автоматизації складання мобільних телефонів, що забезпечує високу точність, ефективність і гнучкість виробничого процесу.

В першому розділі було проаналізовано існуючі методи підвищення ефективності виробництва, такі як ощадливе виробництво, Six Sigma, теорія обмежень, гнучке виробництво та моделювання. В результаті дослідження було визначено їхні переваги та можливості адаптації для автоматизації складальних процесів. Особливу увагу приділено скороченню витрат, підвищенню якості продукції та зменшенню втрат ресурсів.

В другому розділі розглянуто модель відкритого складання, яка забезпечує стандартизоване представлення компонентів та їхніх допусків. Використання стандартів ISO дозволило підвищити точність визначення геометричних параметрів і кінематики деталей. Додатково було проаналізовано методи інтеграції моделі з іншими системами та її можливості оптимізації складальних процесів.

В третьому розділі було розроблено робототехнічну систему для

складання мобільних телефонів. Також впроваджено багатоваріантне калібрування систем координат робота, конвеєра та камери. Запропоновано алгоритм мінімального прямокутника для позиціонування деталей із неповною інформацією та алгоритми динамічного захоплення на основі фільтра Калмана. Проведено експериментальні дослідження, які підтвердили високу ефективність запропонованих методів.

У результаті розроблено робототехнічну систему автоматизації складання мобільних телефонів, яка забезпечує точність позиціонування до 0,5 мм та 0,8 градусів, а також високу швидкість обробки деталей (до 90 мм/с) і успішність складання понад 98%. Запропоновані методи можуть бути адаптовані для автоматизації інших виробничих процесів, що вимагають гнучкості та точності.

Отримані результати роботи можна віднести до цілей сталого розвитку 9 «Промисловість, інновації та інфраструктура», а саме до пункту 9.4 «Сприяти прискореному розвитку високо- та середньо- високотехнологічних секторів переробної промисловості, які формуються на основі використання ланцюгів «освіта – наука – виробництво» та кластерного підходу за напрямками: розвиток інформаційно-телекомунікаційних технологій (ІКТ); застосування ІКТ в АПК, енергетиці, транспорті та промисловості; високотехнологічне машинобудування».

ABSTRACT

Explanatory note: 63 pages, 6 tables, 20 pic., 2 applications, 42 sources.

AUTOMATION OF ASSEMBLY, ROBOTIC SYSTEMS, CALIBRATION, MACHINE VISION, MOBILE PHONES, MINIMUM RECTANGLE ALGORITHM, DYNAMIC CAPTURE.

The object of research is the process of automating the assembly of mobile phones.

The subject of research is methods and algorithms for automating assembly operations using robotic systems, machine vision, and dynamic capture technologies.

The purpose of the study is to develop a robotic system for automating the assembly of mobile phones, which ensures high accuracy, efficiency and flexibility of the production process.

In the first section, we analyzed existing methods for improving production efficiency, such as lean manufacturing, Six Sigma, constraint theory, flexible manufacturing, and modeling. The study identified their advantages and possibilities of adaptation for automation of assembly processes. Particular attention is paid to reducing costs, improving product quality, and reducing resource waste.

The second section discusses the open assembly model, which provides a standardized representation of components and their tolerances. The use of ISO standards has improved the accuracy of determining the geometric parameters and kinematics of parts. Additionally, the methods of integrating the model with other systems and its ability to optimize assembly processes were analyzed.

In the third section, a robotic system for assembling mobile phones was developed. Multivariate calibration of the robot, conveyor, and camera coordinate

systems was also implemented. The minimum rectangle algorithm for positioning parts with incomplete information and dynamic capture algorithms based on the Kalman filter are proposed. Experimental studies have been conducted to confirm the high efficiency of the proposed methods.

As a result, a robotic system for automating the assembly of mobile phones has been developed, which provides positioning accuracy of up to 0,5 mm and 0,8 degrees, as well as high speed of parts processing (up to 90 mm/s) and assembly success rate of over 98%. The proposed methods can be adapted to automate other production processes that require flexibility and accuracy.

The results of the work can be attributed to Sustainable Development Goal 9 “Industry, Innovation and Infrastructure”, namely to paragraph 9.4 “Promote the accelerated development of high- and medium-tech manufacturing sectors, which are formed on the basis of the use of “education - science – production” chains and the cluster approach in the following areas: development of information and telecommunication technologies (ICT); application of ICT in agriculture, energy, transport and industry; high-tech engineering”.

ЗМІСТ

Перелік скорочень	9
Вступ.....	10
1 Аналіз існуючих методів підвищення ефективності складального виробництва	12
1.1 Дослідження методів підвищення ефективності складального виробництва	12
1.2 Висновки до розділу 1	16
2 Аналіз моделей складальних процесів.....	17
2.1 Модель відкритого складання.....	17
2.2 Висновки до розділу 2	23
3 Дослідження розроблюваної системи	25
3.1 Опис системи	30
3.2 Пропонований спосіб.....	31
3.2.1 Багатомодульне гібридне калібрування	32
3.3 Визначення положення рухомої деталі з неповною інформацією	36
3.4 Динамічне захоплення	38
3.5 Динамічний метод зйомки	39
3.6 Збірка пристрою	40
3.7 Висновки до розділу 3	43
4 Експериментальні дослідження.....	45
4.1. Налаштування експериментів.....	45
4.2 Багаторазове модульне гібридне калібрування та визначення позиції .	46
4.3 Динамічний хват.....	49
4.4 Результати ідентифікації монтажної зони	50
4.5 Тест на збірку	51
4.6 Забезпечення безпечних умов праці при проведенні експерименту.....	55
4.7 Висновки до розділу 4	54

	9
Висновки	56
Перелік джерел посилання	58
Додаток А Абробачія наукових результатів досліджень.....	65
Додаток Б Демонстраційний матеріал	70

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

ВРМ – управління бізнес-процесами;

СРМ – Core Product Model;

DMAIC – Define, Measure, Analyze, Improve, Control

ІІОТ – інтернет речей;

ІІТ – Just-In-Time;

ОАМ – модель відкритого складання;

ТРС – Toyota Production System;

ТҚМ – Total Quality Management;

VSM – картування.

ВСТУП

Промислове середовище зараз переживає четвертий період революція, що отримала назву Індустрія 4.0 (I4.0) [1]. Ця революція характеризується радикальними змінами, які інтегрують багато нових цифрових технологій у виробничі процеси. Деякі з цих технологій включають хмарні обчислення, автономну навігацію, робототехніку, комп'ютерний зір, доповнену реальність, глибоке навчання, 3-D друк, адитивне виробництво, розумні датчики, глибоке навчання та промисловий Інтернет речей (IIOT). Тому очікується, що складальні системи стануть піонерами інтеграції технологій I4.0, утворюючи клас систем Assembly 4.0 (A4.0) [2].

Зараз лінії виробництва електромеханічних пристроїв в основному ручні та напівавтоматичні. Роботи є найважливішими інструментами, які використовуються для підвищення інтелектуального рівня промислового виробництва. В роботі представлено проект інтелектуальної роботизованої системи складання, яка бере як приклад складання екранних компонентів і компонентів корпусів.

Існують основні фактори, що обмежують застосування роботів, такі як калібрування різноманітних об'єктів, рухома заготовка з неповною інформацією та різноманітні типи складання. В роботі пропонується спосіб вирішення цих технологічних труднощів. Метод багатомодульного калібрування використовується для трансформації співвідношення положення між роботом, конвеєрною стрічкою та двома камерами в системі складання робота [1].

Для визначення положення запропоновано метод мінімальної матриці, спрямований на рух заготовки з неповною інформацією. Потім реалізується динамічна вибірка на основі оцінки положення рухомої деталі. Нарешті, метод зіставлення шаблону використовується для визначення зони складання типу заготовки.

Об'єктом дослідження є процес автоматизації складання мобільних телефонів.

Предмет дослідження – це методи та алгоритми автоматизації складальних операцій із використанням робототехнічних систем, машинного зору та технологій динамічного захоплення.

Мета роботи – розроблення робототехнічної системи для автоматизації складання мобільних телефонів, що забезпечує високу точність, ефективність і гнучкість виробничого процесу.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати наступні завдання:

- провести аналіз існуючих методів підвищення ефективності складального виробництва;
- провести аналіз моделей складальних процесів;
- провести дослідження розроблюваної системи;
- провести експериментальні дослідження.

Робота виконана згідно [3-4]. Результати роботи опубліковані в [5].

1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СКЛАДАЛЬНОГО ВИРОБНИЦТВА

Ощадливе виробництво – це добре налагоджена організаційна модель, яка впроваджується в компаніях по всьому світу. З моменту публікації «Машини, які змінили світ» [6], «Lean» – це слово, яке використовувалося для позначення виробничої системи Toyota (TPS – Toyota Production System) [7]. Це слово використав дослідник [8], тому що TPS «робила більше з меншими витратами»: менше людських зусиль, менше місця, менше запасів, менше інвестицій у нові інструменти. Це було досягнуто за допомогою інструментів і принципів: Just-In-Time (JIT), автономії, гнучкої робочої сили та творчого мислення [2].

Пізніше вони були оновлені в принципах Lean Thinking:

- створювати цінність для клієнта;
- відобразити потік створення цінностей;
- створити потік;
- підвищити продуктивність;
- прагнути досконалості [4].

TPS розглядає сім недоліків існуючих виробництв: перевиробництво, непотрібний рух, непотрібне транспортування та обробка, дефекти, запаси, очікування, переробка [9]. Усунення таких відходів і введення в дію зазначених принципів потребує різноманітних інструментів, таких як: Value Stream Mapping (VSM) [10]; 5S; тягова система; стандартизовані робочі процедури (SOP), перевірка помилок або механізми рока-уоке [11].

1.1 Дослідження методів підвищення ефективності складального виробництва

Аналіз існуючих методів підвищення ефективності складального виробництва є важливим етапом, що дозволяє визначити, які підходи

найбільш ефективні для оптимізації процесів, зменшення втрат і підвищення продуктивності. В ході дослідження я поділив існуючі методи на наступні:

Основні принципи Lean Production включають [10]:

– Just-in-Time, точно та вчасно: цей принцип забезпечує доставку матеріалів і компонентів на виробничу лінію саме тоді, коли вони потрібні, що дозволяє зменшити запаси, уникнути переповнення складських приміщень та підвищити гнучкість виробництва [12];

– 5С (сортування, систематизація, санітарія, стандартизація, самодисципліна) – це метод організації робочого місця, що дозволяє усунути непотрібні елементи, забезпечити зручність і підвищити ефективність роботи персоналу на виробничій лінії [13];

– Kanban – це візуальна система контролю, що допомагає керувати потоками матеріалів і компонентів, забезпечуючи їхню наявність у потрібній кількості на кожному етапі виробництва [14];

– Kaizen (безперервне покращення) – це метод, спрямований на залучення персоналу до постійного вдосконалення процесів шляхом виявлення проблем, пропозицій і впровадження змін для зменшення часу циклу та покращення якості продукції [15].

Основний принцип ощадливого виробництва зображений на рис. 1.1.



Рисунок 1.1 – Ощадливе виробництво

Наступний методом є так звана Six Sigma, або Шість Сигм. Це методологія, що використовує статистичні інструменти для покращення якості виробничих процесів і зменшення варіацій у кінцевому продукті. Основні етапи методології DMAIC (DMAIC – Define, Measure, Analyze, Improve, Control) включають визначення проблеми, вимірювання параметрів процесу, аналіз даних, впровадження покращень і контроль досягнутих результатів. Six Sigma дозволяє виявляти і усувати корінні причини дефектів і знижувати рівень помилок у складальному виробництві [16].

Приклад моделі зображений на рис. 1.2.



Рисунок 1.2 – Модель покращення Шість Сигм

Існує також метод, який фокусується на виявленні та усуненні «вузьких місць» у виробничому процесі, що знижують його ефективність. Використання DMAIC дозволяє оптимізувати процес, забезпечуючи максимальну пропускну здатність на кожному етапі.

Суть цього методу – ідентифікувати обмеження, вирівняти роботу відповідно до цього обмеження і мінімізувати час простою або затримки в його роботі, що дозволяє покращити загальну продуктивність. Його назва – теорія обмежень.

Наступним методом є гнучке виробництво. Воно дозволяє виробничій системі швидко адаптуватися до змін у продукції або обсягах. Завдяки впровадженню гнучкого обладнання та програмованих роботів можна легко змінювати послідовність або тип виконуваних операцій, що робить виробництво більш ефективним у випадках, коли необхідно швидко реагувати на зміни попиту або виробничі вимоги.

Також популярним є використання цифрового модулювання та симуляції [15]. Метод дозволяє створити цифрову модель виробничого процесу, що точно відображає реальні умови. За допомогою симуляцій можна оцінити ефективність різних варіантів організації процесу, проаналізувати можливі зміни та виявити оптимальний підхід без необхідності зупинки реального виробництва. Цей метод є надзвичайно корисним для складальних процесів, які вимагають чіткої послідовності операцій і синхронізації всіх елементів системи [16].

Додатково слід зазначити метод загального управління якістю (TQM – Total Quality Management). TQM спрямований на підвищення ефективності виробництва через контроль якості на кожному етапі процесу.

Цей метод включає всебічне управління процесами з метою досягнення максимальної якості продукції. Основні принципи TQM включають залучення всього персоналу до покращення процесів, клієнтоорієнтованість, процесний підхід, і постійне вдосконалення. Приклад зображений на рис. 1.3.

Застосування таких методів може значно підвищити ефективність складального виробництва, зменшити втрати ресурсів і часу, підвищити якість продукції та продуктивність.

Кожен метод має свої особливості, і вибір найбільш підходящих методів залежить від специфіки підприємства, його виробничих обсягів і вимог до якості.

