

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ЕКОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет комп'ютерних наук,
управління та адміністрування
Кафедра автоматизованих систем
моніторингу навколишнього середовища

Бакалаврська кваліфікаційна робота

на тему: Розробка навігаційної системи ближньої зони для автономного
мобільного робота

Виконав студент 2 (інт.) курсу
групи К-25 (інт.)
спеціальність 122 – комп'ютерні науки
Степанчук Олександр Анатолійович

Керівник к. т. н., доцент
Великодний Станіслав Сергійович

Консультант _____

Рецензент к. т. н.,
Онищенко Сергій Михайлович

Одеса 2020

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ЕКОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет комп'ютерних наук, управління та адміністрування
Кафедра автоматизованих систем моніторингу навколишнього середовища
Рівень вищої освіти бакалавр
спеціальність 122 – комп'ютерні науки

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри АСМНС

“13” квітня 2020 р.

З А В Д А Н Н Я
НА БАКАЛАВРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Степанчуку Олександрю Анатолійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розробка навігаційної системи ближньої зони для автономного мобільного робота

керівник роботи Великодний Станіслав Сергійович, к. т. н., доцент
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом закладу вищої освіти від «13» квітня 2020 р. № 37-С

2. Строк подання студентом роботи 30 травня 2020 р.

3. Вихідні дані до роботи: робот типу «Фенікс 3»; система технічного зору на базі багатоканального ультразвукового далекоміру; п'єзоперетворювачі МА40S8S та МА40S8R фірми MuRata; ПЛІС MAX EPM7128STC100; шина CAN з інтерфейсним контролером MCP2510 та PIC18F458; контролер «ASK Lab», символічний рідкокристалічний індикатор; програмне забезпечення для мікроконтролера сенсорної плати та макетної плати «ASK Lab», що написано мовою C18; середовище компіляції MPLAB 8; середовище MAX+ V10.0 для прошивки мікросхем ПЛІС

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): вступ; аналіз технічного завдання; узагальнена архітектура інтелектуального робота; функціональні вимоги до підсистеми; методи розпізнавання, ідентифікації та вимірювання відстані до об'єктів у системах технічного зору роботів; загальний принцип побудови моделі; проектування багатоканальної системи ультразвукового зору робота «Фенікс 3»; складання структурної схеми; принцип дії ультразвукового модуля; розробка і проектування системи; проведення випробувань; висновки

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): графічний матеріал виконаний у вигляді презентації

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання “13” квітня 2020 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів роботи	Оцінка виконання етапу	
			у %	за 4-х бальною шкалою
1	Отримання завдання на роботу	13.04.2020		
2	Аналіз технічного завдання	16.04.2020		
3	Виконання аналітичного розділу	19.04.2020		
4	Вивчення архітектури роботи	21.04.2020		
5	Розробка функціональних вимог до підсистеми	28.04.2020		
6	Дослідження методів опису об'єктів	03.05.2020		
7	Дослідження методів ідентифікації об'єктів	08.05.2020		
8	Проходження рубіжної атестації	11.05.2020		
9	Складання структурної схеми	18.05.2020		
10	Розробка і проектування системи	23.05.2020		
11	Проведення випробувань	27.05.2020		
12	Формування висновків до роботи	29.05.2020		
13	Перевірка роботи на плагіат	30.05.2020		
14	Складання графічної частини	02.06.2020		
15	Підготовка доповіді на захист	06.06.2020		
16	Проходження рецензування	08.06.2020		
	Інтегральна оцінка виконання етапів календарного плану (як середня по етапам)			

Студент

_____ (підпис)

Керівник роботи

_____ (підпис)

Степанчук О. А.

_____ (прізвище та ініціали)

Великодний С. С.

_____ (прізвище та ініціали)

ЗМІСТ

Перелік умовних познач	5
Вступ	6
1 Аналіз технічного завдання	9
1.1 Найменування та область застосування системи	9
1.2 Завдання, які вирішуються підсистемою	11
1.3 Узагальнена архітектура інтелектуального робота	11
1.4 Характеристика об'єктів обробки	15
1.5 Функціональні вимоги до підсистеми	16
2 Методи розпізнавання, ідентифікації та вимірювання відстані до об'єктів у системах технічного зору роботів	17
2.1 Огляд методів розпізнавання та ідентифікації об'єктів	17
2.1.1 Методи опису об'єктів	18
2.1.2 Методи ідентифікації об'єктів	24
2.2 Існуючі системи технічного зору	27
2.3 Загальний принцип побудови моделі	30
3 Проектування багатоканальної системи ультразвукового зору робота «Фенікс 3»	36
3.1 Складання структурної схеми	36
3.2 Принцип дії ультразвукового модуля	36
3.3 Розробка і проектування системи	38
3.4 Проведення випробувань	43
Висновки	47
Перелік джерел посилання	48

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАК

АМР – автономний мобільний робот.

БД – база даних.

ЕОМ – електронна обчислювальна машина.

ККД – коефіцієнт корисної дії.

МК – мікроконтролер.

ПР – промисловий робот.

САІМ – систему автоматизації імітаційного моделювання.

СТЗ – системи технічного зору.

СУ – система управління.

ТП – технологічний процес.

УЗ – ультразвук.

УЗМ – ультразвуковий модуль.

ЦК – цифрова камера.

GPS – Global Positioning System.

IoT – Internet речей.

ВСТУП

Ультразвук (УЗ) являє собою хвилеподібно розповсюджується коливальний рух частинок середовища. УЗ має деякі особливості у порівнянні зі звуками чутного діапазону. В УЗ діапазоні порівняно легко отримати направлене випромінювання; він добре піддається фокусуванню, в результаті чого підвищується інтенсивність УЗ коливань. При поширенні в газах, рідинах і твердих тілах ультразвук породжує цікаві явища, багато з яких знайшли практичне застосування у різних областях науки і техніки, у т.ч. робототехніці та Internet речей (IoT).

Сучасне виробництво досягло тієї стадії розвитку, на якій технологічні процеси представляють собою складні послідовності операцій, що вимагають точного позиціонування використовуваних елементів, що досягають часткою мікрометрів. Ручне або автоматизоване виконання цих операцій на рівні управління важко. Рішення складних завдань автоматизації технологічних процесів можливо при широкому використанні промислових роботів (ПР).

Застосування ПР роботів на перших етапах розвитку промисловості підвищило продуктивність праці, однак залишалася невирішеною завдання розробки і впровадження адаптивних робототехнічних систем, здатних не тільки автоматично виконувати технологічні операції, але й адаптуватися до мінливих умов навколишнього середовища – робочому простору ПР. Відсутність адаптивності робототехнічних систем призводить до зниження гнучкості і продуктивності, що компенсується фінансовими витратами при випуску нових виробів на розробку сенсорних пристроїв ПР та розробку нових методів позиціонування елементів виробу.

Розвиток сучасної робототехніки має два основних напрямки – створення систем прийняття та підтримки рішень для систем управління ПР і створення гнучких сенсорних систем ПР. Другий з названих напрямів видається більш пріоритетним, оскільки функціональність ПР, в першу чергу, залежить від повноти і точності інформації про робочий простір, у якому він

здійснює операції, – від гнучкості його сенсорної системи. Практичні дослідження багатьох вчених показують, що найбільш інформативною є зорова інформація, яка становить близько 60% від всіх видів інформації, що надходить в систему прийняття та підтримки рішень ПР.

Системи технічного зору (СТЗ) на сучасному етапі розвитку робототехніки є найбільш потужний та гнучкий апарат як промислових, так і непромислових роботів. Можливість створення гнучких СТЗ з'явилася з розвитком високопродуктивних електронних обчислювальних машин (ЕОМ), які дозволили реалізовувати складні ресурсомісткі методи обробки відеоінформації у цифровому вигляді; зниження габаритно-масових характеристик ЕОМ та систем реєстрації зорової інформації (цифрових камер) дозволило локалізувати СТЗ у найбільш рухомому місці – маніпулятор ПР, що збільшило можливості по контролю вироблених операцій ПР у реальному масштабі часу.

Дослідження у галузі розпізнавання та ідентифікації об'єктів робочого простору ПР досить великі, однак більшість з цих досліджень так і не вийшли за рамки лабораторій. Велика кількість методів обробки зорової інформації жорстко прив'язані до конкретних умов технологічного процесу, що впливає на гнучкість системи, область застосування і економічний ефект при впровадженні таких систем. Універсалізація методів розпізнавання та ідентифікації стикається з проблемою обмеженості обчислювальних ресурсів, яка безпосередньо залежить від фінансових можливостей розробників або замовників системи.

З урахуванням вище наведених міркувань, можна стверджувати, що побудова власної підсистеми розпізнавання та ідентифікації об'єктів роботи-зації є актуальним завданням автоматизації виробництва, рішення якої внесе певний внесок в розвиток даного напрямку.

Метою бакалаврської кваліфікаційної роботи є розробка УЗ системи вимірювання відстані до перешкоди на основі розпізнавання та ідентифікації об'єктів робочого простору автономного мобільного робота (АМР).

Комплекс повинен забезпечувати в автономному режимі інформацією про об'єкти, що знаходяться у полі зору ПР підсистему прийняття та підтримки рішень ПР.

У процесі досягнення поставленої мети роботи, вирішуються такі завдання:

- а) аналіз існуючих методів розпізнавання та ідентифікації об'єктів робочого простору ПР;
- б) вибір найбільш придатних методів для реалізації їх у вигляді програмного комплексу;
- в) оптимізація програмної реалізації обраного алгоритму з урахуванням наявних апаратно-програмних можливостей.

Дослідження є основою дипломної роботи, що пов'язані безпосередньо із гнучкими комп'ютеризованими системами, які використовують робототехнічні комплекси, у якості основного виконавчого елемента виробничої системи. Подібні системи поєднують у собі високі технології, як у галузі комп'ютерних наук, так і у галузі електроніки та механіки. Експлуатація таких систем пов'язана не тільки з виконанням технологічних процесів на виробництві, а й з необхідністю постійного вдосконалення функціональних можливостей системи.

Пояснювальна записка до бакалаврської кваліфікаційної роботи складається з: 50 сторінок; що містять, 3 розділи, 13 рисунків, 1 таблицю та перелік джерел посилань з 32 найменувань.

1 АНАЛІЗ ТЕХНІЧНОГО ЗАВДАННЯ

1.1 Найменування та область застосування системи

УЗ – пружні коливання та хвилі, частота яких перевищує 15 – 20 кГц. Нижня межа області УЗ частот, що відокремлює її від області чутного звуку, визначається суб'єктивними властивостями людського слуху і є умовною, так як верхня межа слухового сприйняття – у кожної людини своя. Верхня межа УЗ частот обумовлена фізичною природою пружних хвиль, які можуть поширюватися лише в матеріальному середовищі, тобто за умови, що довжина хвилі значно більше довжини вільного пробігу молекул в газі або міжатомних відстаней в рідинах і твердих тілах [1] ¹⁾.