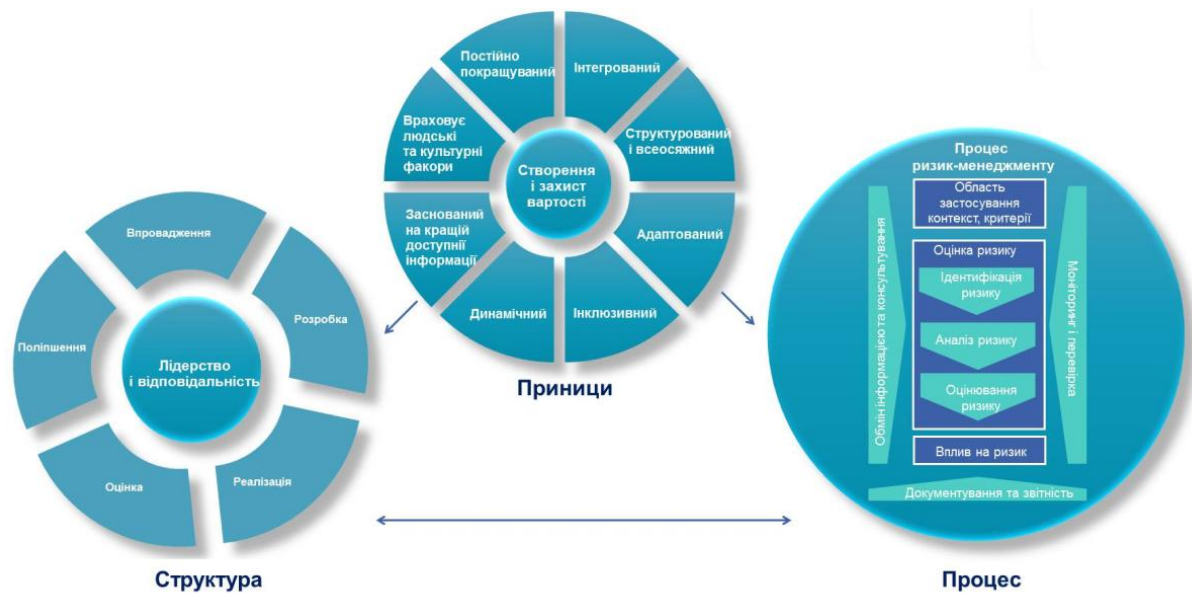


Рисунок 1.3 – Принцип Total Quality Management

1.2 Висновки до розділу

На цьому етапі обрано для дослідження ощадливе виробництво, оскільки ця концепція зарекомендувала себе як ефективний підхід до зменшення витрат, оптимізації процесів і підвищення якості у багатьох галузях. Lean Production, що виникла на основі системи виробництва Toyota, базується на принципах зменшення втрат і постійного вдосконалення, що особливо важливо для виробництв, які прагнуть зберегти конкурентоздатність та підвищити продуктивність, що актуально в наш час.

При виборі дослідження саме ощадливого виробництва звернуто увагу на той факт, що метод спрямований на ідентифікацію і усунення всіх видів втрат, відомих як «muda», які не додають цінності кінцевому продукту. До цих втрат відносяться надмірні запаси, зайве транспортування, дефекти, надмірні обробки, очікування, переміщення та нереалізований потенціал персоналу. Зосереджуючись на цих аспектах, ощадливе виробництво допомагає підприємствам скорочувати витрати, підвищувати продуктивність і забезпечувати ефективне використання ресурсів.

2 АНАЛІЗ МОДЕЛЕЙ СКЛАДАЛЬНИХ ПРОЦЕСІВ

2.1 Модель відкритого складання

Більшість електромеханічних виробів є вузлами компонентів. Метою моделі відкритого складання (ОАМ – Open Assembly Models) є надання стандартного представлення та протоколу обміну інформацією про допуски на рівні системи. ОАМ є розширюваним. В даний час він забезпечує представлення допуску та поширення, представлення кінематики та інженерний аналіз на рівні системи [17]. Інформаційна модель складання наголошує на природі та вимогах до інформації для характеристик деталей і взаємозв'язків складання. Модель включає як збірку як концепцію, так і збірку як структуру даних. Для останнього він використовує модельні структури даних STEP.

ОАМ є відкритою моделлю, оскільки вона не залежить від будь-якого аспекту реалізації; він не є власністю і може бездоганно взаємодіяти з будь-якою програмою або загальним аналізом.

На рисунку 2.1 показана основна схема моделі відкритої збірки.

Схема містить інформацію про зв'язки між вузлами та склад компонентів; представлення першого представлено класом `AssemblyAssociation`, а модель останнього використовує частину взаємнини. Клас `AssemblyAssociation` представляє взаємозв'язок компонента зборки збірки. Це об'єднання однієї або кількох асоціацій артефактів.

Клас `ArtifactAssociation` представляє зв'язок складання між одним або декількома артефактами.

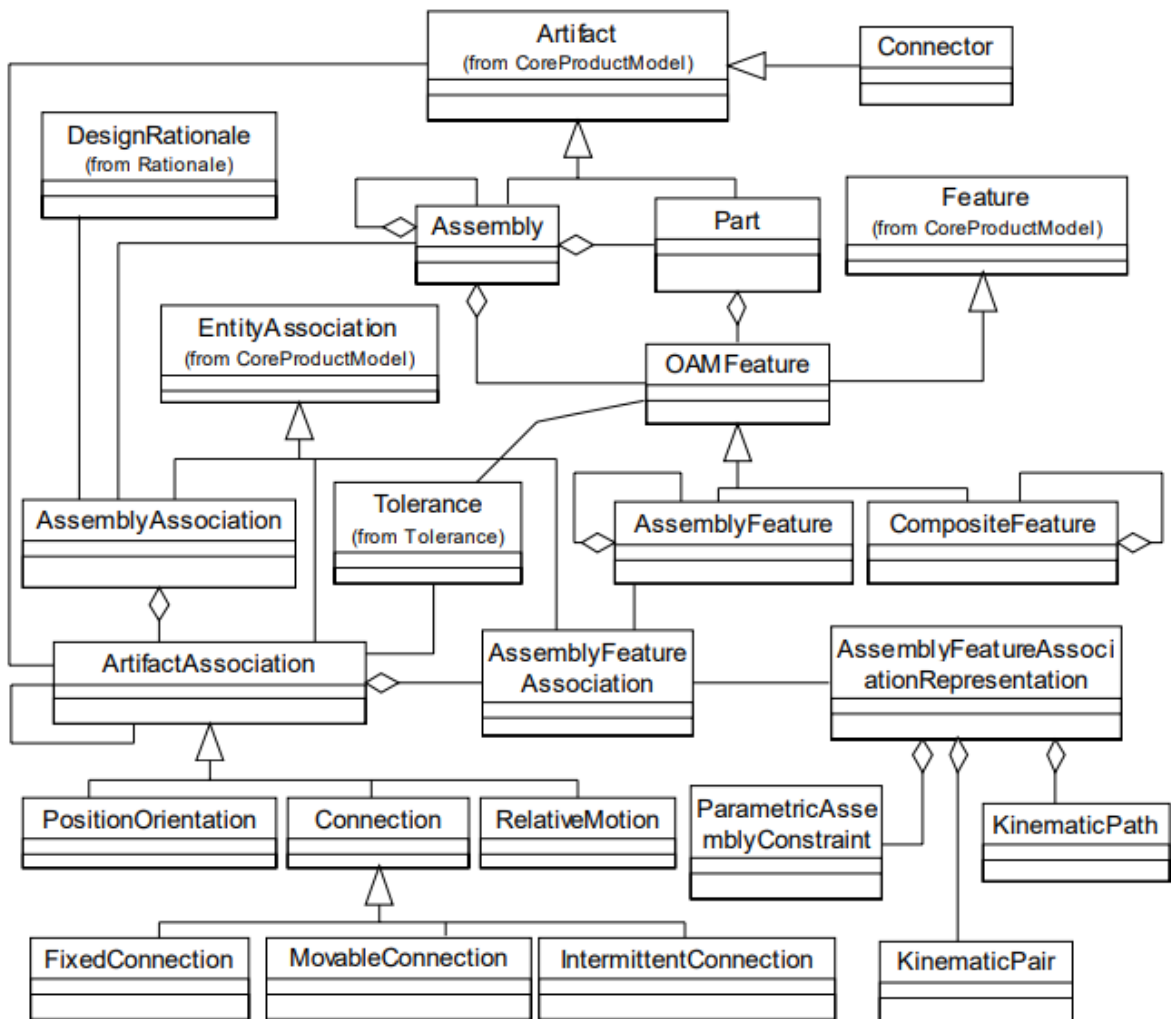


Рисунок 2.1 – Діаграма класів моделі Open Assembly

У більшості випадків зв'язок включає два або більше артефактів (штучно створених процесів). Однак у деяких випадках він може включати лише один артефакт для представлення особливої ситуації. Такий випадок може статися, коли артефакт фіксується в просторі для прикріплення всієї збірки до основи (Grounded). Це також може статися, коли ми фіксуємо кінематичну інформацію між артефактом у вхідній точці та основою. Можна розглядати такі випадки як зв'язки між основою та артефактом.

Збірка – це композиція її підвузлів і частин. Частина – це компонент найнижчого рівня. Кожен компонент збірки (підзбірка чи частина) складається з однієї або кількох функцій, представлених у моделі OAMFeature. Класи Assembly та Part є підкласами класу CPMArtifact (CPM – Core Product Model), а OAMFeature є підкласом класу CPMFeature.

У CPM геометрія та матеріал об'єднуються у форму. Форми та дії об'єднуються в клас функцій CPM.

ArtifactAssociation спеціалізується на таких класах:

- PositionOrientation, RelativeMotion і Connection. PositionOrientation представляє відносне положення та орієнтацію між двома або більше артефактами, які фізично не з'єднані і описує пов'язані обмеження між артефактами. RelativeMotion представляє відносні рухи між двома або більше артефактами, які фізично не пов'язані, і описує пов'язані обмеження між артефактами. Підключення представляє зв'язок між артефактами, які фізично з'єднані;

- підключення додатково спеціалізується як FixedConnection, MovableConnection або IntermittentConnection. FixedConnection представляє з'єднання, в якому артефакти, що беруть участь, фізично з'єднані, і описує тип і/або властивості фіксованих з'єднань. MovableConnection представляє зв'язок, у якому артефакти, що беруть участь, фізично з'єднані та рухливі відносно один одного, і описує тип і/або властивості кінематичних з'єднань. IntermittentConnection представляє з'єднання, де артефакти, що беруть участь, фізично з'єднуються лише періодично (наприклад, САМ). Connector реалізує Connection, який є спеціалізацією Artifact;

- OAMFeature містить інформацію про допуск, представлену класом tolerance та підкласами AssemblyFeature і CompositeFeature. CompositeFeature представляє складену функцію, яку можна розкласти на кілька простих функцій. AssemblyFeature, підклас OAMFeature, за визначенням представляє елементи складання. Об'єкти складання – це сукупність геометричних об'єктів артефактів. Вони можуть бути частковими елементами форми будь-якого артефакту. Для прикладу розглянемо з'єднання вал-підшипник. Отвір підшипника та циліндр валу можна розглядати як складові елементи, які описують фізичне з'єднання між підшипником і валом. Можна також розглядати геометричні елементи, такі як площини, сфери, конуси та тори, як складові елементи;

– клас `AssemblyFeatureAssociation` представляє асоціацію між відповідними елементами складання, за допомогою яких асоціюються відповідні артефакти. Асоціація артефактів класу є агрегацією асоціації ознак складання. Оскільки асоційовані артефакти можуть мати кілька зв'язків на рівні функцій під час складання, один зв'язок артефакту може мати кілька асоціацій із функціями складання одночасно. Тобто асоціація артефакту – це агрегація асоціацій ознак складання. Будь-яка асоціація елементів складання загалом стосується двох або більше елементів складання. Однак, як і в особливому випадку, коли асоціація артефакту включає лише один артефакт, вона може включати лише одну функцію складання, якщо відповідна асоціація артефакту має лише один артефакт;

– клас `Assembly Feature Association Representation` представляє зв'язок між двома або більше елементами складання. Цей клас є агрегацією параметричних обмежень збірки, кінематичної пари та/або відносного руху між елементами збірки.

`ParametricAssemblyConstraint` визначає явні геометричні обмеження між артефактами зібраного продукту, призначені для керування положенням і орієнтацією артефактів у збірці. Параметричні обмеження складання визначені в ISO 10303-108 [18]. Цей клас далі спеціалізується на певні типи: паралельний, паралельний із розміром, відстань до поверхні з розміром, кут із розміром, перпендикуляр, кут падіння, коаксіальний, дотичний і фіксований компонент. Кінематична пара визначає кінематичні обмеження між двома суміжними артефактами (ланками) на стику.

Схема кінематичної структури в ISO 10303-105 визначає кінематичну структуру механічного виробу з точки зору ланок, пар і з'єднань [19]. Кінематична пара представляє геометричні аспекти кінематичних обмежень руху між двома зібраними компонентами. `KinematicPath` представляє відносний рух між артефактами. Схема кінематичного руху в ISO 10303-105 визначає кінематичний рух [19].

Допуск є критичною проблемою при проектуванні електромеханічних

вузлів. Толерантність включає як аналіз толерантності, так і синтез толерантності. У контексті проектування електромеханічного вузла аналіз допусків стосується оцінки впливу варіацій розмірів окремої частини або вузла на призначені розміри або функції готового вузла.

Синтез допусків відноситься до розподілу допусків для окремих частин або вузлів на основі допусків або функціональних вимог до вузла. Проектування допусків – це процес отримання опису специфікацій геометричних допусків для виробу з заданого набору бажаних властивостей виробу. Існуючі підходи до аналізу допусків і синтезу передбачають детальне знання геометрії вузлів і здебільшого застосовуються лише на просунутих стадіях проектування, що призводить до менш ніж оптимального дизайну. У [18] представлена обчислювальна модель для перевірки схеми визначення розмірів і специфікацій допусків, сумісних з практикою визначення розмірів і допусків.