У газах при нормальному тиску верхня межа частот УЗ становить 109 Гц, у рідинах та твердих тілах гранична частота сягає 10¹² – 10¹³ Гц. У залежності від довжини хвилі та частоти УЗ володіє різними специфічними особливостями випромінювання, прийому, поширення і застосування, тому область УЗ частот поділяють на три області [2] ²⁾:

- низькі УЗ частоти (10⁴ – 10⁵ Гц);
- середні (10⁵ – 10⁷ Гц);
- високі (10⁷ – 10⁹ Гц).

Пружні хвилі з частотами 10⁹ – 10¹³ Гц називають гіперзвуком.

Система вимірювання відстані, що розробляється призначена для зорових потреб ПР типу «Фенікс 3». Передбачається, що автономний робот «Фенікс 3» буде забезпечений системою об'їзду перешкод, для чого передбачається використовувати систему технічного зору на базі багатоканального ультразвукового далекоміра [3] ³⁾.

¹⁾ [1] Фу К., Гонсалес Р., Ли К. Робототехника: Пер. с англ. Москва: Мир, 1989. 624 с.

²⁾ [2] Романовский П. И. Ряды Фурье. Теория поля. Аналитические и специальные функции. Преобразование Лапласа. Москва: Наука. Гл. ред. физ.-мат. л-ры, 1980. 336 с.

³⁾ [3] Великодний С. С. Аналіз динамічної точності дволанкового маніпулятора промислового робота. *Автоматизированные системы управления и приборы автоматики*. 2005. Вып. 130. С. 82–85.

На етапі розробки подібна підсистема була відсутня та управління ПР здійснювалося у ручному режимі з пульта ручного керування або за допомогою керуючої програми, що здійснює управління маніпулятором ПР по заздалегідь заданій траєкторії [4], [5] ¹⁾.

Відсутність засобів зворотного зв'язку з об'єктами маніпулювання не дає можливості контролювати проходження технологічного процесу (ТП) та, відповідно, реагувати на зміни, що вносяться зовнішніми впливами. Відсутність зворотного зв'язку із виконуваними операціями вказує на малу гнучкість системи в цілому, що значно скорочує можливості застосування ПР в реальних умовах автоматизованого виробництва [6] ²⁾. Безпосередня експлуатація такої системи має з такі проблемами:

- необхідність створення жорсткої конвеєрної структури виробничих ділянок;
- вирішення завдань тимчасового узгодження роботи конвеєра та ПР;
- необхідність зміни керуючої програми при переході на випуск нового виду виробів, де позначається складність введення траєкторії відпрацювання технологічної операції ПР [7] ³⁾.

Основним недоліком є жорстка вимога до точності завдання еталонної траєкторії [8] ⁴⁾, порушення якої у процесі роботи веде до порушення виконання всього ТП, при цьому таку ситуацію складно автоматично скоригувати.

¹⁾ [4] Невлюдов І. Ш., Великодний С. С. Метод інтерполяції дуги кола для систем програмного відтворення рухів. *Радиоэлектроника и информатика*. 2007. № 3. С. 31–37.

[5] Невлюдов І. Ш., Великодний С. С. Алгоритм інтерполяції дуги кола для систем програмного відтворення рухів. *Автоматизированные системы управления и приборы автоматики*. 2007. Вып. 142. С. 90–95.

²⁾ [6] Невлюдов И. Ш., Великодний С. С., Омаров М. А. Использование CAD/CAM/CAE/CAPP при формировании управляющих программ для станков с ЧПУ. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2010. № 2/2 (44). С. 37–44.

³⁾ [7] Великодний С. С. Методи реінжинірингу програмних систем. *Технологии приборостроения*. 2014. Спец. вып. С. 65–68.

⁴⁾ [8] Великодний С. С. Проектування траєкторії руху технологічного обладнання при виготовленні елементів суднових конструкцій. *Автоматизация судовых технических средств*. Вып. 16. 2010. С. 10–18.

1.2 Завдання, які вирішуються підсистемою

Завдання, які вирішуються підсистемою, полягають у забезпеченні ПР інформацією про об'єкти, що підлягають обробці, – забезпечення зворотного зв'язку ПР з зовнішньої виробничим середовищем. З усіх завдань, які повинні вирішуватися подібними системами слід виділити наступні:

- ідентифікація змін у робочому просторі ПР [9] ¹⁾;
- автоматичне визначення ознак для еталонних об'єктів;
- виділення необхідного об'єкта із множини об'єктів (розпізнавання) [10] ²⁾, що знаходяться у робочому просторі ПР, по команді від системи управління (СУ);
- розрахунок (ідентифікація) і передача у СУ ПР просторових характеристик об'єкта, для його подальшої технологічної обробки;
- забезпечення постійного зворотного зв'язку ПР із зовнішнім виробничим середовищем;
- модифікація графічних баз даних еталонних об'єктів [11] ³⁾.

1.3 Узагальнена архітектура інтелектуального робота

З точки зору побудови узагальненої архітектури інтелектуального робота, актуально скористатися поняттям інтелектуального агента. У цьому випадку, конструкція компонентів архітектури агентів (датчиків, виконавчих

¹⁾ [9] Худяев А. А. Чебилько, А. Е., Великодний С. С. Алгоритм формирования траектории движения рабочего органа манипулятора по дуге окружности. *Нові рішення в сучасних технологіях. Вісник національного технічного університету "ХПІ"*. 2004. № 39. С. 28–46.

²⁾ [10] Великодний С. С., Котенко Е. В. Разработка системы реального времени распознавания лиц с использованием примитивов Хаара и алгоритма ADABOOST. *Холодильна техніка і технологія*. 2010. № 5 (127). С. 67–70.

³⁾ [11] Великодний С. С., Бурлаченко Ж. В., Зайцева-Великодна С. С. Реінжиніринг графічних баз даних у середовищі відкритої системи автоматизованого проектування BRL-CAD. Моделювання структурної частини. *Вісник Кременчуцького національного університету ім. Михайла Остроградського*. 2019. Вип. 3 (116). С. 130–139. (кат. «Б») DOI: 10.30929/1995-0519.2019.3.130-139.

механізмів і процесорів) вже визначена і потрібно лише розробляти програми агента. Але успіхи у створенні реальних роботів не в меншій мірі залежать від того, наскільки вдало будуть спроектовані датчики та виконавчі механізми, які підходять для виконання поставленого завдання.

Датчики – це інтерфейс між роботами і тим середовищем, у якому вони діють, що забезпечує передачу результатів сприйняття. Пасивні датчики, такі як відеокамери, в повному розумінні цього слова, виконують функції спостерігача за середовищем – вони перехоплюють сигнали, створювані іншими джерелами сигналів в середовищі.

Активні датчики, такі як локатори, посилають енергію у середовище. Їх дія заснована на тому, що частина випромінюваної енергії відбивається і знову надходить до датчика. Як правило, активні датчики дозволяють отримати більше інформації, ніж пасивні, але за рахунок збільшення споживання енергії від джерела живлення; ще одним їх недоліком є те, що при одночасному використанні численних активних датчиків може виникнути інтерференція. В цілому датчики (активні і пасивні) можна розбити на три типи, в залежності від того:

- реєструють вони відстані до об'єктів;
- формують зображення середовища;
- контролюють характеристики самого робота.

У більшості мобільних роботів використовуються далекоміри, які представляють собою датчики, які вимірюють відстань до найближчих об'єктів. Одним із широко застосовуваних типів таких датчиків є звуковий локатор, відомий також як УЗ вимірювальний перетворювач. Звукові локатори випромінюють спрямовані звукові хвилі, які відбиваються від об'єктів, і частина цього звуку знову надходить в датчик. При цьому час надходження і інтенсивність такого поворотного сигналу несуть інформацію про відстань до найближчих об'єктів.

Наприклад, для автономних підводних апаратів переважно використовується технологія підводних гідролокаторів, а на землі звукові локатори, в

основному, використовуються для запобігання зіткнень лише навколо місць, оскільки ці датчики характеризуються обмеженим кутовим розрішенням. До числа інших пристроїв, альтернативних по відношенню до звукових локаторам, відносяться також радари (в основному застосовуються на повітряних судах) та лазери. Лазерний далекомір, який широко застосовується для мобільних роботів показаний на рис. 1, а його практичне застосування наведено на рис. 2.



Рисунок 1 – Типовий приклад лазерного далекоміра (датчика відстані)
SICK LMS

Деякі датчики відстані призначені для вимірювання дуже коротких або дуже довгих відстаней. У число датчиків вимірювання коротких відстаней входять тактильні датчики, такі як контактні вусики, контактні панелі і сенсорні покриття.

На іншому кінці спектру знаходиться глобальна система позиціонування (Global Positioning System – GPS), яка вимірює відстань до супутників, випромінюючих імпульсні сигнали. У даний час на орбіті знаходяться понад два десятки супутників, кожен з яких передає сигнали на двох різних частотах. Приймачі GPS визначають відстань до цих супутників, аналізуючи значення фазових зрушень. Згодом, виконуючи тріангуляцію сигналів від декількох супутників, приймачі GPS визначають свої абсолютні координати на

Землі з точністю до кількох метрів. В диференціальних системах GPS застосовується другий наземний приймач із відомими координатами, завдяки чому при ідеальних умовах забезпечується точність вимірювання координат до міліметра. На жаль, системи GPS не працюють усередині приміщення або під водою.