Під час проектування вузла як структура вузла, так і пов'язана з ним інформація про допуски постійно розвиваються; ми можемо досягти значних здобутків, ефективно використовуючи цю інформацію для впливу на дизайн цієї збірки. Будь-який активний підхід до складання або аналізу допусків на ранніх стадіях проектування передбачатиме прийняття рішень на основі неповних інформаційних моделей.

Щоб здійснити ранній синтез і аналіз допусків на ранній стадії проектування, ми включаємо інформацію про функції, допуски та поведінку в модель складання; це дозволить аналізувати та синтезувати допуски навіть з неповним набором даних. Щоб досягти цього, ми визначаємо структуру класу для специфікації допуску, як показано на рис. 2.2.

встановлення бази даних. FeatureOfSize – це функція, яка пов’язана з розміром розміру, таким як діаметр сферичної або циліндричної поверхні або відстань між двома паралельними площинами.

StatisticalControl – це специфікація, яка включає статистичні засоби керування процесом для допустимих ознак у виробництві.

2.2 Висновки до розділу 2

В даному розділі було проведено аналіз моделі відкритого складання ОАМ, яка забезпечує стандартизоване представлення та безпосередній обмін інформацією про взаємозв’язки компонентів та їх допуски під час складання. Було визначено, що вказана модель гнучка, універсальна та не залежить від конкретних програмних або апаратних рішень, що, в свою чергу, дозволяє інтегрувати її з будь-якими інструментами для аналізу або проектування. Використання стандартів ISO, таких як ISO 10303-108 та ISO 1101, гарантує точність визначення геометричних параметрів і допусків.

Модель відкритого складання структурована таким чином, що дозволяє описувати взаємозв’язки між компонентами, їх функції та кінематичні та геометричні обмеження. Підхід до опису компонентів заснований на представленні їх елементів і функціональних характеристик у вигляді ієрархії, що дає змогу ефективно моделювати навіть складні зв’язки, наприклад, у випадку з’єднання вал-підшипник.

Був розглянутий аналіз допусків, який є важливим етапом проектування. Важливість приділяється впливу на геометричні та функціональні характеристики вузлів. Запропонована інтеграція аналізу та синтезу допусків на ранніх етапах проектування дає змогу уникнути помилок і знизити витрати на внесення змін у майбутньому.

Вирішено, що модель ОАМ дозволяє використовувати інформацію про функції, поведінку та допуски не лише на етапі початкового проектування, а і під час перевірки готових компонентів. Це забезпечується через

параметричні обмеження, які дають змогу точно управляти положенням і орієнтацією форм. Тому, виконаний аналіз показує, що модель відкритого складання є ефективним інструментом для оптимізації процесів проектування та складання електромеханічних виробів.

3 ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗРОБЛЮВАНОЇ СИСТЕМИ

Постійний прогрес концепцій дизайну продукту мав великий вплив на технологію виробництва комп'ютерів, комунікацій і споживачів. Велика кількість підприємств намагаються перевести виробничі лінії від масового виробництва до масової «кастомізації». Однак, виробнича система повинна мати можливість працювати з меншими розмірами партій [21].

Для прикладу, як один із представників індустрії ЗС, мобільні телефони є незамінним інструментом зв'язку в сучасному житті, який має характеристики компактного дизайну та швидкого оновлення.

Завдання зі складання електромеханічних пристроїв (для прикладу беремо телефон) є складним і різноманітним, зазвичай включає багато деталей та інструментів (рис. 3.1). і є кілька проблем [22], які включають дисплейний модуль, камеру, акумулятор і головну плату.

Після дослідження процес складання мобільного телефону виглядає так, як показано на рис. 3.2.

Процес виготовлення мобільного телефону є ручним або напівавтоматичним, що також призводить до високих витрат на виробництво [22]. Застосування технологій роботів відкриває можливості для автоматизації виробничих ліній. Рівень автоматизації ліній виробництва телефонів вимагає вдосконалення застосування роботизованих технологій.

Якщо роботи замінять людей, вартість робочої сили може бути значно заощаджена [1]. Однак складові частини мобільних телефонів різноманітні, а здатність роботи робота слабка [22].



Рисунок 3.1 – Компоненти мобільного телефону

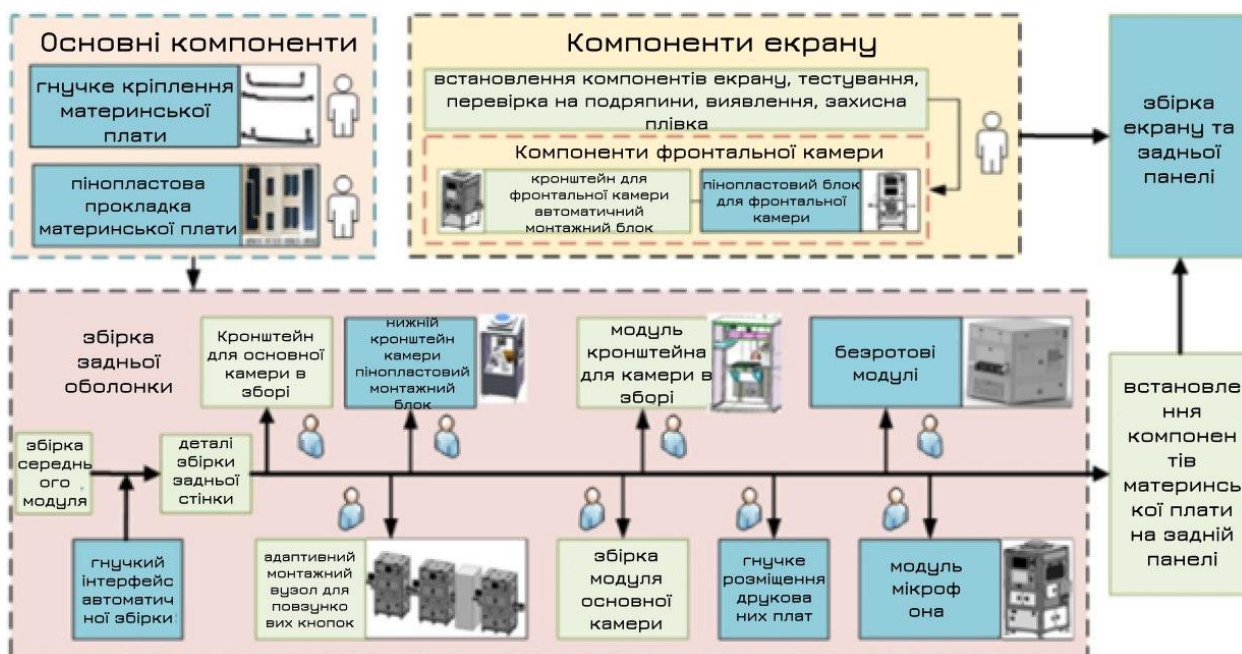


Рисунок 3.2 – Процес складання мобільного телефону

Багато робототехнічних компаній і дослідників зосереджуються на роботах із подвійною рукою, таких як робот *Вахтер* [23], робот *Yumi* [24] і робот *NEXTAGE* [25]. Вони знайшли застосування в деяких промислових завданнях [26]. Однак дворуковий робот із точним обладнанням має високу вартість [27]. Тому робот із сигнальною рукою користується популярністю у деяких компаній. Існує багато труднощів у процесі складання мобільного телефону, включаючи визначення позиції, динамічне захоплення,

багатотипове складання тощо.

Зір на виробничій лінії – це звичайний набір датчиків, які використовуються для отримання інформації. Процес калібрування камери виснажливий. Крім того, іноді інформація про деталь, що збирається, є неповною. Наприклад, часто виникає ситуація за межами поля зору камери [28] через обмеження вартості промислового майданчика та обмежений процес виробництва камери. Крім того, частота дискретизації камери під релейним тригером не відповідає швидкості конвеєрної стрічки [29], що також легко спричиняє неповну інформацію про зображення заготовки.

Датчики зору та сили є двома поширеними способами сприйняття роботом навколишнього середовища [30]. Механічні обмеження можуть бути використані для гарантування початкового положення заготовки. Якщо змінюється модель зібраної заготовки, механічні інструменти повинні бути іншими. Машинний зір використовувався для виявлення різних типів заготовок, що підвищило гнучкість виробничої лінії [28].

У 2013 році персональні побутові роботизовані системи, такі як HERB і PR2, сприймали навколишнє середовище і виконували деякі дії, такі як прибирання і самозаряджання за допомогою візуальних датчиків [28]. Саї та ін. досяг складних рухів, таких як захоплення та розміщення об'єктів, які поєднували роботу з кількома ступенями свободи з системою активного візуального позиціонування. Цільова тривимірна хмара точок сегментується машинним зором, а потім навчена штучна нейронна мережа поєднується з машинним зором, щоб знайти найбільш підходяще положення для захоплення об'єкта [31].

Збір даних сервоприводу зображення використовується як основа для визначення наступного візуального вимірювання та керівництва складанням маніпулятора. Розроблено «робот прецизійного складання» з системою бачення в реальному часі [32], а також запропоновано динамічний алгоритм розпізнавання та супроводу цілей на основі вдосконаленого кулачкового вала.

Тому ідентифікація та позиціонування заготовки є дуже важливими, і тому приділяється багато уваги розробкам алгоритмів розпізнавання кількох заготовок для визначення місцезнаходження тривимірної заготовки монокулярного зору в складному промисловому середовищі, який базувався на адаптивному підшаблонному багатоманітному навчанні [30].

Вчені [34] навчили роботів виконувати збірку об'єктів за допомогою мультимодального 3D бачення. Порівняно з тривимірним баченням, монокулярний зір дешевий і простий у застосуванні. Для виявлення неповної інформації заготовки, наприклад перевищення поля зору. В роботі [35] розроблено прилад для вимірювання компонентного зображення суперполя за допомогою технології зшивання зображень.

Алгоритм адаптивного зшивання зображень був запропонований в [35] для отримання панорамних зображень компонентів суперполя. У [36] реалізовано ефективне розпізнавання заготовки з перевищенням поля шляхом виділення характерних точок на заготовці та проведення відповідності форми.

Крім того, для завдань зі складання зазвичай використовується метод керування зусиллям або гібридний метод керування позицією/силою. У попередніх дослідженнях існувало три класи методів контролю: контроль позиції, контроль сили та гібридний контроль позиції/сили. Контроль положення використовується для виконання завдання складання, а датчики бачення широко використовуються для отримання позиції та орієнтації об'єктів складання [26, 27].

Збірка електронної схеми була завершена з використанням бачення на основі OpenCV для промислового робота [37]. Складання отвору для кілка було завершено за допомогою оцінки системи бачення. Сила взаємодії була отримана за допомогою датчиків сили, щоб направляти робота для завершення складання [28, 29].

Більшість стратегій складання базуються на ідеї моделювання. Будується модель триточкового контакту, і розбіжність позиції між штифтом

і отвором оцінюється силовим і геометричним аналізом. Новий метод моделювання геометричних помилок був запропонований Zhang et al. для точного складання [31]. Для навчання станів контакту під час роботи використовувалася схема керування [35]. Було запропоновано метод оптимізації параметрів роботизованого складання [23, 32], щоб дозволити промисловим роботам збирати заготовку.

У порівнянні з попередньою роботою ця стаття спрямована на процес виробництва мобільних телефонів за допомогою робота. У таблиці 3.1 наведено порівняльний огляд, у якому показано ключові відмінності між різними попередніми системами та запропонованою системою. Автоматична система також знайшла широке застосування в харчовій промисловості [33]. Є кілька посилань на застосування цієї системи на конвеєрі мобільних телефонів.

Таблиця 3.1 – Порівняльний огляд між попередніми системами та запропонованою системою

Зміст	Система 1	Система 2	Пропонована система
Типи продуктів	Один вид	Один вид	Кілька видів
Кількість роботів	Кілька роботів	Кілька роботів	Один робот
Метод калібрування	Багаторазове калібрування	Багаторазове калібрування	Калібрування моделі
Виявлення та захоплення цілей	у полі зору цілей	у полі зору цілей	поза межами поля зору
Функція	Збірка в одному положенні	Розміщення та транспортування	Збірка в іншому положенні

У даній роботі пропонується робототехнічна система для реалізації автоматизації процесу складання мобільного телефону. Спочатку пропонується алгоритм підгонки мінімального прямокутника для вирішення проблеми оцінки позиції рухомих заготовок з неповною інформацією. Мультигібридне модульне калібрування камери-ременя-робота використовується для калібрування системи складання, яка може отримати

взаємозв'язок позиції між роботом, конвеєрною стрічкою та двома камерами. Потім пропонується алгоритм оцінки позиції на рухомій конвеєрній стрічці для відстеження об'єктів з різною швидкістю. Нарешті ефективність методу підтвердила те, що задня оболонка та компоненти екрана були зібрані за допомогою LINKHOU із шістьма ступенями свободи.

3.1 Опис системи

Збірка мобільного телефону в основному складається з трьох частин: основної плати, екрана та задньої панелі. Інтелектуальна система складання в основному складається з маніпулятора, модуля руху, модуля зору та модуля складання, як показано на рис. 3.3.