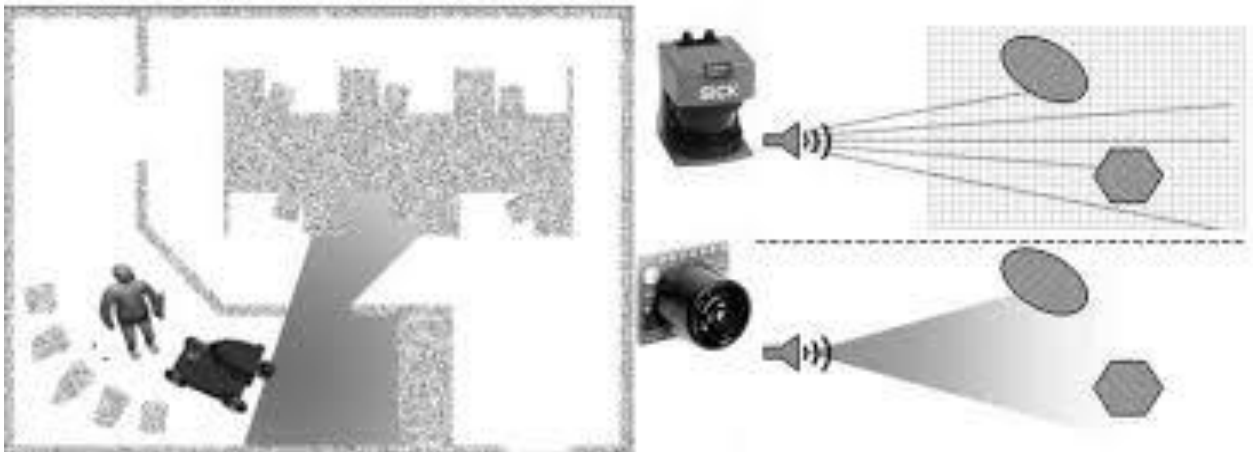


Рисунок 2 – Практичне застосування лазерного далекоміра та результати вимірювання відстаней, які отримані за допомогою горизонтально встановленого сенсора відстані та спроектовані на двомірну карту середовища

Другим важливим класом датчиків є датчики зображення – відеокамери, що дозволяють отримувати зображення навколишнього середовища, а також моделювати і визначати характеристики середовища з використанням методів машинного зору. В робототехніці особливо важливе значення має стереоскопічний зір, оскільки він дозволяє отримувати інформацію про глибину; тим не менш, майбутнє цього напрямку знаходиться під загрозою, оскільки успішно здійснюється розробка нових активних технологій отримання просторових зображень.

До третього важливого класу відносяться пропріорецептивні датчики, які інформують робота про його власний стан. Для вимірювання точної конфігурації робототехнічного шарніра, що призводить його в дію електродви-

гуни часто оснащуються дешифраторами кута повороту вала, які дозволяють визначати навіть невеликі збільшення кута повороту вала електродвигуна.

У маніпуляторах роботів дешифратори кута повороту вала здатні надати точну інформацію за будь-який період часу. У мобільних роботів дешифратори кута повороту вала, які передають дані про кількість обертів колеса, можуть використовуватися для одометра – вимірювання пройденої відстані. На жаль, колеса часто зрушуються і прослизують, тому результати одометра є точними тільки для дуже коротких відстаней.

Ще однією причиною помилок при визначенні позиції є зовнішні сили, такі як течії, які впливають на автономні підводні апарати та вітри, що збивають з курсу автоматичні повітряні транспортні засоби. Поліпшити цю ситуацію можна з використанням інерційних датчиків, таких як гіроскопи, але навіть вони, що застосовуються без інших додаткових коштів, не дозволяють виключити неминуче накопичення похибки визначення положення мобільного робота.

1.4 Характеристика об'єктів обробки

Система призначена для орієнтації робота у просторі при русі у природному середовищі. Ця можливість забезпечується при використанні досить великої кількості незалежних каналів вимірювання. Таким чином, мова йде про необхідність розробки багатоканального ультразвукового далекоміра, включеного в бортову керуючу мережу робота [12] – [14] ¹⁾.

Технічні характеристики системи визначаються головним чином характеристиками використаних ультразвукових п'єзоперетворювачів: MuRata MA40S8S та приймача MA40S8R наведені у табл. 1.

¹⁾ [12] Oskar J. O. Master Thesis LiTH-ISY-3132. Computer Vision Classification of Leaves from Swedish Trees. *Söderkvist*. 2001. # 3. P. 45–48.

[13] Gonzalez R.C., Wintz P. Digital Image Processing. Addison–Wesley: Reading, Mass., 1996. 96 p.

[14] Путятин Е. П., Аверин С. И. Обработка изображений в робототехнике. Москва: Машиностроение, 1990. 320 с.

Таблиця 1 – Технічні характеристики п'єзовипромінювача МА40S8S та приймача МА40S8R

Найменування	МА40S8S	МА40S8R
Номінальна робоча частота	40 кГц	40 кГц
Рівень звукового тиску у максимумі діаграми спрямованості	120 дБ	–
Чутливість	–	63 дБ
Діапазон вимірюваних відстаней	0,2 – 4 м	0,2 – 4 м
Ширина діаграми спрямованості	60°	60°

1.5 Функціональні вимоги до підсистеми

Підсистема повинна забезпечувати функціональні можливості:

а) автоматизована система обліку об'єктів роботизації [15] ¹⁾:

1) додавання нових об'єктів до бази даних (БД);

2) зміна та видалення характеристик об'єктів БД;

б) пакетний режим роботи систем управління (СУ) ПР;

в) модульність підсистеми.

При додаванні БД вибір загальних характеристик об'єкта (найменування, код тощо) покладається на оператора. Параметри захоплення об'єкта вводяться безпосередньо з СУ ПР, та у поданій підсистемі не використовуються, а тільки записуються як додаткові параметри об'єкта. Зміна характеристик існуючих у БД об'єктів проводиться тільки за допомогою самої підсистеми, оператор не може змінювати ці параметри вручну.

Підсистема забезпечує оновлення методів обробки зорової інформації за рахунок об'єктно-орієнтованої структури програмного комплексу – переконструювання без зміни базових об'єктів комплексу [16] ²⁾.

¹⁾ [15] Theodoris S., Koutroumbas K. Pattern Recognition. Academic Press, 1999. 124 p.

²⁾ [16] Шикин А. В., Боресков А. В. Компьютерная графика. Полигональные модели. Москва: ДИАЛОГ-МИФИ, 2010. 464 с.

2 МЕТОДИ РОЗПІЗНАВАННЯ, ІДЕНТИФІКАЦІЇ ТА ВИМІРЮВАННЯ ВІДСТАНІ ДО ОБ'ЄКТІВ У СИСТЕМАХ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ РОБОТІВ

2.1 Огляд методів розпізнавання та ідентифікації об'єктів

Розпізнавання – процес розмітки сцени, що представляє собою проекцію тривимірного робочого простору ПР на площину об'єктива, реєструючого пристрою – цифрової камери (ЦК) або УЗ-модуль (УЗМ)[17] ¹⁾. В процесі розмітки відбувається виділення інформації щодо об'єктів розташованих у полі зору УЗМ. Зазвичай у промислових системах УЗМ розташований перпендикулярно робочій поверхні розглянутих об'єктів, чим досягається зменшення ймовірності перекриття одних об'єктів іншими. Таке спрощення призводить до зменшення варіації ознак, у залежності від розташування УЗМ, та спрощує процес сегментації й опису сцени у цілому [18] ²⁾.

Розпізнавання найбільш складний процес, оскільки тісно пов'язаний із методами попередньої обробки зображення. Найчастіше якість розпізнавання залежить від ефективності безлічі процесів, починаючи від процесу введення зображення і закінчуючи формуванням ознак об'єкта. Найбільш важливим завданням при розпізнаванні є завдання опису властивостей об'єкта – дескрипторів, для подальшої ідентифікації об'єкта [19] ³⁾.

Безпосередньо з завданням розпізнавання виникає задача ідентифікації об'єктів – процес тісно пов'язаний з розпізнаванням, що полягає в об'єднанні всієї отриманої інформації від процесу розпізнавання в єдине ціле з метою класифікувати об'єкт. Більшість відомих методів не проводять чіткої межі між процесом розпізнавання та ідентифікації, оскільки виділення ознак відбувається за рахунок модифікації вихідного зображення.

¹⁾ [17] Васильев В. И. Распознающие системы. Справочник. Киев: Наук. думка, 1983. 422 с.

²⁾ [18] Баклицкий В. К., Бочкарёв А. М., Мусьяков М. П. Методы фильтрации сигналов в корреляционно-экстремальных системах навигации. Москва: Радио и связь, 1986. 216 с.

³⁾ [19] Хорн Б. К. Зрение роботов: Пер. с англ. Москва: Мир, 1989. 487 с.

2.1.1 Методи опису об'єктів

Кінцевою метою розпізнавання сцени, є процес формування дескрипторів для об'єктів сцени. Дескриптори являють собою структуру опису властивостей об'єкта. Опис є основним результатом при конструюванні СТЗ, оскільки дескриптори повинні впливати не тільки на складність алгоритмів розпізнавання, але і на їх роботу. Існує три основні категорії дескрипторів [20] ¹⁾:

- а) дескриптори кордону;
- б) дескриптори області;
- в) дескриптори для опису тривимірних структур.

Дескриптори кордону включають в себе ряд найбільш поширених методів:

- а) ланцюгові коди;
- б) сигнатури;
- в) апроксимація багатокутниками;
- г) дескриптори Фур'є.

Ланцюгові коди застосовуються для подання кордону у вигляді послідовності відрізків прямих ліній певної довжини та напрямку. В основі цього уявлення лежить 4 або 8-ми зв'язкова решітка. Довжина кожного відрізка визначається здатністю решітки, а напрямки задаються обраним кодом.

Для породження ланцюгового коду заданої кордону спочатку вибирається решітка. Тоді, якщо площа комірки, розташованої усередині кордону, більше певного числа, їй присвоюється значення «1»; в іншому випадку – значення «0». У даному методі основне місце займає процедура розбиття межі об'єкта на складові частини. Недоліком методу є те, що ланцюговий код даного кордону залежить від початкової точки. Однак деякі розробники СТЗ застосовували в цьому методі нормування, обходячи даний недолік.

¹⁾ [20] Романовский П. И. Ряды Фурье. Теория поля. Аналитические и специальные функции. Преобразование Лапласа. Москва: Наука. Гл. ред. физ.-мат. л-ры, 1991. 336 с.

Сигнатури – це одномірне функціональне представлення кордону. Найбільш простим способом створення сигнатур є побудова відрізка з центру до кордону як функції кута. Такі сигнатури є залежними від периметра області та початкової точки відрізка. Застосування такого дескриптора кордону можливо тільки при його нормуванні. Безпосереднє застосування сигнатур не представляється можливим, оскільки кілька сигнатур для різних об'єктів повинні бути помітні.

Для введення параметрів відмінності, найбільшого поширення набув спосіб опису сигнатур за допомогою обчислення моментів. Доцільність застосування даного дескриптора полягає в одержуваних вихідних даних – одномірні функції, які простіше обробляти при описі об'єкта [21] ¹⁾.

Іншим видом розкладання межі об'єкта у дескриптор є подання його у вигляді багатокутників – апроксимація багатокутниками. При використанні цифрової обробки зображення кордон об'єкту можна апроксимувати із довільною точністю. Для замкнутого кордону апроксимація багатокутниками є точною тоді, коли число сегментів у багатокутнику дорівнює числу точок кордону, так що кожна пара сусідніх точок визначає сегмент багатокутника.

Метою такої апроксимації є якісне визначення форми кордону за допомогою мінімального числа багатокутних сегментів. Довгий час практичне застосування даного методу було неможливо через складність завдання і обмеженості ресурсів обчислювальних засобів СТЗ. З появою апаратних засобів відтворення графічної інформації даний метод був оптимізований і реалізований апаратно. Найбільше застосування отримав алгоритм побудови тріангуляції Делоне [22] ²⁾, в основі якого покладено принцип апроксимації багатокутниками безлічі точок межі об'єкта. Поряд з алгоритмом тріангуляції Де-

¹⁾ [21] Жлуктенко В. І., Наконечний С. І. Теорія ймовірностей та математична статистика: навч.-метод. посіб. у 2-х частинах. Ч. 1: Теорія ймовірностей. Київ: КНЕУ, 2009. 304 с.

²⁾ [22] Sung K. K., Poggio T. Learning Human Face Detection in Cluttered Scene. Lecture Notes in Computer Science. Computer Analysis of Images and Patterns. 1995. P. 432–439.

лоне застосовуються і більш прості алгоритми: найменшого периметра, інтуїтивного об'єднання та розбиття.

При побудові СТЗ основною вимогою завжди є гнучкість системи. Вище наведені дескриптори кордону об'єкта практично складно автоматично генерувати при навчанні нового об'єкта. Оператор повинен проводити коректування дескрипторів вибірки навчання, що вводяться в загальну БД СТЗ для подальшого процесу ідентифікації. Перенастроювання СТЗ на розпізнавання нових об'єктів найчастіше пов'язане з тривалим процесом виведення подібних дескрипторів окремо для кожного нового об'єкта, при цьому гнучкість всієї системи знижується.

Рішення завдання автоматичного формування дескрипторів об'єкта, виходить за рахунок застосування математичного апарату розкладання сигналу в ряд Фур'є – отримання дескрипторів Фур'є. Дескриптори Фур'є розраховуються на комплексній площині, де кожна точка (x, y) кордону відповідає комплексному числу $(x + j \cdot y)$. Послідовність з M точок кордону представляється у вигляді функції, що має перетворення Фур'є $F(u)$, $u = 0, 1, 2, \dots, m-1$.

Якщо M є цілим числом (ступенем 2), $F(u)$ обчислюється за допомогою алгоритму швидкого перетворення Фур'є. Даний метод отримав широке поширення в силу того, що для подальшої ідентифікації істотно різних форм зазвичай потрібно лише кілька перших компонент $F(u)$; перетворення Фур'є легко нормується для розміру, повороту і початкової точки кордону; для зміни розміру контуру досить помножити компоненти перетворення Фур'є на константу, що внаслідок лінійності перетворення Фур'є еквівалентно множенню кордону на один і той же множник; поворот на кут θ здійснюється множенням елементів $F(u)$ на експоненту [23]¹⁾.

Даний метод реалізований у більшості промислових СТЗ на основі оптичних обчислювальних засобів. Слід зазначити, що це дорогі системи, що

¹⁾ [23] Пентланд А. С., Чаудхари Т. Распознавание лиц для интеллектуальных сред. Открытые Системы. № 3. 2009. С. 86–95.

обмежує область застосування таких систем (системи навігації бойових ракет дальньої дії, авіаційних і космічних систем).

З розвитком електронних обчислювальних засобів і засобів реєстрації зорової інформації все більше дослідників і розробників СТЗ почали використовувати інформацію не тільки про форму об'єкта, але і про характеристики обмежувальної області об'єкта: текстура, скелет об'єкта тощо. Хоча розглянуті вище дескриптори кордону об'єкта становлять певну інформацію про об'єкт роботизації і можуть використовуватися для опису області об'єкта, але не дають повної картини розпізнається сцени, на відміну від дескрипторів області.

У разі якщо об'єкти розпізнання відрізняються один від одного настільки, що для їх подальшої ідентифікації досить лише кількох основних дескрипторів, можна застосувати такі дескриптори, як:

- площа об'єкта;
- велика і мала осі об'єкта;
- периметр області об'єкта;
- зв'язність окремих областей одного об'єкта.

Якщо об'єкти представляють собою подібні за зображенням кордони, але різні за характером поверхні, то можливе застосування дескрипторів текстури. Дескриптор текстури формального визначення не отримав – це, швидше за все, інтуїтивний опис поверхні (шорсткість, однорідність, регулярність).

На практиці застосовуються два підходи для отримання дескриптора текстури об'єкта: структурний та статистичний. Структурні методи дозволяють встановити взаємне розташування елементарних частин образу, таких як, опис текстури, заснованої на регулярному розташуванні паралельних ліній. Статистичні методи дають такі характеристики, як однорідність, шорсткість, зернистість, візерунок тощо.

Найбільше, отримав широке застосування в системах, пов'язаних з обробкою об'єктів на основі текстури, метод, який використовує моменти гістограми інтенсивності області об'єкта. Даний метод застосовується до дискретизованого зображення, яке видає інтенсивністю окремої точки зображення – пікселем.

На першому етапі проводиться знаходження гістограми інтенсивності області об'єкта. На другому етапі проводиться обчислення моментів (до шостого ступеня) щодо середнього значення інтенсивності області. Дескриптор, побудований за цим методом включає в себе: другий момент – дисперсію інтенсивності області об'єкта, яка представляє міру контрасту інтенсивності і застосовується в подальшому для опису однорідності поверхні об'єкта; третій момент, який представляє собою міру асиметрії гістограми, а четвертий момент є мірою її відносної рівності. П'яті і шості моменти представляють швидше практичний інтерес, оскільки їх не так легко зв'язати з формою гістограми, але вони дають певну кількісну інформацію про вид текстури об'єкта [24]¹⁾.

Даний метод знайшов практичне застосування при ідентифікації шорсткуватих об'єктів на ділянках збірки деталей. При наявності в БД великого числа подібних об'єктів даний метод застосовується у модифікованому вигляді: у процесі аналізу текстури об'єкта розглядається не тільки розподіл інтенсивності, але і взаємне розташування пікселів з рівними або майже рівними значеннями інтенсивності.

Серед структурних методів отримання дескрипторів області, слід зазначити метод, заснований на отриманні опису області у вигляді графа – скелета області, тобто схеми області. У даному методі для отримання скелета застосовується велика кількість алгоритмів проріджування, такі як: перетворення середніх осей, алгоритм Накаш та Шінгала, хвильовий метод. Перераховані алгоритми проріджування пов'язують свою роботу з бінарним зобра-

¹⁾ [24] Абламейко С. В., Лагуновский Д. М. Обработка изображений: Технология, методы, применение. Минск: Техника, 2009. 302 с.

женням, що вимагає у разі поступового зображення, попередню його обробку.

Однією з найбільш швидких і простих у реалізації процедур проріджування є алгоритм, розроблений Накаші та Шінгалом. Даний алгоритм заснований на поняттях зв'язності пікселів зображення; проріджування проводиться на основі обчислення логічної функції на образі вікна зображення. Вибір зв'язує логічні функції, проводиться на основі інтуїтивно введених функцій наслідків об'єднання та розриву.

Хвильові алгоритми часто використовуються для визначення мінімальної відстані між об'єктами у просторі (оптимізаційні алгоритми комп'ютерної графіки), а у СТЗ вони отримали застосування для реалізації функції проріджування [25]¹⁾. Для цього, у вихідній точці генерується хвиля, що розповсюджується за певними законами, позначати пройдені точки номером кроку.

Процес закінчується після досягнення цільової точки. Номер кроку, яким позначена цільова точка, що буде відстанню від вихідної до цільової точки. Побудова скелета у даному випадку зводиться до виділення відрізків і місць їх з'єднання з занесенням знайдених даних у результуючий граф. Виділення проводиться за допомогою аналізу шляху проходження хвилі, з позначкою пройденого шляху (для запобігання подвійного проходження хвилі по зображенню).

У результуючий граф скелета зображення заносяться середні точки для кожної генерації хвилі. Зі зменшенням кількості точок в процесі руху хвилі проводиться аналіз переміщення середньої точки останньої генерації хвилі, і у граф заносяться тільки точки, в яких відбувається зміна напрямку руху середньої точки. Методи скелетизації дають позитивні результати при роботі з бінарними зображеннями сцени, однак застосування їх для обробки градаційний зображень обмежено похибками при бінаризації області об'єкта. Тут

¹⁾ [25] Форсайт П. Компьютерное зрение. Современный подход. Москва: Издательский дом «Вильямс». 2004. 928 с.

слід зазначити, що скелет області безпосередньо не може бути використаний для подальшого процесу ідентифікації і вимагає застосування додаткових алгоритмів опису отриманого скелета. З появою завдань автоматичного розпізнавання друкованих текстів, поданий алгоритм був модифікований для розпізнавання друкованих і рукописних текстів.

Зі створенням засобів введення та обробки потокового цифрового відео, які можуть застосовуватися став метод, заснований на отриманні опису об'єктів у вигляді інваріантних до перетворень переміщення, повороту і зміни масштабу моментів. Застосування даного дескриптора в разі потокового відео доцільніше, оскільки скорочується час на обробку окремо взятого кадру потокового відео. Метод використовує моменти до третього порядку.

Обмеження є експериментальним, оскільки обчислення моментів більш високого порядку вимагає значних обчислювальних засобів. На основі тільки нормованих центральних моментів 2- і 3-го порядків, виводяться набори інваріантів моментів. Найбільш застосовними стали сім інваріантів моментів, які отримали у літературі назву «Хью-дескриптори» (HU-descriptors).

2.1.2 Методи ідентифікації об'єктів

Сучасні методи ідентифікації ділять на дві основні категорії: теоретичні та структурні методи. Теоретичні методи ґрунтуються на кількісному описі ідентифікованих об'єктів сцени. Структурні методи засновані на застосуванні символічних описів і зв'язків між ними. Обидві категорії методів широко застосовуються для ідентифікації образів двовимірних об'єктів.

Найбільш простим серед теоретичних методів ідентифікації об'єктів, є метод вирішальних функцій. Метод передбачає, що перед процесом ідентифікації був проведений процес розпізнавання (процес опису об'єкта), в результаті якого був отриманий на етапі навчання вектор моделі об'єкту з дійсними компонентами:

$$x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T,$$

де x_i – i -тий дескриптор об'єкту.