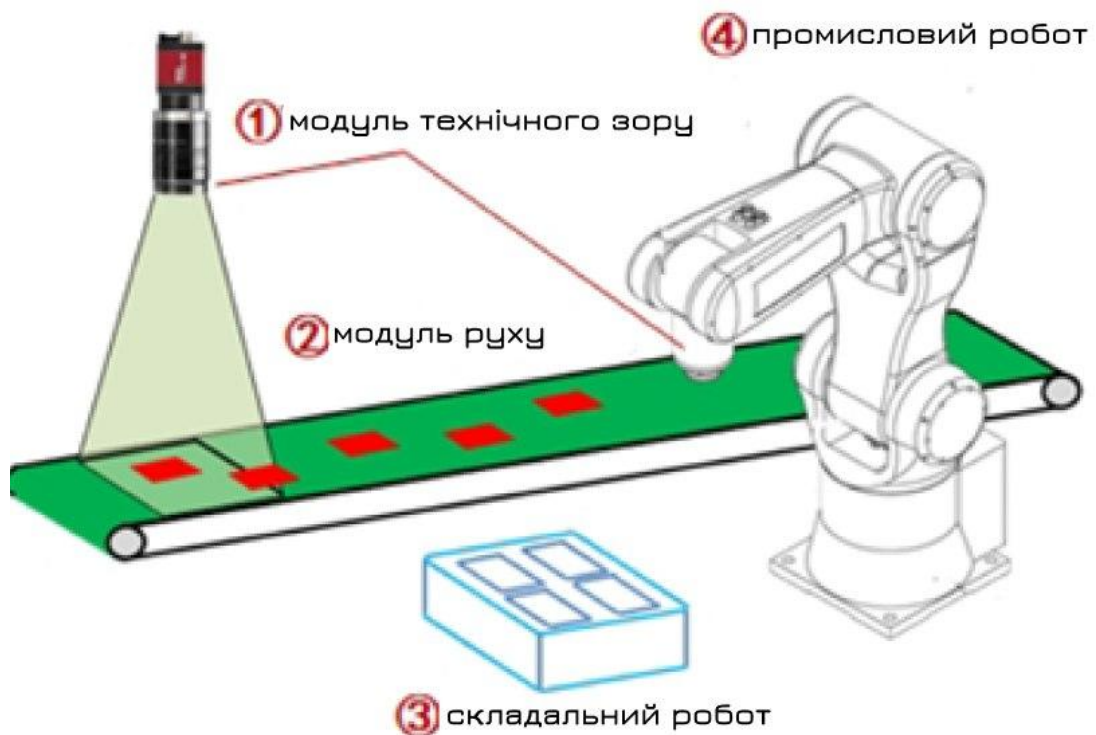


Рисунок 3.3 – Склад системи

Виробник складання, як показано на рисунку 3.4, має бути розділений на чотири етапи:

- багаторазове модульне гібридне калібрування. В основному це

включає калібрування зорової системи, калібрування зорової системи та ременя, а також калібрування ременя та робота. Вся система координат системи реалізується через перетворення;

- визначення положення та позиції рухомих частин. Оскільки швидкість руху велика, а зйомка відстає, виникають повторні зйомки та неповна інформація про цільовий об'єкт у полі зору камери;

- динамічна вибірка. Через різну швидкість руху ременя положення захоплення присоски відхиляється під час процесу захоплення. Оцінка позиції важлива для відстеження швидкості стрічки;

- розпізнати заготовку, що збирається, і саму збірку. У зоні заготовки, що збирається, повинні бути розміщені різні види заготовок. Спочатку слід визначити правильну зону складання, а потім виконувати складання.

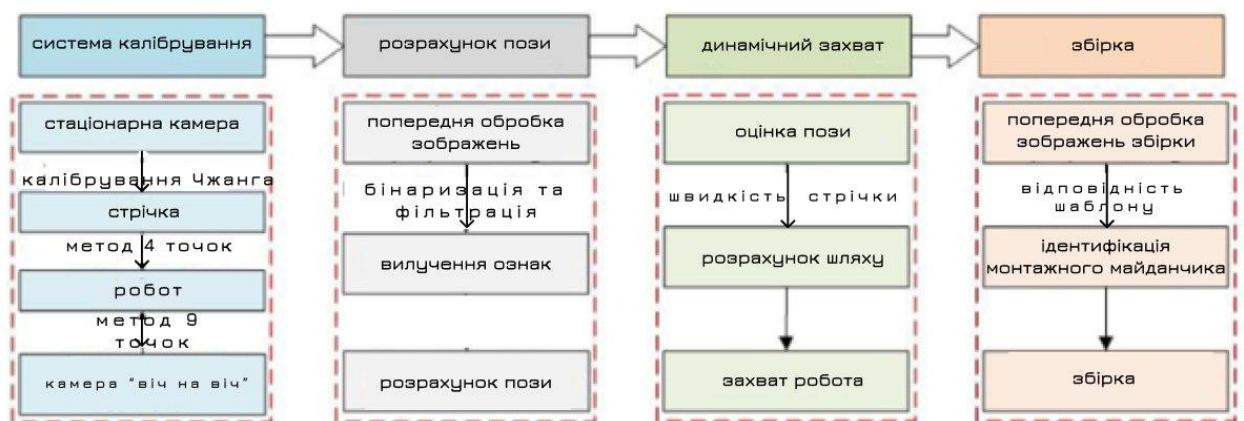


Рисунок 3.4 – Процес складання корпусу виробу

3.2 Пропонований спосіб

У цьому розділі детально описано метод калібрування, визначення положення, динамічне захоплення та зіставлення шаблону. Візуальне керівництво здійснюється для реалізації інтелектуального складання робота деталей і компонентів різних типів під швидкими ударами.

3.2.1 Багатомодульне гібридне калібрування

Багатомодульне гібридне калібрування в основному включає базову систему координат робота $\{B\}$, система координат промислової камери $\{C\}$, і система координат конвеєра $\{T\}$. Кожна система координат складається з осі x , осі y , горизонтального кута повороту θ заготовки і системи координат конвеєра, як, наприклад, калібрувальна ланка для реалізації трансформації та уніфікації системи координат, як показано на рисунку 3.5.

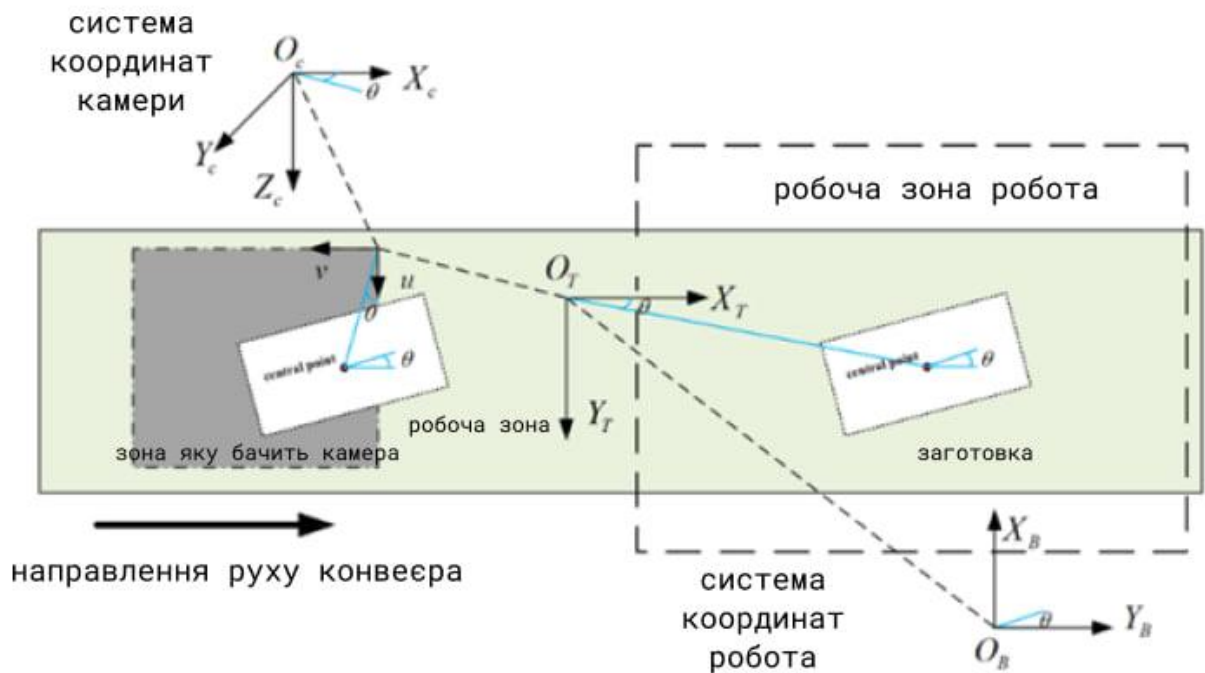


Рисунок 3.5 – Відносні зв'язки між системами координат

Спочатку система зору використовує калібрувальну пластину, об'єднує оператор калібрування HALCON, застосовує метод калібрування [38] для отримання параметрів камери, а потім використовує метод дев'яти точок [35] для отримання зовнішніх параметрів камери. Дані позиції системи координат промислової камери $\{C\}$ представлені TCP в системі координат конвеєра $\{T\}$, і їх вираз такий:

$${}^T_P = \begin{matrix} T_c & R_c \\ 0 & 1 \end{matrix}, \quad (3.1)$$

де R_c – вектор обертання, повернутий навколо осі Z системи координат конвеєра;

T_c являє собою вектор трансляції вздовж осі X і осі Y системи координат конвеєрної стрічки.

Калібрування системи зору та стрічки завершується шляхом перетворення значень координат у піксельній системі координат у значення координат у системі координат конвеєра.

Потім маркер ставиться на конвеєр. Початкова позиція ${}^{B_2}P$ маркера записується, як і позиція ${}^{B_1}P$ після того, як ремінь пройде відстань і кількість імпульсів кодера L_1, L_2 . Співвідношення між двома позиціями таке:

$${}^{B_2}P = {}^{B_2}P \cdot {}^{B_1}P. \quad (3.2)$$

Оскільки процес переміщення заготовки на конвеєрній стрічці є лише трансляцією осі x без обертання, матричний вираз ${}^{B_2}P$ визначається таким чином:

$${}^{B_2}P = \begin{bmatrix} 1 & 0 & x_{b_1b_2} \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (3.3)$$

де $x_{b_1b_2}$ являє собою відстань переміщення заготовки вздовж осі X системи координат конвеєрної стрічки.

Метод розрахунку такий:

$$x_{b_1b_2} = M \cdot L, \quad (3.4)$$

де M вказує на зміну значення осі X імпульсу кодера, що відповідає системі координат конвеєрної стрічки. $L=L_2 - L_1$ являє собою суму імпульсів, повернутих енкодером під час руху деталі.

Коли заготовка виявляється промисловою камерою, з просуванням конвеєрної стрічки, її положення та дані позиції в базовій системі координат робота ${}^B_C P$ механічного плеча виражаються таким чином:

$${}^B_C P = {}^B_{B_1} P \cdot {}^B_{T_1} P \cdot {}^T_C P = \begin{bmatrix} 1 & 0 & M \cdot L \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (3.5)$$

Відповідно до взаємозв'язку трансляції обертання системи координат і швидкості конвеєрної стрічки завершується калібрування конвеєра та робота.

На рисунку 3.6 прийняті наступні позначення: В – фіксована базова система координат руки робота, Е – кінцева система координат руки, а С – система координат камери.

${}^B H_W$ являє собою залежність перетворення базової системи координат у систему координат калібрування, включаючи матрицю обертання та вектор трансляції. ${}^C H_E$ може бути отримано з роботизованої системи. Потім робота перемістили в позицію 1,

$$P_E = {}^B H_{E1} \cdot {}^E H_C \cdot ({}^C H_{C1})^{-1} P_W. \quad (3.6)$$

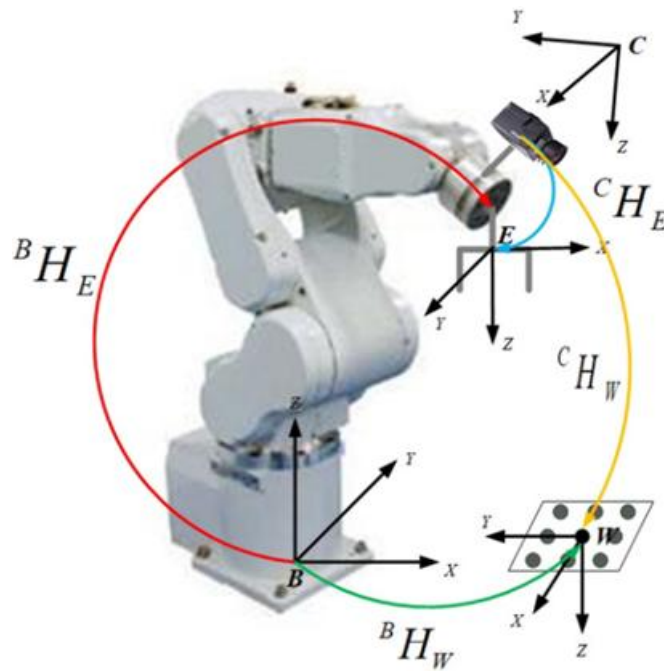


Рисунок 3.6 – Ручне калібрування камери

Оскільки B і W фіксовані, ${}^B H_W$ не змінюється. Тому:

$${}^B H_W = {}^B H_{E1} \cdot {}^E H_C \cdot ({}^W H_{C1}). \quad (3.7)$$

Необхідно зробити перетворення:

$$\begin{aligned} A_1 \cdot X \cdot B_1^{-1} &= A_2^{-1} \cdot A_1 \cdot X, \\ A_2^{-1} \cdot A_1 \cdot X &= X \cdot B_2^{-1} \cdot B_1, \\ AX &= XB. \end{aligned} \quad (3.8)$$

Тоді:

$$\begin{aligned} A_1 \cdot X \cdot B_1^{-1} &= A_2^{-1} \cdot X, \\ A_2^{-1} \cdot A_1 \cdot X &= X \cdot B_2^{-1} \cdot B_1, \\ AX &= XB. \end{aligned} \quad (3.9)$$

Серед них A відоме, X потрібно шукати, а B можна отримати за допомогою калібрування камери (метод калібрування за [37]).

3.3 Визначення положення рухомої деталі з неповною інформацією

У процесі переміщення цільового об'єкта за допомогою стрічки, через високу швидкість руху стрічки та затримку зйомки, захоплений цільовий об'єкт має повторну зйомку та неповну інформацію в полі зору камери. Вивчається метод розпізнавання цілі, заснований на підгонці найменшої прямокутної області зібраних частин, а також поєднання контуру краю та узгодження ознак для реалізації точного виявлення положення рухомої цілі. Перед виконанням виділення контуру виконується сегментація зображення, а виділення переднього плану виконується шляхом бінаризації. Метод бінаризації полягає в наступному:

$$\text{det}(x, y) = \begin{cases} \max \text{ifsrc}(x, y) > \text{threshold} \\ \min \text{otherwise} \end{cases}. \quad (3.10)$$

Встановіть піксель на зображенні, що перевищує порогове значення, як максимальне, а інші пікселі – як мінімальне. Ділянка, де кількість пікселів є максимальною у двійковому зображенні, є областю інтересу (ROI). Щоб подолати проблему деяких крихітних чорних дірок у двійковому зображенні, потрібен замкнутий операційний процес спочатку розширення, а потім розмивання.

Для операції розширення:

$$\text{dst}(x, y) = \text{dilate}(\text{src}(x, y)) = \max \text{src}(x + x', y + y'). \quad (3.11)$$

і для операції ерозії:

$$\text{dst}(x, y) = \text{erde}(\text{src}(x, y)) = \min \text{src}(x + x', y + y'). \quad (3.12)$$

Цільовий контур виділяється за допомогою алгоритму Canny edge detection [39]. Продуктивність цього алгоритму значною мірою залежить від фільтра Гауса та налаштувань верхнього та нижнього порогів. Фільтр Гауса виглядає наступним чином:

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} . \quad (3.13)$$

Для вирішення проблем неповного зображення запропоновано алгоритм мінімального прямокутного підгонки ознакових областей. У поєднанні з характеристиками форми захоплення заготовки мінімальний описаний прямокутник використовується для підгонки ROI заготовки, що з'являється в полі зору камери, а фактичне положення заготовки визначається власним значенням прямокутника.

У піксельній системі координат розмір поля камери – $X*Y$, фактична довжина заготовки – H пікселів, центральна точка заготовки – P_r , а позиція (U,V) . Довжина прямокутної заготовки, розміщеної в полі зору, дорівнює h , а центральна точка P_f координата (u,v) . Кут повороту прямокутної області дорівнює α . Конкретна математична схема показана на рисунку 3.7.

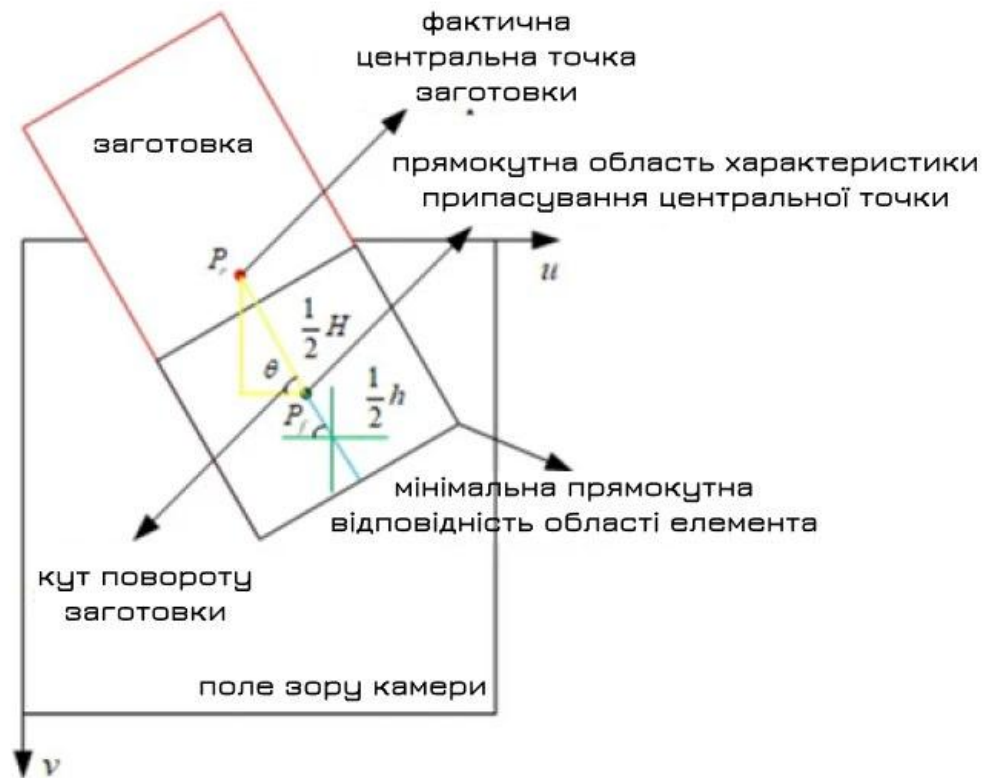


Рисунок 3.7 – Схема оцінки позиції

Отже, фактичне розташування заготовки таке:

$$\begin{bmatrix} U \\ V \end{bmatrix} = \pm \frac{1}{2} (H - h) \begin{bmatrix} \sin \theta \\ \cos \theta \end{bmatrix} \pm \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix}. \quad (3.14)$$

3.4 Динамічне захоплення

Для багатокутного вимірювання цільової заготовки на стрічці локальне та глобальне зображення перемикаються відповідно до ефекту розпізнавання та отримують параметри позиції цільової заготовки в системі координат руки робота [37] разом із вхідне зміщення стрічки та прогнозування в реальному часі послідовності положень цільової заготовки. Розв'язування траєкторії руху кінцевого ефектора робота на основі алгоритму фільтра Калмана [38, 39] забезпечує динамічне відстеження положення цільової заготовки. На основі псевдооберненого рішення матриці Якобі розраховується спільна швидкість руху руки робота та генерується

плавна траєкторія стеження для досягнення плавного захоплення цілі. Процес сканування ділиться на наступні три етапи [35]:

- наближення до цільового об'єкта. Кінець плеча досягає положення готовності, і обчислюється величина зміни положення кінцевого ефектора та цільового об'єкта. Між ними планується N точок траєкторії, і спочатку прискорюється кінець, досягаючи першої точки траєкторії та сповільнюючись до швидкості заготовки для синхронізації з цільовим об'єктом;

- відстеження цільового об'єкта. Траєкторія об'єкта – це бажана траєкторія кінцевого ефектора руки в декартовому координатному просторі, який керується таким чином, щоб продовжувати рухатися слідом за об'єктом. Спільний кут і швидкість, що відповідають кожній точці шляху, можна розв'язати за допомогою псевдооберненої матриці Якобі;

- обрання цільового об'єкту. Коли відстань від заготовки відповідає вимогам, об'єкт засмоктується повітряним насосом, щоб завершити процес захоплення.

3.5 Динамічний метод зйомки

У вузлі кріплення, відповідно до підходу до оцінки області монтажу в контексті людей, статус монтажу оцінюється за допомогою зображень і зсувів монтажу. Зображення отримані та попередньо оброблені. Потім статус онлайн-складання розпізнається через зіставлення шаблону. Кроки такі:

- за допомогою камери знімаються додаткові ракурси зображення;
- сірість, фільтрація та бінаризація виконуються як попередня обробка зображення. Для сірого зображення використовується метод зваженого середнього [40]. Після попередньої обробки послідовностей зображень у реальному часі використовується метод максимальної дисперсії між класами [41], щоб отримати найкращий поріг обробки для виконання обробки бінаризації зображення;

– оброблене зображення захоплюється в області інтересу. Цю область можна визначити таким чином, щоб час обробки системи було зменшено, а обробка в реальному часі, надійність і стабільність покращилися;

– якість збірки визначається відповідністю шаблону. Загальними методами зіставлення шаблонів є квадратична різниця та кореляційна зіставлення. У цьому дослідженні зіставлення шаблону виконується за допомогою нормалізованої дисперсії збігу квадратів.

$$R(x, y) = \frac{\sum x', y' (T(x', y') - I(x+x', y+y'))^2}{\sum x', y' T'(x', y') \cdot \sum x', y' I(x+x', y+y')^2}. \quad (3.15)$$

У наведеному вище $T(x, y)$ це обраний шаблон, $I(x, y)$ є цільовим об'єктом, $R(x, y)$ це вибраний шаблон, $I(x, y)$ є цільовим об'єктом, а $R(x, y)$ є функцією подібності;

– надається результат розпізнавання. Продуктивність, заснована на зіставленні шаблонів, значною мірою залежить від якості бази даних шаблонів.

3.6 Збірка пристрою

Загальний процес складання такий, як показано в Алгоритмі 1 і на рисунку 3.8.

Алгоритм 1 – Мінімальна підгонка прямокутника області ознаки.

Initialize parameters:

The workpiece position (u, v)

Actual position of workpiece (U, V)

Workpiece rotation angle θ

while true do

Trigger camera to take pictures

Extract the rectangular area data of workpiece

if $v \leq 1/2 Y$ $v \leq 1/2 Y$ then

if $\theta \leq \pi/2$ $\theta \leq \pi/2$ then

$$U \leftarrow u - 1/2(H-h)\sin\theta \quad U \leftarrow u - 1/2(H-h)\sin\theta$$

$$V \leftarrow v + 1/2(H-h)\cos\theta \quad V \leftarrow v + 1/2(H-h)\cos\theta$$

else

$$U \leftarrow u + 1/2(H-h)\sin\theta \quad U \leftarrow u + 1/2(H-h)\sin\theta$$

$$V \leftarrow v - 1/2(H-h)\cos\theta \quad V \leftarrow v - 1/2(H-h)\cos\theta$$

end if

else

if $\theta \leq \pi/2$ $\theta \leq \pi/2$ then

$$U \leftarrow u + 1/2(H-h)\sin\theta \quad U \leftarrow u + 1/2(H-h)\sin\theta$$

$$V \leftarrow v - 1/2(H-h)\cos\theta \quad V \leftarrow v - 1/2(H-h)\cos\theta$$

else

$$U \leftarrow u - 1/2(H-h)\sin\theta \quad U \leftarrow u - 1/2(H-h)\sin\theta$$

$$V \leftarrow v + 1/2(H-h)\cos\theta \quad V \leftarrow v + 1/2(H-h)\cos\theta$$

end if

end if

Convert U, V to base coordinate system data (x, y)

Socket communication

Robot motion path planning

$$q = [\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6] \quad Tq = \theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6 T$$

Assembly area template matching

$$R(x, y) = \frac{\sum_{x', y'} (T(x', y') - I(x+x', y+y'))^2}{\sqrt{\sum_{x', y'} T'(x', y')^2 \cdot \sum_{x', y'} I(x+x', y+y')^2}}$$

Socket communication

Converted robot coordinates(x,y)to assembly area
coordinates(x'x', y'y')

Finish the assembly

end while

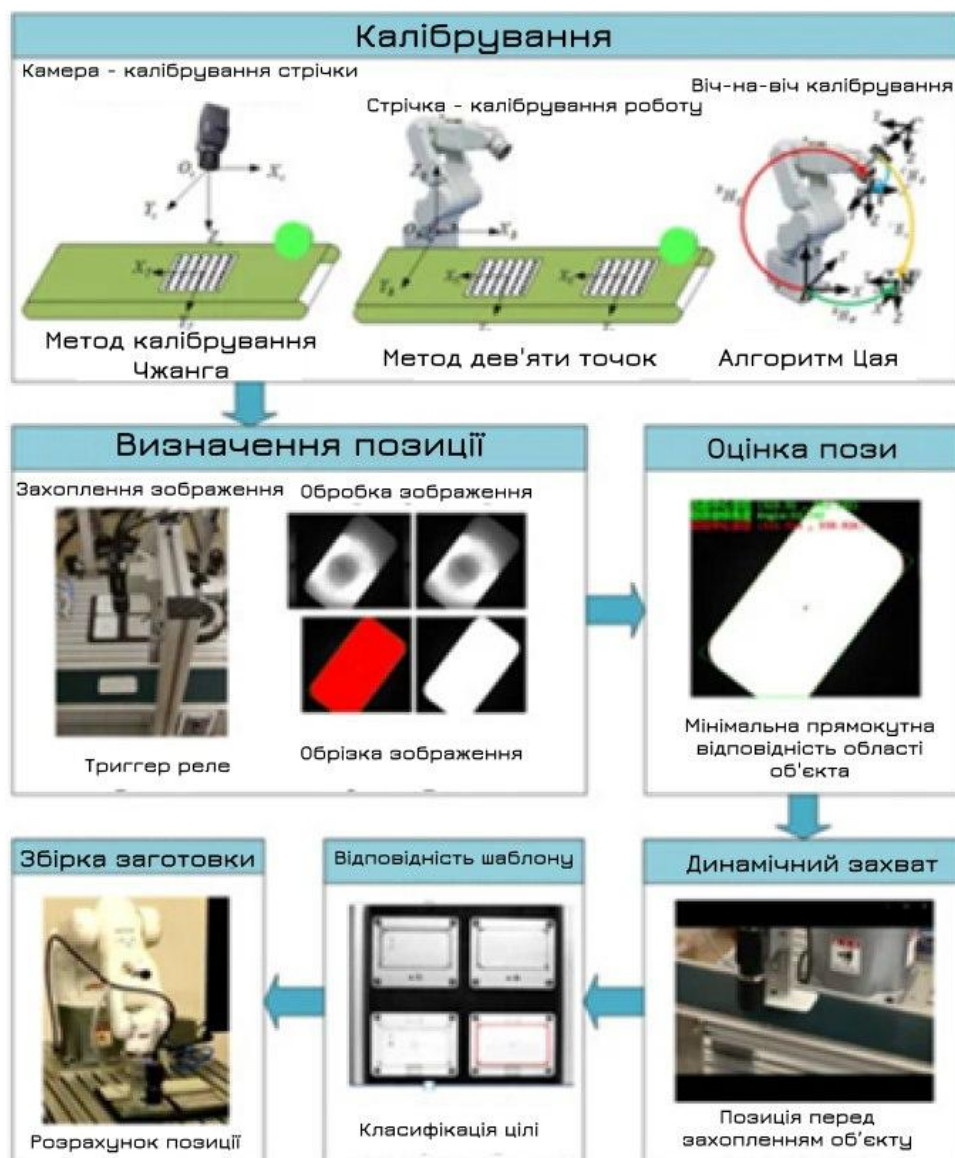


Рисунок 3.8 – Монтажна схема

Взаємне перетворення між різними системами координат встановлюється за допомогою модульного гібридного калібрування стрічкової камери. Потім камера активується реле, щоб зробити фотографію, і вона виявляється в режимі реального часу, коли деталь проходить через поле зору камери, отримуючи таким чином положення деталі в піксельній системі координат. Мінімальна позиція характерної області використовується для визначення фактичної позиції заготовки

Система зчитує число імпульсів кодера в режимі реального часу, встановлює положення робота перед повзанням, обчислює відстань переміщення конвеєра, чекає на прибуття заготовки та динамічно захоплює заготовку для завантаження на основі методу прогнозованого керування моделлю для реалізації функція попередньої вибірки. За допомогою калібрування кисті руки робота встановлюється зв'язок між положенням руки та площею навантаження. Метод зіставлення шаблону використовується для визначення позиції, яку потрібно зібрати, і рука робота направляється до місця складання для реалізації функції складання.