Якщо завдано M класів об'єктів:

$$M = \{w_1, w_2, \dots, w_m\},$$

то задачею ідентифікації є визначення M функцій $d_1(x), d_2(x), \dots, d_m(x)$, таких, що для будь-якого модельного вектора x^* , що належить класу w_i , виконується нерівність:

$$d_i(x^*) > d_j(x^*), \quad j = 1, 2, \dots, M, \quad j \neq i.$$

Метод дозволяє провести робастну ідентифікацію об'єкта. Він часто застосовується для об'єктів, які між собою мало подібні. У разі близькості об'єктів метод може призводити до помилкової ідентифікації. Як нерівностей, застосовуються різні їх модифікації, які залежать від конкретної системи розпізнавання і наявних дескрипторів об'єктів. На основі даного методу будуються також кореляційні методи розпізнавання.

В таких методах процедури розпізнавання та ідентифікації об'єднуються в єдину процедуру – знаходження підобразу на більшому образі. Знаходження підобразу проводиться за рахунок обчислення коефіцієнта кореляції, який може мати вигляд відносного відхилення гістограм інтенсивностей підобразу від гістограм інтенсивностей поточного підобразу зображення сцени. Даний метод чутливий до масштабування, повороту. Застосовується найчастіше у системах пасивної навігації, розпізнавання заданих ділянок місцевості на карті при аерофотозйомці, ділянки роботизованої збірки із точним позиціонуванням деталей.

Іншим теоретичним методом є метод потенційних функцій [26]¹⁾. Спочатку був запропонований для вирішення завдань навчання ідентифікації образів, а в подальшому був узагальнений і реалізований для більш широкого кола завдань, пов'язаних з відновленням і апроксимацією функцій.

Метод подібний до описаного вище методу, однак має більш високі показники якості ідентифікації об'єктів. В основі методу закладена геометрична інтерпретація задачі ідентифікації, яка полягає в поданні зображень у вигляді векторів в просторі вхідних сигналів. Це дозволяє представити задачу ідентифікації як звичайну Апроксимаційні завдання. В процесі навчання показуються точки і повідомляються значення функції в цих точках. Потрібно відновити функцію у всьому просторі пропонованих значень у процесі роботи розглянутого методу. Алгоритми методу потенційних функцій базуються на основній гіпотезі про характер функцій, які поділяють множині різних об'єктів [27]²⁾.

Теоретичні методи ідентифікації ґрунтуються на кількісних моделях об'єктів, які нехтують геометричними параметрами, властивими формі об'єктів. На противагу теоретичним методам, структурні методи ідентифікації використовують розглянуті параметри для опису ідентифікаційної моделі об'єкта.

В основі структурних методів розпізнавання образів покладена декомпозиція об'єкта на складові його елементарні примітиви. У даних методах більш прийнятно використання дескрипторів кордону, які, як вище зазначалося, є розбиття кордону на елементарні частини, які мають власні властивості ідентифікації. Таке уявлення даних застосовується в найбільш простому методі підбору індексів кордонів. В даному випадку межа об'єкта представляється ланцюговим кодом.

¹⁾ [26] Компьютерное зрение. URL: <http://www.roboforum.ru/viewforum.php?f=51&sid=29ea9ba7faf446dda7cbdbcbd5a45d42> (дата звернення: 30.04.2020).

²⁾ [27] Open Source Computer Vision Library. URL: <http://www.intel.com/technology/computing/opencv/index.htm> (дата звернення: 30.04.2020).

Даний код складається з відрізків кордону, які мають різні спрямованості. Для процесу ідентифікації будується дерево схожості і матриця схожості. Дерево схожості є ієрархічне розбиття форм відрізків в залежності від розташування в кордоні об'єкта. Загальна БД еталонних об'єктів при цьому представляється у вигляді шляхів слідування відрізків, що становлять межі окремого об'єкта. Метод застосовується в системах з дискретними датчиками позиціонування для плоских об'єктів.

Більш ресурсоемними методами ідентифікації є синтаксичні методи. Ці методи включають у себе процеси розпізнавання (опису) та ідентифікації. Найпростішими елементами у методі є описи межі об'єкта на рівні зв'язків її точок. Відповідно до цих зв'язків будуються правила відновлення межі об'єкта – граматики. Для завдання еталонного об'єкта створюються з граматик пропозиції, що описують кордон даного об'єкта. Даний метод позитивно працює при описі скелета області у БД еталонних об'єктів у вигляді одного або декількох пропозицій.

Наведені методи розпізнавання та ідентифікації знаходять своє застосування у різних СТЗ. Вони надають пріоритетні можливості створювати гнучкі перепрограмовані або самонавчальні системи розпізнавання для промислових і непромислових систем автоматизації діяльності людини у різних областях науки і техніки.

2.2 Існуючі системи технічного зору

Створення власної підсистеми розпізнавання та ідентифікації об'єктів робочого простору вимагає розгляду аналогічних систем, оскільки розробки в цій галузі повинні бути спрямовані на модифікацію існуючих методів або на створення абсолютно нових методів роботи підсистеми в цілому. При розгляді існуючих розробок виявляються характеристики класичних методів обробки зорової інформації, їх позитивні і негативні сторони.

Підсистеми подібного класу розробляються в більшості випадків великими корпораціями для власних промислових потреб. Такі розробки часто є вузькоспеціалізованими. Цей факт є значною проблемою при портуванні подібних систем в умови середніх і малих підприємств. На більшості підприємств до сих пір використовуються старі моделі СТЗ, зарекомендували себе як надійний засіб автоматизації виробництва.

Однією з досить давно розроблених у робототехніці є СТЗ «Autoview» фірми British Robotic Systems (Великобританія). Система побудована на базі спеціалізованого процесора LSI 11-13, який здатний у реальному масштабі часу аналізувати зображення розміром 256 x 256 (256 градацій яскравості).

Алгоритми роботи полягають у безпосередній взаємодії захоплюючого пристрою ПР із розпізнанням об'єктом, який переміщається перед об'єктивом статично закріпленої камери, з метою ідентифікації та подальшої обробки об'єкта. Система у комплексі з СУ ПР забезпечує позиціонування деталі з похибкою не більше $\pm 0,5$ %. Область застосування: ділянки автоматичного складання виробів. Недоліком системи є статичне розташування камери, що базується на вимогах до робочого простору СТЗ [28]¹⁾.

Іншим застосуванням СТЗ, є технологічні ділянки сортування проходів по конвеєру об'єктів. СТЗ подібного класу є розробка фірми Optical Recognition Systems (США). Система використовується на ділянках сортування. В системі використовується інформація про кольорову гаму пачок. Інформація піддається модифікованому алгоритму гістограмного згладжування, за рахунок якого забезпечується швидкісне виділення країв об'єктів, з подальшою ідентифікацією об'єктів за колірною гамою.

Застосування ПР, оснащених СТЗ не обмежується виробничими приміщеннями підприємств. В інституті ім. Келдиша розроблений експериментальний комплекс, який у реальному часі емулює захоплення космічного супутника за допомогою маніпулятора ПР типу РМ-01. СТЗ є апаратно-

¹⁾ [28] Цифровое компьютерное зрение. URL: <http://graphics.cs.msu.ru/courses/cg02b/library/> (дата звернення: 28.04.2020).

програмним комплексом на базі персонального комп'ютера і двох статично закріплених відеокамер. В системі використовуються методи розпізнавання на основі особливих точок об'єкта. До недоліків системи слід віднести відсутність мобільних камер і, як наслідок, високі технічні вимоги до робочого простору ПР [29], [30]¹⁾.

Найбільш перспективна і багатообіцяюча галузь застосування СТЗ – це зорова чуттєвість мобільних роботів. Тут позначаються відмінності мобільних роботів від статично встановлених роботів – можливість вільно пересуватися у виробничому приміщенні. Область застосування таких роботів найбільш велика:

- транспортні операції в межах цеху;
- підводні;
- космічні;
- геологічні;
- дослідні роботи та ін.

В таких системах швидкісні характеристики СТЗ є критичними, оскільки вона повинна забезпечити розпізнавання та ідентифікацію об'єктів навколишнього простору за час: менше ніж 1 / 30 секунди.

Як ми бачимо, поряд з теоретичними і експериментальними дослідженнями в області УЗ виконано багато практичних робіт. Розроблено універсальні та спеціальні УЗ верстати, установки, що працюють під підвищеним статичним тиском, УЗ механізовані установки для очищення деталей, генератори з підвищеною частотою та новою системою охолодження, перетворювачі з рівномірно розподіленим полем. Створені і впроваджені у виробництво автоматичні УЗ установки, які включаються у потокові лінії, що дозволяють значно підвищити продуктивність праці.

¹⁾ [29] Катус Г. П. Техническое зрение роботов. Москва: Машиностроение, 1989. 176 с.

[30] Хорн Б. К. Зрение роботов. Москва: Мир, 1989. 488 с.

2.3 Загальний принцип побудови моделі

У відповідності до традиційної організації моделювання, інформаційними потоками обмінюються дослідник-проектувальник та імітаційна модель, зворотний зв'язок за результатами такого моделювання робить, зовнішній по відношенню до системи імітаційного моделювання, ланцюжок – людина із залученням допоміжних засобів та методів програмного забезпечення [30] ¹⁾.

При цьому дослідник-проектувальник виконує функцію перетворення інформації, яка складається з інтерпретації результатів та прийняття рішень щодо управління експериментами та узагальнення інформації до бази знань інтелектуального робота. Автоматизація управління експериментами передбачає при цьому створення замкнутого програмно реалізованого контуру управління імітаційної моделлю, в рамках засобів зовнішнього програмного забезпечення (рис. 3).

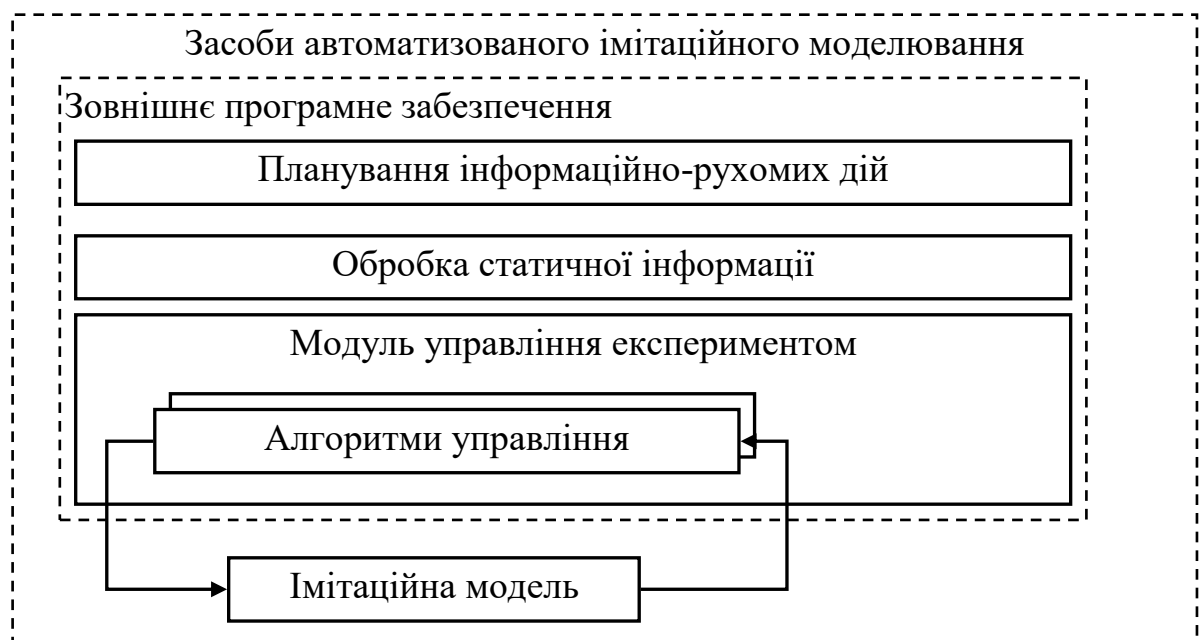


Рисунок 3 – Структура інформаційно-управляючої моделі

¹⁾ [30] Хорн Б. К. Зрение роботов. Москва: Мир, 1989. 488 с.

Цілеспрямовані серії експериментів, відповідно до заданої мети функціонування робота і урахування обмежень конфігураційних параметрів організовують модулі, які спеціально відносять до складу зовнішнього програмного забезпечення. У загальному випадку, ці модулі повинні задавати набори початкових даних, ініціювати прогони моделі в цілому, обробляти результати і приймати рішення про подальший розвиток експериментів на відповідність реалізованого алгоритмом управління моделюванням.

Такий алгоритм, спрямовуючи експерименти, у області допустимих значень параметрів, здійснює пошук їх об'єднання, яке б забезпечило оптимум заданого показника якості, тобто по суті вирішувало завдання оптимізації:

$$f(\bar{x}) \rightarrow \max_{x \in X}$$

де f – цільова функція або алгоритмічно представлена імітаційна модель;

$\bar{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ – вектор параметрів об'єкта моделювання;

X – множина допустимих значень вхідних параметрів.

Таким чином, сукупність алгоритмічних і програмних засобів, що забезпечує процес автоматизованого моделювання, утворює систему автоматизації імітаційного моделювання (САІМ) [28]¹⁾. Оскільки користувач при цьому не вводить кожен набір початкових даних для чергового прогону імітаційної моделі і тільки вказує мету або критерій та область варіювання параметрів, у той час як пошук допустимих рішень задач моделювання виконується за допомогою САІМ автоматично.

До останньої можна застосувати визначення інтелектуальної системи моделювання, наприклад: функції САІМ, у контурі управління гнучкою виробничою системою, в цілому, полягають в аналізі альтернативних варіантів

¹⁾ [28] Цифровое компьютерное зрение. URL: <http://graphics.cs.msu.ru/courses/cg02b/library/> (дата звернення: 28.04.2020).

поведінки роботів після прийняття того чи іншого можливого рішення щодо диспетчеризації та оперативного планування інформаційно-рухових дій тощо.

Ефективність реалізації цих функцій обумовлена заміною жорсткої логіки управління інтелектуальним роботом, що передбачає використання в окремих ситуаціях заданих та фіксованих евристик, гнучким і динамічним механізмом, який забезпечує прийняття рішень не тільки на основі такого аналізу поточного стану робота, але і з урахуванням перспектив його розвитку. При цьому об'єднуються висока вірогідність результатів і можливість автоматичного прийняття рішень в режимі «жорсткого» реального часу.

Проблема автоматизації управління експериментами синтезу знань і побудови бази знань може бути представлена логічною структурою поетапного вирішення окремих завдань інтелектуального робота (рис. 4).

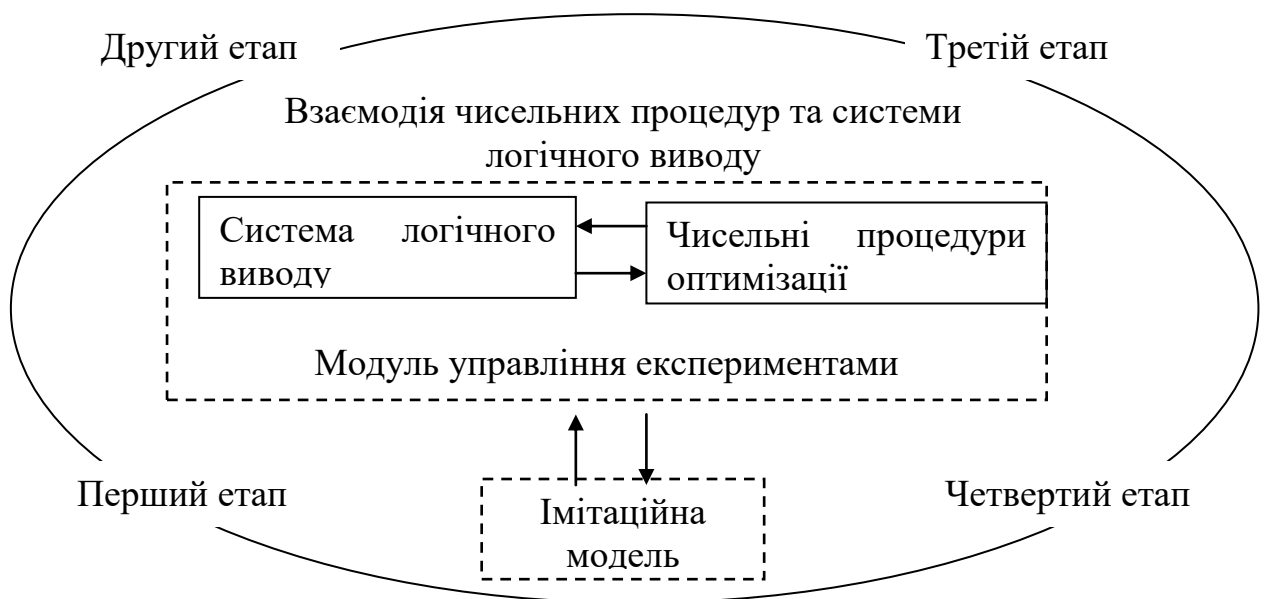


Рисунок 4 – Автоматизоване моделювання інтелектуального об'єкта

На першому етапі автоматизації управління експериментами вирішуються два завдання:

- виконується структурно-алгоритмічна побудова власне модуля управління;
- формуються змістовні основи і формальні вимоги до організації інформаційного обміну з імітаційної моделлю.

Завдання структурно-алгоритмічної побудови модуля управління експериментами і синтезу системи знань вирішується у наступній послідовності: визначаються склад і структура модуля, а згодом розробляються умови взаємодії його компонентів та положення у загальній структурі САІМ.

При виконанні серії прогонів імітаційної моделі відбувається цілеспрямоване варіювання значень параметрів, яке може впливати на значення цільової функції не тільки за допомогою прямого впливу на показники функціонування об'єкта моделювання, а й побічно за допомогою інших пов'язаних елементів об'єкта (робота).

Як наслідок, змінюються вартісні та інші показники. Поряд з тим, на значення деяких параметрів можна накласти обмеження, зокрема частину їх фіксувати, тобто задати декларативно – це може відображатися при формуванні наборів початкових даних та ініціалізації початкових станів процесу моделювання системи знань.

Розглядаючи імітаційну модель як засіб цілеспрямованого перетворення інформації, відповідно до деякої системи приписів, має сенс говорити про алгоритм імітаційного моделювання. Тоді формальну інтерпретацію розглянутих вимог можна записати в такий спосіб:

$$\left. \begin{array}{l} S \in Q; \\ S \in C; \end{array} \right\}$$

де S – вхідне слово алгоритму імітаційного моделювання;

Q – множина допустимих наборів значень параметрів робота;

C – область визначення алгоритму імітаційного моделювання.

Вхідне слово S задає набір початкових даних для конкретного набору, тобто:

$$S = (i, \xi_j, \dots, \xi_z),$$

де кожна величина ξ_j – відповідає деякому значенню певного параметра об'єкта моделювання.

Область C визначається програмною реалізацією алгоритму імітаційного моделювання, а утворити її можливо множиною D_{ex} наборів вхідного алфавіту. Всі величини ξ_i , мають дозволена реалізацію визначеного об'єкта моделювання U .

Таким чином, розглянутий вираз визначає умови узгодження S з імітаційної моделлю та з алгоритмом. Завдання полягає в розробці апарату формального аналізу несуперечності змін семантично взаємопов'язаних параметрів для забезпечення варіювання, що не порушує умов виразу та не призводить до змін фіксованих параметрів.

На другому етапі проводиться автоматизація управління експериментами і побудови системи знань, вирішуються наступні етапи:

- розробка принципів, взаємодії системи логічного висновку і численних оптимізаційних процедур;
- вибір (розробка) апарату реалізації логічного висновку у комбінованих алгоритмах управління експериментами;
- розробка на основі запропонованого апарату ефективних алгоритмів виведення з урахуванням специфіки взаємодії із чисельними процедурами оптимізації.

На третьому етапі вирішується завдання розробки оптимізаційних процедур, які використовуються у плануванні екстремальних дій. При цьому питання розробки алгоритмічного забезпечення можна розглядати для специфічних аспектів моделювання об'єкта, а саме:

- автоматизації управління експериментами в умовах лінгвістичної невизначеності параметрів, наприклад, «ступінь подібності / відмінності ...» не має чисельного вимірювання;
- організації екстремальних експериментів у задачах однопараметричної оптимізації при істотно нерівномірному розташуванні точок у середині інтервалу, наприклад, унімодальна функція відгуку та і фіксування відповідних станів ув моделі системи знань;
- скорочення часу пошуку при значній тривалості прогону імітаційної моделі, що є важливим при багатоітераційних алгоритмах пошуку, повному перебиранні варіантів тощо.

3 ПРОЕКТУВАННЯ БАГАТОКАНАЛЬНОЇ СИСТЕМИ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ЗОРУ РОБОТА «ФЕНІКС 3»

3.1 Складання структурної схеми

Структура спроектованого далекоміра робота приведена на рис. 5.