3.7 Висновки до розділу 3

В цьому розділі було досліджено систему автоматизації складання мобільних телефонів за допомогою робототехнічних рішень. Аналіз показав, що перехід від ручного або напівавтоматичного складання до повністю автоматизованого значно підвищує ефективність виробничих процесів, а також не лише знижує витрати на робочу силу, а й збільшує гнучкість виробничих ліній. Така система має можливість працювати з різними типами деталей, використовуючи, до прикладу, роботизовану руку, систему зору та конвеєрну стрічку для виконання процесів складання.

Ключовими етапами системи є калібрування, визначення позиції деталей, динамічне захоплення об'єктів та збирання об'єктів. Для вирішення проблем позиціонування було розроблено алгоритм мінімального

прямокутника, який забезпечує точне виявлення розташування заготовки навіть в умовах відсутності повної інформації. Додатково було впроваджено модульне калібрування, яке дозволяє уніфікувати системи координат робота, камери та конвеєра, що в свою чергу підвищує точність взаємодії між компонентами системи.

Методологія динамічного захоплення базується на прогнозуванні руху деталей із використанням фільтра Калмана та псевдообернених матриць Якобі для створення більш плавної траєкторії руху робота. Крім того, для визначення положення та складання використовується метод зіставлення шаблонів, який дозволяє швидко і точно визначати зону складання та направляти роботизовану руку в необхідне місце.

У результаті така система підтвердила свою ефективність у складанні мобільних телефонів, забезпечивши високу точність позиціонування деталей, а також автоматизацію збору компонентів і зниження витрат. Такий підхід може бути адаптований для інших галузей промисловості, де необхідна автоматизація складання складних виробів.

4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

4.1. Налаштування експериментів

Для перевірки ефективності запропонованого способу були проведені досліди. Як показано на рисунку 4.1, у цій системі використовується рука робота LR4-R560 компанії Suzhou LINKHOU Robot Co., Ltd у Китаї [42].

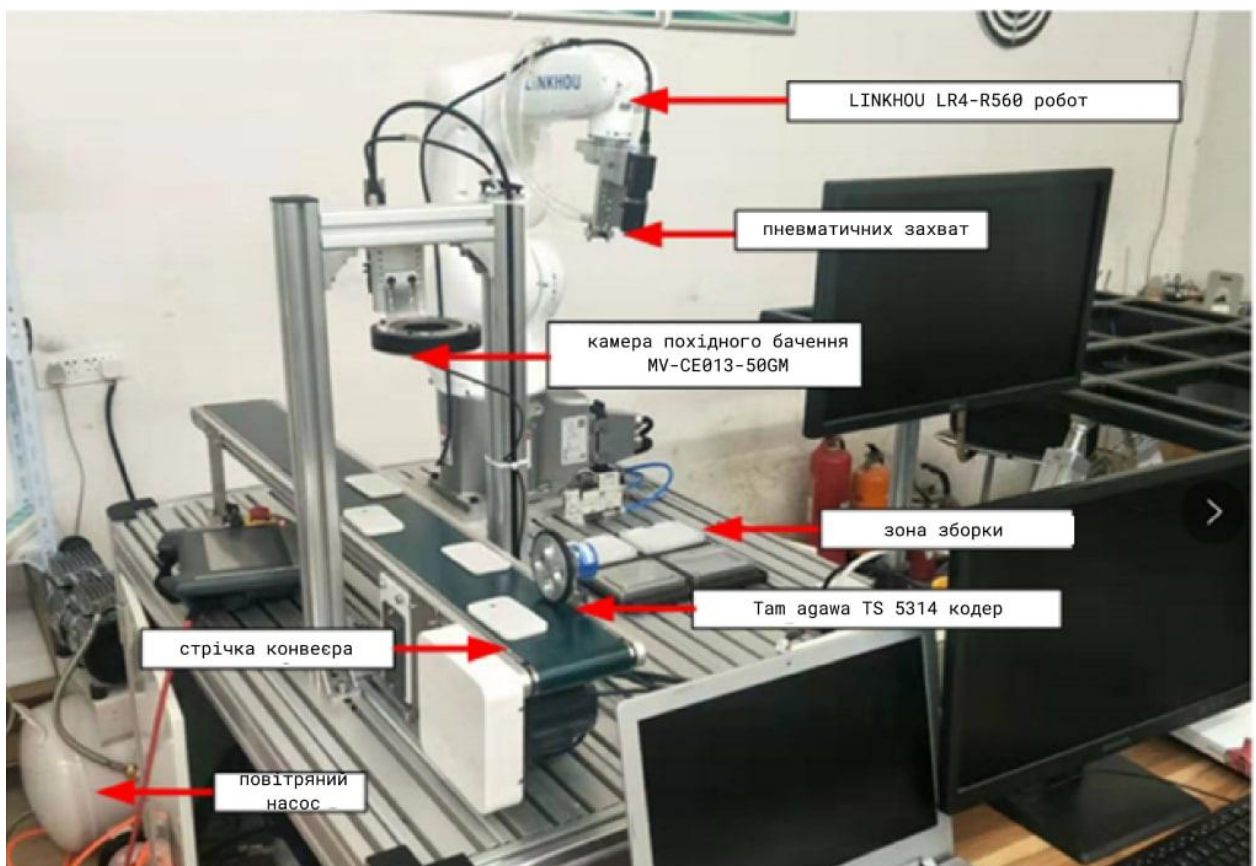


Рисунок 4.1 – Загальний вид стану для проведення експерименту

Параметри наведено в таблиці 4.1. Основні компоненти включають в себе підвіску навчання, механічний корпус і шафу керування, які є приводами монтажної дії. Завантажувальна частина вузла компонента мобільного телефону складається з стрічки та кодера для формування модуля руху системи.

Таблиця 4.1 – Параметри роботи робота

Атрибути	Точність	Кількість осей	Радіус	Навантаження
Значення	0,02 мм	6	560 мм	4 кг

Матрична камера промислової зони Hikvision була використана для формування модуля огляду, включаючи фіксовану камеру з оком позицією руки та рухому камеру з оком на руці. Це в основному використовувалося для виявлення цілі складання частин мобільного телефону, для визначення позиціонування заготовки, яку потрібно завантажити, і для того, щоб робот досягнув цільової позиції.

Складальний модуль в основному включає кінцеве пристосування та монтажний верстак. Система використовує присоски для захоплення та розміщення частин мобільного телефону, а верстак використовується для розміщення частин, які збираються.

Система використовує передню та задню кришки мобільного телефону як об'єкт складання. Тестування алгоритму покладається на промислові комп'ютери з операційною системою win10.

Через клієнт камери машинного бачення Hikvision MVS SDK V2.3.1 для встановлення зв'язку з камерою використовувалася мова C++. Зображення, зібрані камерою, обробляються оператором Halcon за допомогою мови C#. Зв'язок із роботом було встановлено через протокол керування передачею/Інтернет-протокол (TCP/IP) і керування роботом для захоплення заготовки. Програми запускалися у Visual Studio 2013.

4.2 Багаторазове модульне гібридне калібрування та визначення позиції

У полі зору камери було зроблено від 15 до 20 калібрувальних фотографій Halcon з різними положеннями, а вісь системи координат з позитивним напрямком пояса вздовж x була обрана як опорна система координат конвеєра. Потім була витягнута інформація про функції

калібрувальної пластини та розраховані зовнішні параметри камери. Взаємозв'язок трансформації між базовою системою координат робота та системою координат конвеєрної стрічки можна отримати шляхом зчитування даних базової координати робота чотирьох точок у системі координат конвеєрної стрічки з навчального пристрою, а точність передачі конвеєрної стрічки може бути розраховано, як показано на рисунку 4.2. Результати калібрування наведено в таблиці 4.2.

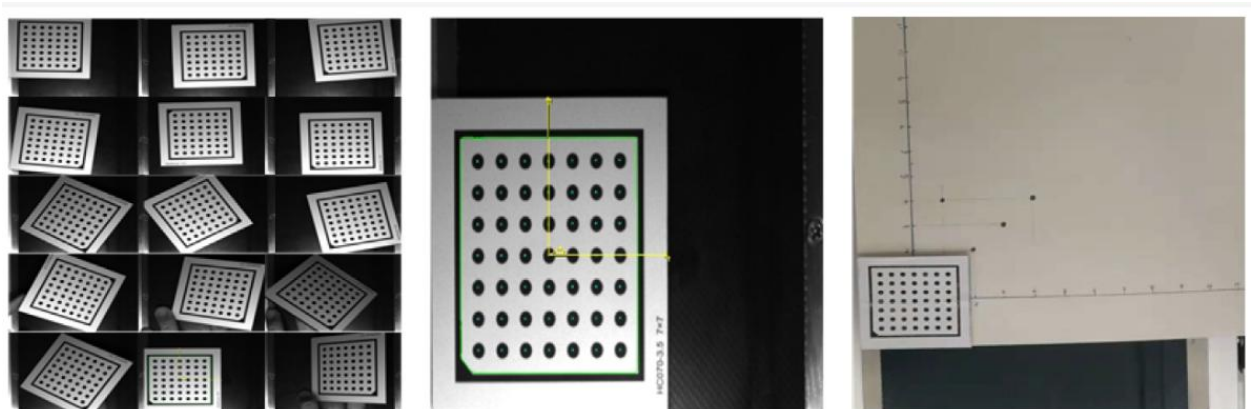


Рисунок 4.2 – Гібридне модульне калібрування камери-конвеєра-робота.

Таблиця 4.2 – Результати калібрування

Параметр	Значення	Одиниця
Помилка калібрування камери	0,0467	піксель
R_C	(0,656, 359,961)	градус
T_C	(-22,521, -2,042)	мм
R_B	(89,325, 179,651)	градус
T_B	(321,251, 251,325)	мм
M	10,305	лінії/мм

Маючи два види повної інформації та чотири види неповної інформації заготовок, які можуть з'явитися в полі зору, метод мінімального прямокутника прийнято для розрахунку фактичних положень і позицій заготовок відповідно, як показано на рисунку 4.3.

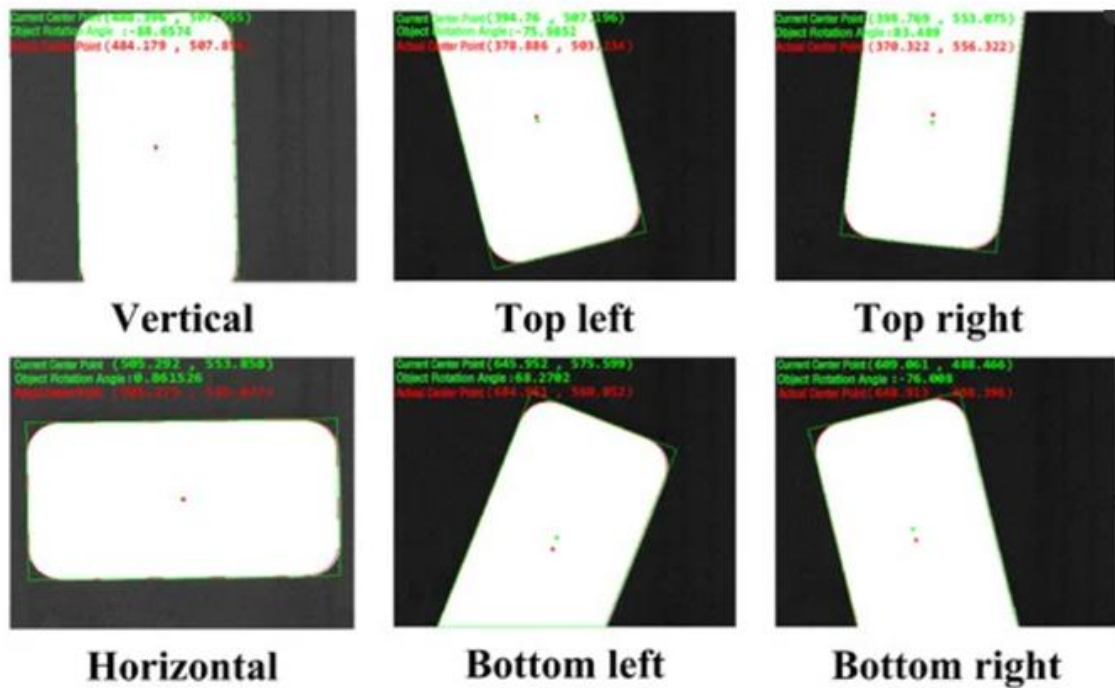


Рисунок 4.3 – Оцінка неповної інформації про розташування

Щоб визначити точність оцінки позиції, задню оболонку мобільного телефону помістили в поле зору промислової камери, щоб запустити промислову камеру для фотографування та розрахунку теоретичної позиції розрахунку якого повинен досягти робот. Одноетапне виконання роботизованої програми: робот приходить до точки попереднього захоплення, щоб почекати, відкриває конвеєрну стрічку, щоб перемістити задню кришку мобільного телефону в оптимальне положення для захоплення робота, і вручну керує кінцевим затискачем щоб робот дістався до центру задньої панелі мобільного телефону. Фактична позиція робота в цей момент записується та порівнюється з даними двох поз.