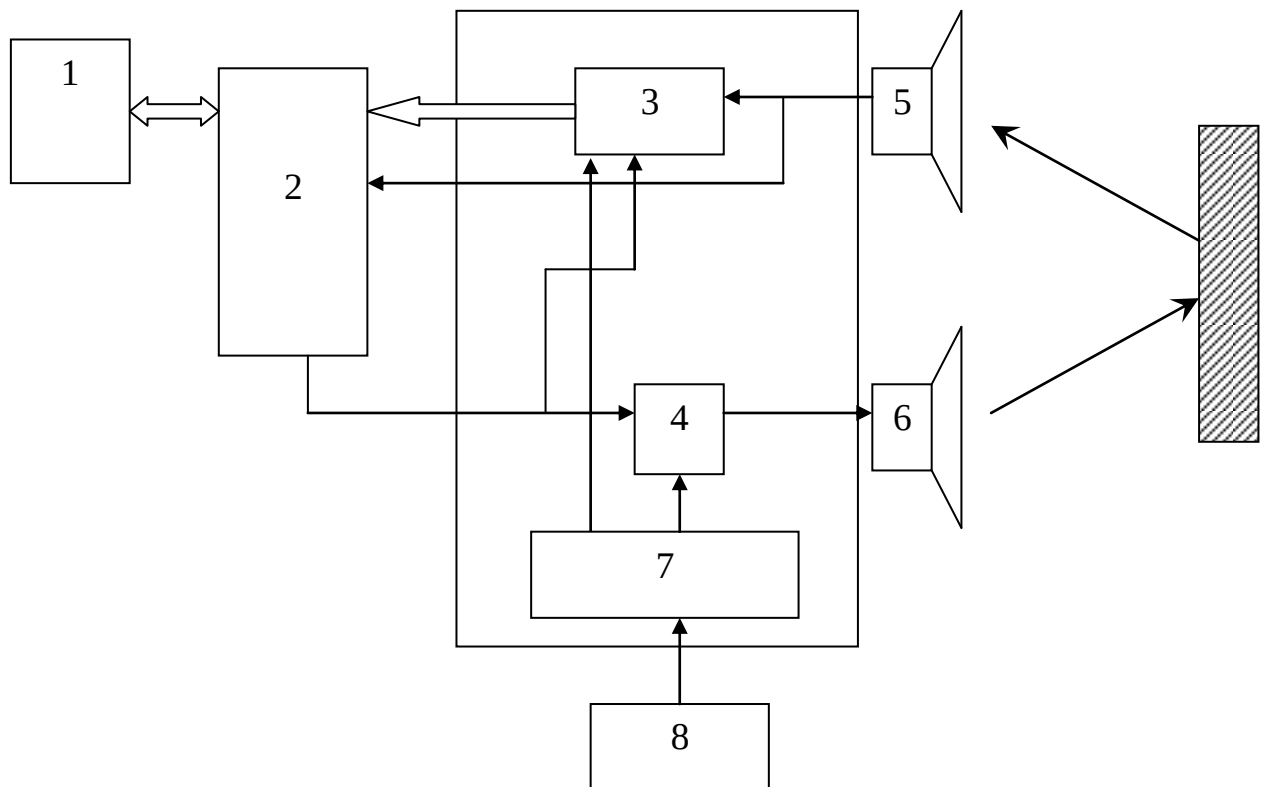


Рисунок 5 – Структурна схема мережевого ультразвукового одноканального далекоміра з наступними структурними компонентами: 1 – контролер шини CAN; 2 – мікроконтролер PIC18F458; 3 – 16-бітний лічильник; 4 – формувач пачки імпульсів; 5 – ультразвуковий приймач; 6 – ультразвуковий випромінювач; 7 – подільник частоти; 8 – опорний кварцовий генератор

3.2 Принцип дії ультразвукового модуля

Систему УЗ зору можна розділити на дві частини:

- а) сенсорний вузол – виконує цикл вимірювання дальності і передає цю інформацію по каналу зв'язку за запитом вузла;
- б) приймальний вузол – надсилає запит і отримує інформацію від попереднього вузла.

Вузли з'єднуються між собою за допомогою послідовної шини CAN. В рамках структури робота «Фенікс 3», роль вузла б) виконує контролер-«майстер».

Сенсорний вузол являє собою різновид класичного імпульсного локалізатора. Мікроконтролер (МК) PIC18F458 з інтервалом в 100 мс формує та запускає імпульс, який запускає формувач пачки імпульсів і одночасно запускає на рахунок 16-бітний лічильник часу. Пристрій для формування пачки імпульсів виробляє пачку імпульсів частотою 40 кГц і тривалістю 40 мкс.

Випромінений УЗ сигнал відбивається від об'єкта і повертається назад. Фронт першого прийнятого імпульсу зупиняє лічильник часу, а також формує сигнал закінчення циклу вимірювання. При надходженні цього сигналу МК зчитує значення, що накопичилося у лічильнику. Подільник частоти формує сигнали необхідних частот для схеми. Зокрема, на лічильник для підрахунку часу подаються імпульси з періодом 1 мкс. Таким чином, можна знайти відстань до об'єкта як:

$$L = \frac{340 \cdot T \cdot 10^{-6}}{2} \text{ (м)},$$

де T – число, накопичене у лічильнику. Теоретична мінімальна відстань вимірювання становить:

$$L_{\min} = \frac{340 \cdot 40 \cdot 10^{-6}}{2} = 0,0068 \text{ (м)} = 6,8 \text{ (мм)}.$$

На практиці, через конструктивні особливості випромінювача та приймача, мінімальна вимірювана відстань виходить більша та становить близько 200 мм.

Виходячи з принципу дії системи УЗ зору, максимальна розрішувальна здатність, з якою проводиться вимірювання відстані, становить:

$$L = \frac{340 \cdot 10^{-6}}{2} = 0,00017 \text{ (м)} = 0,17 \text{ (мм)}.$$

Максимальна відстань обмежується, в основному, потужністю випромінювача і становить близько 2 м. У схемі немає спеціального сигналу для випадку, коли сигнал не досягне приймача. При цьому, коли лічильник відлічить 216 імпульсів, він зупиняється та формується сигнал закінчення рахунку. Таким чином, максимальний час вимірювання відстані складає приблизно:

$$65536 \cdot 10^{-6} = 0,07 \text{ (с)}.$$

3.3 Розробка і проектування системи

У низькочастотному УЗ діапазоні застосовуються електродинамічні випромінювачі та випромінювальні магнітострикційні перетворювачі і п'єзоелектричні перетворювачі. Найбільш широкого поширення набули випромінювачі магнітострикційного і п'єзоелектричного типів.

Принцип п'єзоелектричного ефекту використовується при виготовленні випромінювачів УЗ коливань, які перетворюють електричні коливання в механічні. Як п'єзоелектричних матеріалів застосовують кварц, титаніт барію, фосфат амонію.

Коефіцієнт корисної дії (ККД) п'єзоелектричних перетворювачів досягає 90%, інтенсивність випромінювання – кілька десятків Вт / см². Для збіль-

шення інтенсивності і амплітуди коливань використовують УЗ концентратори. У діапазоні середніх УЗ частот концентратор являє собою фокусуючу систему, найчастіше у вигляді п'єзоелектричного перетворювача увігнутою форми, що випромінює хвилю, яка сходиться. У фокусі подібних концентраторів досягається інтенсивність $105 - 106 \text{ Вт / см}^2$.

Як приймачі УЗ на низьких і середніх частотах найчастіше застосовують електроакустичні перетворювачі п'єзоелектричного типу. Такі приймачі дозволяють відтворювати форму акустичного сигналу, тобто тимчасову залежність звукового тиску. Залежно від умов застосування приймачі роблять або резонансними, або широкосмуговими.

Для отримання усереднених за часом характеристик звукового поля використовують термічними приймачами звуку у вигляді покритих звукопоглинальним речовиною термопар або термісторів. Інтенсивність і звуковий тиск можна оцінювати і оптичними методами, наприклад по дифракції світла на УЗ.

Для перевірки працездатності обраного алгоритму роботи сенсорного вузла було вироблено його попереднє макетування.

Для цього була використана допрацьована макетна плата, що запозичена з іншого проекту. Як інтерфейс для зв'язку з контролером-«майстром» був використаний контролер шини CAN MCP2510, тому що він вже був на цій платі.

У якості випромінювача та приймача УЗ використані п'єзоперетворювачі MuRata MA40B8S і MA40B8R відповідно. Вузли 3, 4 і 7 реалізовані на ПЛІС MAX EPM7128STC100. Для іншого вузла був використаний МК PIC18F458, наявний на платі.

Принципова схема плати наведена на рис. 6.

Для макетування системи використовувався тільки один УЗ канал. У якості контролера-«майстра» була використана макетна плата підтримки розробки для контролера «ASK Lab», на якій також був встановлений інтерфейсний контролер CAN MCP2510.

Вузол використовувався для тестових цілей при налагодженні сенсорного вузла. Макетна плата включає в також себе контролер шини CAN MCP2510, PIC18F458 та символний рідкокристалічний індикатор.

Плата була піддана наступному доопрацюванню:

- вивід 16 мікросхеми D3 (за схемою) відключений від порту RB1 МК і підключений до порту RC2 – це було зроблено для сумісності з наявними вбудованими бібліотеками для контролера шини CAN MCP2510, що наявні у складі компілятора C18.
- ПЛІС відключена від порту RC2 МК.
- вивід 17 контролера CAN D3 з'єднаний із живленням $U = +5 \text{ В}$; у нашому випадку – це спеціальний сигнал скидання, що не використовується, адже використане програмне скидання контролера CAN.
- як Q3 – Q6 використані МОП-транзистори IRLML2402, а Q1 та Q2 – IRLML6401 – у цих транзисторів опір у відкритому стані значно менший, ніж у тих, які використовувалися у оригінальній схемі; при цьому, щоб вихідні ключі стабільно закривалися довелося також додати у колі затворів Q3 та Q4 резисторів витоку (на землю) по $R = 2,2 \text{ кОм}$.
- вивід DRDY ПЛІС з'єднаний із портом RB1 МК, а вихід INT CAN контролера – до порту RB0.

«Майстер» і сенсорна плата обмінюються даними по шині CAN. МК періодично формує запити даних, бере дані від сенсорного вузла та виводить прийняту інформацію на індикатор. Також на індикатор виводиться інформація про тестові опитування сенсорного вузла.

При надходженні команди запиту даних МК сенсорного вузла передає числові дані про поточну відстань вимірювання. Також періодично (раз у 100 мс) МК передає «майстру» тестове посилення для підтвердження того, що вузол функціонує нормально.

Програмне забезпечення для МК сенсорної плати і макетної плати «ASK Lab» написано на мові C18 і відкомпільовано у середовищі MPLAB 8 [31]¹⁾.