З таблиці 4.3 максимальна похибка визначення одновісних координатних даних кожної заготовки становить 0,5 мм, а похибка визначення положення – 0,8 градуса, що відповідає технологічним вимогам механічної руки для автоматичного поглинання задньої частини мобільного телефону. і помістіть його в місце, де потрібно зібрати, за допомогою вакуумного патрона.

Таблиця 4.3 – Результати визначення позиції

	1	2	3
Визначена камерою позиція	488,396, 507,995, -88,45°	394,760, 467,125, 84,74°	609,061, 543,858, -76,69°
Теоретична розрахункова позиція	152,458, 245,584, -88,45°	171,821, 245,584, 84,74°	131,254, 245,584, -76,69°
Фактична тестова позиція	152,953, 245,557, -87,76°	171,411, 245,544, 83,97°	131,695, 245,567, -76,06°
Похибка осі X	0,495 мм	0,41 мм	0,441 мм
Кутова похибка	0,69°	0,77°	0,63°

У системі для заготовок, що виходять за межі поля зору, потрібно близько 6 с, щоб розпізнати та захопити заготовку. У нашому методі швидкість конвеєра може бути узгоджена для досягнення швидкого захоплення в реальному часі. Захоплення заготовки займає близько 2 с, вона може досягати при швидкості конвеєра 90 мм/с з неповною інформацією.

З точки зору точності, горизонтальна похибка нашого положення захоплення становить близько 1 мм. Порівняно зі спеціальним обладнанням, наша робототехнічна система є більш універсальною та може використовуватися повторно, щоб задовольнити різні вимоги складання модулів у інженерії. Вартість промислового виробництва буде знижена, і воно більше підходить для дрібносерійного виробництва на основі замовлення.

4.3 Динамічний хват

Спочатку робота встановлювали у вихідне положення, а стрічку встановлювали на 10 мм/с. Коли цільова деталь рухається, камера обчислює позицію деталі та вимірюється швидкість стрічки. Потім оцінюється цільове положення заготовки. Таким чином, генерується стеження за рукою робота, і

рух робота контролюється так, що кінець і заготовка залишаються відносно нерухомими протягом короткого часу. Нарешті, після того як камера виявить, що цільова заготовка відповідає кінцівці робота, вона може засмоктати цільову заготовку та захопити. Для порівняльних експериментів швидкість обертання стрічки встановлювалася від 50 мм/с до 90 мм/с. Крім того, враховуючи ситуацію, яка може виникнути на практиці, був розроблений набір експериментів зі змінною швидкістю. Стрічка спочатку рухала заготовку з нижчою початковою швидкістю (8 мм/с), а потім поступово прискорювала швидкість стрічки до 90 мм/с, щоб перевірити ефект захоплення системи. Динамічне відстеження було досягнуто за допомогою різних швидкостей стрічки та умов перемикавання. Результати калібрування динамічного захоплення наведено в таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 – Результати динамічного захоплення

Номер	Швидкість захоплення	Коефіцієнт успішності
1	10 (мм/с)	100%
2	50 (мм/с)	100%
3	90 (мм/с)	100%
4	80–90 (мм/с)	100%

4.4 Результати ідентифікації монтажної зони

Рука робота успішно захоплює цільову заготовку та переміщує руку робота до верхньої частини зони складання стрічки. Камера на роботизованій руці робить знімок ситуації в області складання в реальному часі, стискає зображення отриманої області складання в реальному часі, виділяє область ROI та виконує іншу попередню обробку, а також порівнює її з шаблоном у попередньо створена бібліотека шаблонів. OpenCV і VS2015 використовувалися для отримання координат піксельних значень і положення центральної точки області, яку потрібно зібрати, що відповідає

задній панелі мобільного телефону на зображенні області в реальному часі, яку потрібно зібрати, як показано на рисунку 4.4.

Координати передаються на руку робота через координати калібрування ока руки, і складання задньої кришки мобільного телефону завершено.



Рисунок 4.4 – Результати зіставлення шаблону

4.5 Тест на збірку

Експерименти зі складання проводили на трьох різних швидкостях стрічки. Два типи матеріалів (метал (рис. 4.5, а) і пластик (рис. 4.5, б)) показані на рисунку 4.5. Для загального процесу складання було створено шість груп експериментів.

Процес складання показано на рисунку 4.6.



а)

б)

Рисунок 4.5 – Два види матеріалів для телефону

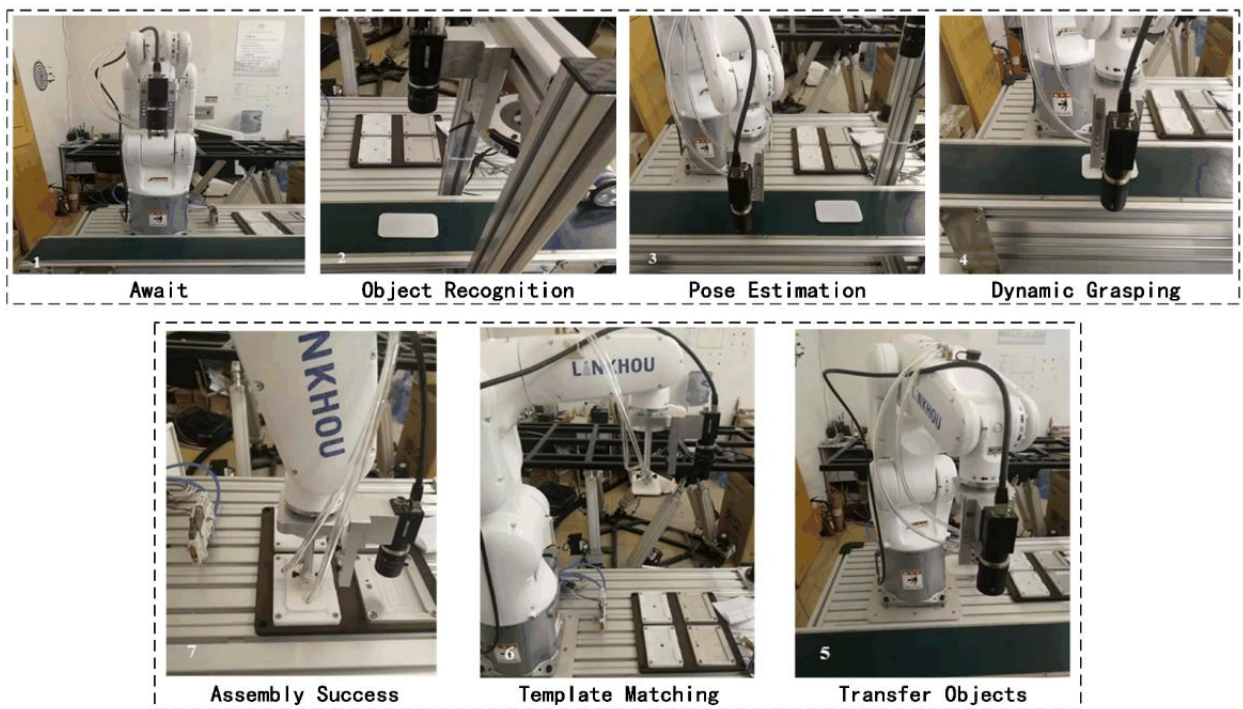


Рисунок 4.6 – Загальний процес складання

Було проведено три експерименти з початковим положенням (рис. 4.7). Середній час складання становив 6 секунд.

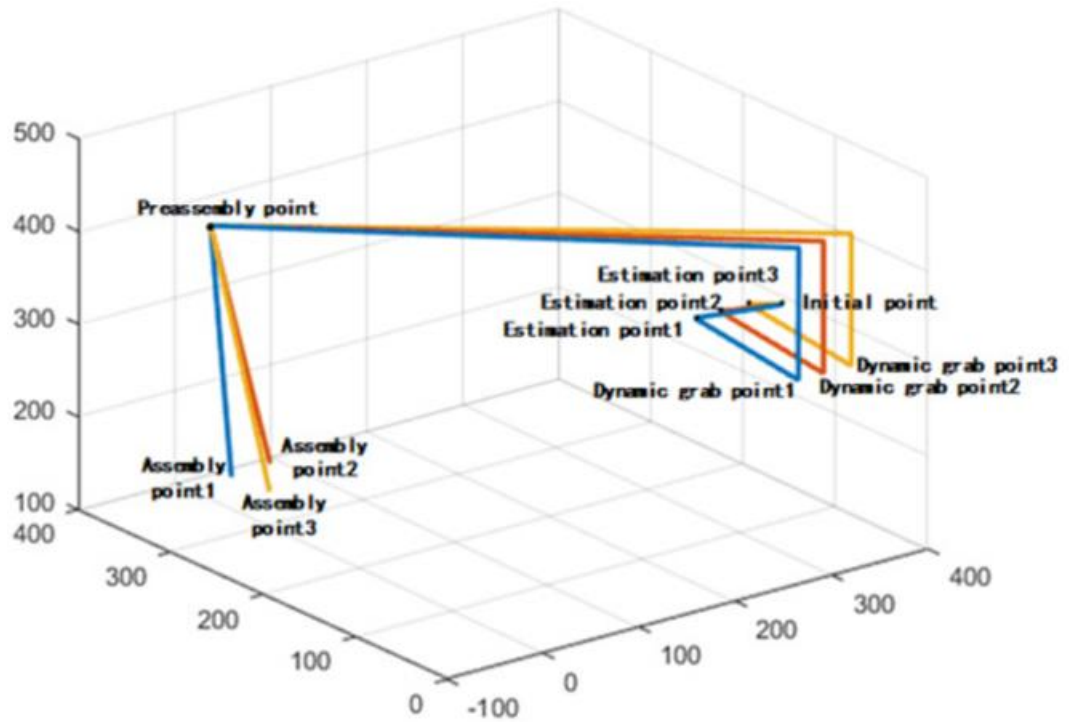


Рисунок 4.7 – Траєкторії роботи різних початкових точок

Кожна група експериментів включала 100 раундів перевірки успішності складання робота. З таблиці 4.5 показник успіху складання досяг понад 98% на різних швидкостях.

Таблиця 4.5 – Частота успішного складання.

Тип телефону	Швидкість лінії	Швидкість успішного складання
Тип1	10 мм/с	99%
	50 мм/с	98%
	90 мм/с	98%
Тип 2	10 мм/с	99%
	50 мм/с	98%
	90 мм/с	98%

Промисловий робот може гнучко виконувати різні дії в одному циклі дії, тому можна замінити функцію багатьох складних частин на спеціальній

складальній машині, що значно зменшує складність складання. У запропонованій робототехнічній системі проблему різних об'єктів складання було вирішено за допомогою алгоритмів виявлення позиції та розпізнавання зони складання, які базувалися на машинному зорі в процесі складання. Складання різних типів деталей було завершено за допомогою стаціонарної камери та камери ручного ока. Цільовий об'єкт у полі зору виявляється та вибирається точно. Але точність виявлення системи потребує покращення. Причиною може бути те, що геометричні центральні точки були замість монтажних мішеней. Кращу обробку зображень і алгоритм виділення ознак слід вивчати в системі зору.

4.6 Забезпечення безпечних умов праці при проведенні експерименту

Забезпечення безпечних умов праці під час такої роботи є важливим аспектом, який враховує безпеку персоналу на всіх етапах проектування, впровадження та обслуговування системи. Робочі зони обов'язково мають бути чітко відокремлені від зон для роботи роботів, оскільки необхідно уникнути контакт персоналу з рухомими частинами обладнання. Це досягається за допомогою захисних бар'єрів, світлових та звукових сигналів, а також обмеження доступу до небезпечних зон. [43]

Електробезпека системи забезпечується через заземлення всіх елементів обладнання відповідно до стандартів. Окрім того, встановлюються пристрої автоматичного відключення, які захищають від коротких замикань або перевантажень при непередбачуваній ситуації. Під час обслуговування системи персонал використовує діелектричні рукавички, килимки та інші засоби захисту від струму.

Програмування та налаштування системи проводяться переважно у стані знеструмленого обладнання. У випадках, коли це неможливо, налаштування потрібно виконувати дистанційно через захищений інтерфейс, щоб виключити фізичний контакт із роботом.

Робототехніка значно знижує фізичні навантаження на працівників, однак необхідна також правильна організація їхніх робочих місць. Для цього необхідно забезпечити ергономічність робочих станцій, достатнє освітлення та вентиляцію.

Шум і вібрація, які створюються робототехнічним обладнанням, повинні бути також мінімізовані. Для цього використовується шумоізоляційний матеріал та віброізолюючі підставки. Персонал, який працює в зоні підвищеного шуму також має бути забезпечений засобами захисту слуху, такими як спеціальні навушники або беруші.

Важливим аспектом є навчання персоналу. Усі працівники, які беруть участь у впровадженні, експлуатації та обслуговуванні системи, мають пройти відповідне навчання та ознайомитися з технікою безпеки. Вони повинні знати правила роботи з роботами, основи безпеки та алгоритм дій у разі аварійних ситуацій.

Для запобігання аваріям у системі впроваджується механізм аварійного вимкнення, який буде дозволяти швидко зупинити роботу у разі небезпеки. Робочі приміщення мають бути обладнані пожежною сигналізацією, вогнегасниками та планами евакуації.

На етапі проектування проводиться детальний аналіз ризиків. Цей аналіз допомагає передбачити потенційні небезпеки для персоналу та обладнання, що враховується при виборі компонентів, налаштуванні системи та організації робочого процесу.

Забезпечення безпеки праці є невіддільною частиною процесу розробки робототехнічної системи. Виконання вищезазначених заходів дозволяє мінімізувати ризики травматизму, підвищити ефективність роботи персоналу та забезпечити тривалу й безпечну експлуатацію системи.

4.7 Висновки до розділу 4

Визначені проблеми, такі як багатоваріантне калібрування, динамічна вибірка та ідентифікація заготовки для встановлення, були вирішені запропонованими методами.

У поєднанні з гібридним модульним калібруванням камери-конвеєра-робота алгоритм мінімального прямокутного підгонки ознакової області використовується для вирішення неповної інформації про деталь на конвеєрній стрічці. Траєкторія руху кінцевого ефектора робота забезпечує динамічне відстеження положення цільової заготовки на основі алгоритму фільтра Калмана.

Зіставлення шаблону використовується для ідентифікації заготовки, яка збирається. Запропоновані способи виконувалися на побудованій платформі. Результати експерименту показують, що максимальна похибка виявлення знаходиться в межах 0,5 мм і 0,8 градусів.

Робот міг забрати заготовку зі 100% успіхом на різних швидкостях конвеєра, навіть якщо цільовий компонент надавав неповну інформацію. Два різних типи телефонів були успішно зібрані. Ключові технології, розроблені в цьому документі, будуть застосовані до ключового обладнання автоматичної виробничої лінії роботів.

Це дозволить ефективно підвищити кваліфікований рівень продукції, значно підвищити ринкову конкурентоспроможність цільової продукції та мати широкий ринковий простір.

ВИСНОВКИ

В ході роботи було проведено всебічне дослідження, яке присвячене оптимізації складальних процесів із використанням сучасних технологій, зокрема робототехнічних систем та ощадливого виробництва. Було розглянуто автоматизацію складання мобільних телефонів, що включає впровадження нових алгоритмів, системи зору та модульного калібрування.

Робота починається з аналізу вже існуючих методів підвищення ефективності виробництва, таких як ощадливе виробництво, Six Sigma, теорія обмежень, гнучке виробництво та симуляційні технології. Такий аналіз дає основу та фундамент для розробки нових підходів, що зменшують втрати, підвищують якість і забезпечують гнучкість виробництва.

Також було запропоновано та реалізовано інноваційну модель відкритого складання, яка буде забезпечувати стандартизоване представлення взаємозв'язків між компонентами, їхніми функціями та допусками. Завдяки використанню стандартів ISO вдалося досягти високої точності при моделюванні геометричних параметрів та кінематики компонентів.

Основна частина дослідження була спрямована на реалізації автоматизованої системи складання мобільних телефонів. Використано модульне калібрування для інтеграції систем координат робота, камери та стрічки конвеєра, що підвищить безпосередню точність позиціонування. Розроблено алгоритм мінімального прямокутника, який вирішує проблему позиціонування об'єктів з неповною інформацією. Крім того, застосовано алгоритми динамічного захоплення на основі фільтра Калмана, які і забезпечують точність роботи робота навіть на високих швидкостях руху стрічки конвеєра.

Відповідно експериментальні дослідження підтвердили ефективність запропонованих методів. Робот зміг виконувати складання з точністю до 0,5

мм та 0,8 градусів, досяг показника успішності понад 98% на різних швидкостях. Система показує свою адаптивність до складання різних типів телефонів, що свідчить про її гнучкість, універсальність та перспективність.

Загалом, вся виконана робота підтвердила, що запропоновані рішення можуть бути ефективно використані в умовах сучасного виробництва для автоматизації складних процесів. Вони здатні вагомо підвищити продуктивність, якість та гнучкість виробничих систем, а також знизити витрати на робочу силу та інші ресурси.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Robot Manipulator Control Systems Comparison within the concepts Industry 5.0 and Industry 4.0 / V. Yevsieiev, Amer Abu-Jassar, S. Maksymova, N. Demska // SYNAPSES: Insights Across the Disciplines. 2024. 1(5). P. 117-127.
2. Miqueo, A., Torralba, M., & Yagüe-Fabra, J. A. (2020). Lean manual assembly 4.0: A systematic review. *Applied Sciences*, 10(23), 8555.
3. Методичні вказівки з підготовки та захисту кваліфікаційної роботи здобувачами другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка, освітньо-професійних програм: «Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва», «Комп'ютеризовані та робототехнічні системи» / Упоряд. І. Ш. Невлюдов, Р. В. Артюх, В. В. Безкоровайний, Н. П. Демська, В. В. Євсєєв, О. І. Филипенко, О. М. Цимбал. Харків: ХНУРЕ, 2024. 57 с.
4. ДСТУ 3008: 2015. Інформація та документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення. К.: ДП "УкрНДНЦ". 2016. 30 с.
5. Петров Е. С. Аналіз методів підвищення ефективності складального виробництва за принципами Lean Production //«Автоматизація та приладобудування» ADED-2024, Випуск 2, с. 126-129
6. Faccio M, Ferrari E, Gamberi M, Pilati F (2019) Human Factor Analyser for work measurement of manual manufacturing and assembly processes. *Int J Adv Manuf Technol* 103:861–877.
7. Anoop, G. M., & Muhammed, V. S. (2020). A brief overview on Toyota Production System (TPS). *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, 8(5), 2505-2509.
8. Мельник, А. О., Голембо, В. А., & Бочкарьов, О. Ю. (2019). Наукова спадщина засновника кібернетики Норберта Вінера. *Комп'ютерні системи та мережі*, 1(1), 1-8.
9. Palange, A., & Dhattrak, P. (2021). Lean manufacturing a vital tool to

enhance productivity in manufacturing. *Materials Today: Proceedings*, 46, 729-736.

10. Abd Rahman, M. S. B., Mohamad, E., & Abdul Rahman, A. A. B. (2021). Development of IoT—enabled data analytics enhance decision support system for lean manufacturing process improvement. *Concurrent Engineering*, 29(3), 208-220.

11. Widjajanto, S., Purba, H. H., & Jaqin, S. C. (2020). Novel POKA-YOKE approaching toward industry-4.0: A literature review. *Operational Research in Engineering Sciences: Theory and Applications*, 3(3), 65-83.

12. Ciano, M. P., Dallasega, P., Orzes, G., & Rossi, T. (2021). One-to-one relationships between Industry 4.0 technologies and Lean Production techniques: a multiple case study. *International journal of production research*, 59(5), 1386-1410.

13. Osadchy, S., Demska, N., Oleksandrov, Y., & Nevliudova, V. (2021). Research of DIKW and 5C architectural models for creation of cyber-physical production systems within the concept of Industry 4.0. *Innovative technologies and scientific solutions for industries*, (1 (15), 132–140

14. Pagliosa, M., Tortorella, G., & Ferreira, J. C. E. (2021). Industry 4.0 and Lean Manufacturing: A systematic literature review and future research directions. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 32(3), 543-569.

15. Berhe, H. H. (2022). Application of Kaizen philosophy for enhancing manufacturing industries' performance: exploratory study of Ethiopian chemical industries. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 39(1), 204-235.

16. Hardcopf, R., Liu, G. J., & Shah, R. (2021). Lean production and operational performance: The influence of organizational culture. *International Journal of Production Economics*, 235, 108060.

17. Arista, R., Zheng, X., Lu, J., & Mas, F. (2023). An Ontology-based Engineering system to support aircraft manufacturing system design. *Journal of Manufacturing Systems*, 68, 270-288.

18. ДСТУ ISO 10303-108:2007 Системи промислової автоматизації та інтеграції. Представлення даних щодо виробів та обміну даних. Частина 108. Інтегрований прикладний ресурс. Визначення параметрів та обмеження для визначених геометричних моделей виробів (ISO 10303-108:2005/Cor 2:2014, IDT). Поправка № 2:2019

19. ДСТУ ISO 10303-105:2019 Системи промислової автоматизації та інтеграції. Подання даних щодо виробів та обміну даними. Частина 105. Інтегрований прикладний ресурс. Кінематика (ISO 10303-105:2019, IDT)

20. ДСТУ EN ISO 1101:2018 Технічні вимоги до геометричних характеристик продукції (GPS). Визначення геометричних допусків. Допуски форми, орієнтації, розташування та биття (EN ISO 1101:2017, IDT; ISO 1101:2017, IDT)

21. Osman, H., Azab, A., Hasan, R. B., & Baki, F. (2024). Mass customization using hybrid manufacturing and smart assembly: An optimal configuration and platform design approach. *Manufacturing Letters*, 41, 124-132.

22. Zhao, R., Zou, G., Su, Q., Zou, S., Deng, W., Yu, A., & Zhang, H. (2022). Digital twins-based production line design and simulation optimization of large-scale mobile phone assembly workshop. *Machines*, 10(5), 367.

23. Tong, Y., Liu, H., & Zhang, Z. (2024). Advancements in humanoid robots: A comprehensive review and future prospects. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 11(2), 301-328.

24. Michalík, R., Janota, A., Gregor, M., & Hruboš, M. (2021). Human-Robot motion control application with artificial intelligence for a cooperating yumi robot. *Electronics*, 10(16), 1976.

25. Capu, S., Rincon, L., Coronado, E., Hagane, S., Yamaguchi, S., Leve, V., ... & Venture, G. (2022). Expanding the Frontiers of Industrial Robots beyond Factories: Design and in the Wild Validation. *Machines*, 10(12), 1179.

26. Hara, T., Sato, T., Ogata, T., & Awano, H. (2023). Uncertainty-aware haptic shared control with humanoid robots for flexible object manipulation. *IEEE Robotics and Automation Letters*.

27. Ritschel, N., Kovalenko, V., Holmes, R., Garcia, R., & Shepherd, D. C. (2020). Comparing block-based programming models for two-armed robots. *IEEE Transactions on Software Engineering*, 48(5), 1630-1643.
28. Development and Investigation of Vision System for a Small-Sized Mobile Humanoid Robot in a Smart Environment / Abu-Jassar, A. T., Attar, H., Amer, A., Lyashenko, V., Yevsieiev, V., & Solyman, A. *International Journal of Crowd Science*
29. One approach to find optimal controls for discrete dynamic systems with numerical methods application / Nevliudov, I., Omarov, M., Romashov, Y., Muradova, V., Vzesnevsky, M. *Advanced Mathematical Models and Applications*, 2023, 8(3), P. 548–564
30. Nevliudov, I., Tsymbal, O., Bronnikov, A. (2022). Fuzzy Decision-Making for Intelligent Robotic System. In: Sergiyenko, O. (eds) *Optoelectronic Devices in Robotic Systems*. Springer, Cham. pp. 227 – 255
31. Numerical calculation of the electromagnetic torque of an induction motor with a hollow rotor/ Gritsyuk V., Nevliudov I., Zablodskiy M., Demska N. Paper presented at the International Conference on Perspective Technologies and Methods in MEMS Design, 2021-May 124-129
32. Object Recognition for a Humanoid Robot Based on a Microcontroller / I. Nevliudov, V. Yevsieiev, N. Demska, K. Kolesnyk, O. Miliutina. *International Conference on Perspective Technologies and Methods in MEMS Design*, 2022-September, pp. 61 – 64
33. Safe Transportation of Nuclear Fuel Assemblies by Means of Wheeled Robotic Platforms // Alyokhina, S., Nevliudov, I., Romashov, Y. *Nuclear and Radiation Safety* ,2021, 3(91), pages 43–50
34. Pancholi, S., Wachs, J. P., & Duerstock, B. S. (2024). Use of artificial intelligence techniques to assist individuals with physical disabilities. *Annual Review of Biomedical Engineering*, 26.
35. Song, R., Li, F., Fu, T., & Zhao, J. (2020). A robotic automatic assembly system based on vision. *Applied Sciences*, 10(3), 1157.

36. Fu, T., Li, F., Zheng, Y., Quan, W., Song, R., & Li, Y. (2019, October). Dynamically grasping with incomplete information workpiece based on machine vision. In 2019 IEEE International Conference on Unmanned Systems (ICUS) (pp. 502-507). IEEE.

37. Посашков, О., & Цимбал, О. (2024). Розроблення архітектури системи віддаленого доступу до навчального лабораторного обладнання з використанням автоматизованих рішень. Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості, (3 (29)), 64-75.

38. Zhang, Z. (2021). Camera calibration. In *Computer vision: a reference guide* (pp. 130-131). Cham: Springer International Publishing.

39. Sekehravani, E. A., Babulak, E., & Masoodi, M. (2020). Implementing canny edge detection algorithm for noisy image. *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, 9(4), 1404-1410.

40. Leksic, I., Stefanic, N., & Veza, I. (2020). The impact of using different lean manufacturing tools on waste reduction. *Advances in production engineering & management*, 15(1).

41. Yang, H., Chen, L., Cheng, Z., Yang, M., Wang, J., Lin, C., ... & Li, W. (2021). Deep learning-based six-type classifier for lung cancer and mimics from histopathological whole slide images: a retrospective study. *BMC medicine*, 19, 1-14.

42. Gao, Q., Tu, K., Li, H., Zhang, L., & Cheng, Z. (2021). A novel reversible-deactivation radical polymerization strategy via near-infrared light-controlled photothermal conversion dividing wall-type heat exchanger. *Science China Chemistry*, 64(7), 1242-1250.

43. Методичні вказівки до виконання розділу "Охорона праці" у випускних роботах ОКР "бакалавр" усіх форм навчання / упоряд.: В. А. Айвазов. Т. Є. Стиценко., Н. Л. Березуцька ; М-во освіти і науки України, ХНУРЕ. – Харків : ХНУРЕ, 2018. – 28 с. – 1,81.