Прошивка для мікросхеми ПЛІС створена у середовищі MAX+ 10.0 [32]²⁾.

Плата сенсорного вузла була встановлена у пластмасовий корпус, на бічні стінки якого були також виведені роз'єми для підключення живлення, п'єзоперетворювачі та лінії CAN. Зовнішній вигляд зібраного УЗ модуля наведено на рис. 7.



Рисунок 7 – Зовнішній вигляд УЗ модуля

П'єзоперетворювачі встановлені у спеціальні тримачі, які забезпечують механічний захист, а також полегшують установку на робот. Зовнішній вигляд ультразвукового прийомника-передавача наведено на рис. 8.

¹⁾ [31] Грегори К. Использование Visual C++ 6.0. Спец. издание: Пер. с англ. Санкт-Петербург: Вильямс, 2004. 864 с.

²⁾ [32] Архангельский А. Я. Программирование в C++ Builder 4. Москва: БИНОМ, 2005. 928 с.



Рисунок 8 – Зовнішній вигляд ультразвукового прийомника-передавача

3.4 Проведення випробувань

Для перевірки працездатності системи були проведені попередні випробування. Проводилося визначення відстані до різних об'єктів і спостереження результату на індикаторі приймального вузла УЗ.

Випробувальна установка являє собою сукупність перешкод (рис. 9):

- корпус CD-диска;
- рухомого випромінювача (синя котушка), приймальна частина якого жорстко зафіксована пайкою на платі та націлена на перешкоду.

Звук йде, відповідно, від випромінювача, відбивається від перешкоди та потрапляє у приймач, який розташований на цій же платі (рис. 10). У цей момент відбувається підрахунок різниці часу між сигналами випромінювача та приймача. Знаючи швидкість поширення звуку у повітрі та розраховану часову різницю – розраховується відстань до перешкоди.

При аналізі осцилограми сигналу, можна вибрати два способи контролю відстані. Позначимо перший з них – жовтим: момент спрацьовування переривання МК УЗ далекоміра на прийомі; а другий – червоним: пачка імпульсів (як правило, імпульс доходить аж ніяк не в ідеальному вигляді та у повному обсязі, тобто може не бути пари перших або останніх імпульсів) (рис. 11).



Рисунок 9 – Загальний вигляд випробувальної установки



Рисунок 10 – Проведення випробувань УЗ далекоміра

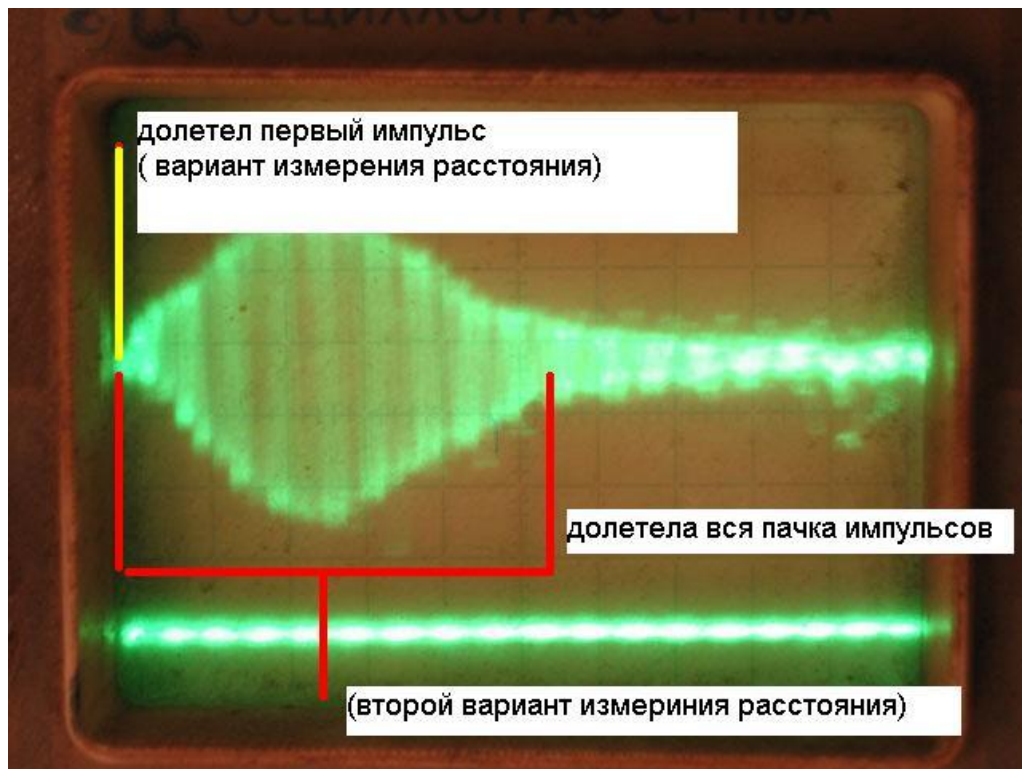


Рисунок 11 – Осцилограма отриманого сигналу далекоміру

Для порівняння результатів вимірювання перешкод, визначимо, спочатку вид сигналу, що визначає порожній простір або робочу зону робота без перешкод (рис. 12).

Осцилограма сигналу, відбитого від перешкоди (у нашому випадку CD-диска) представлена на рис. 13. Зліва (за екраном) імпульс синхронізації, посланий від контролера до другого каналу осцилографа.

Як неважко здогадатися: імпульс синхронізації надсилається перед усім пакетом уявлення – з цього картина має прив'язку тільки до нього і якщо збільшити відстань до перешкоди, то «кучність» теж від'їде вправо, аж до кордонів екрану.

Залежно від того, у які умови потрапляє робот, можна обирати способи контролю відстані (рис. 11), а саме: другий виразно точніше, але програє при використанні УЗ далекоміра у вузьких просторах, де необхідно стежити за тим, щоб після отримання пачки імпульсів не впіймати другу – відбиту від будь-чого та не прийняти її кінець за кінець сумарної пачки.

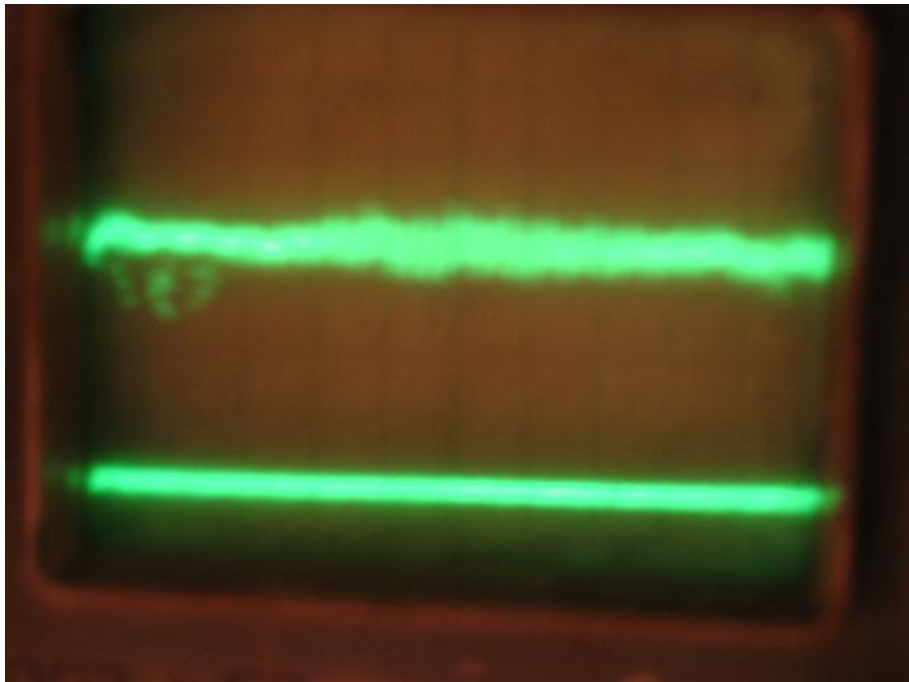


Рисунок 12 – Осцилограма сигналу порожнього простору

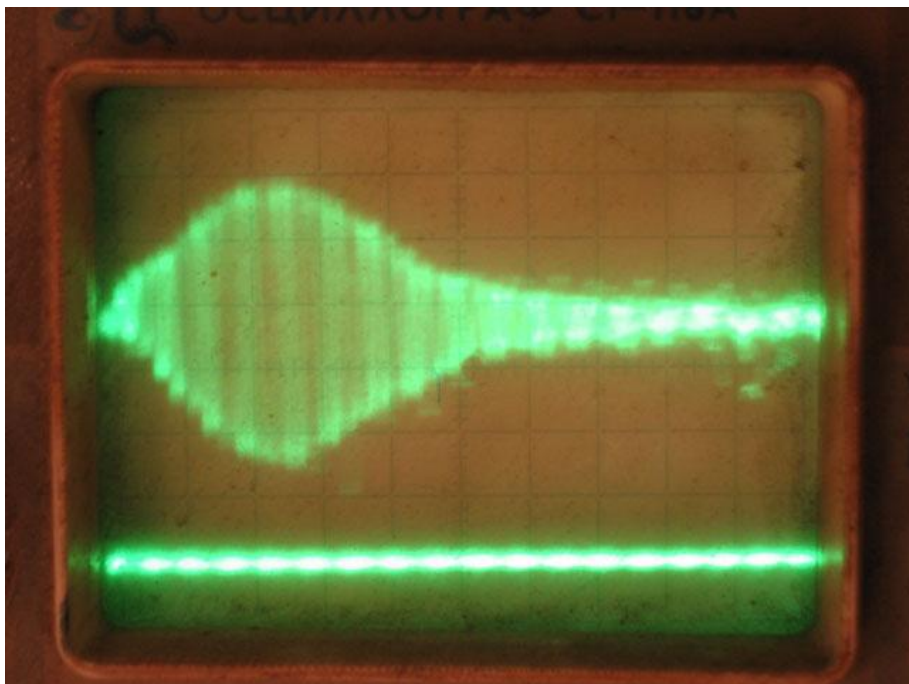


Рисунок 13 – Осцилограма сигналу, відбитого від перешкоди

В першому випадку, УЗ далекомір працює не настільки точно як може, проте виміряна відстань – це гарантована відстань до найближчої перешкоди.

ВИСНОВКИ

При виконанні бакалаврської кваліфікаційної роботи, була досягнута мета роботи: розроблена УЗ система вимірювання відстані до перешкоди на основі розпізнавання та ідентифікації об'єктів робочого простору автономного мобільного робота.

Розглянуті методи розпізнавання та ідентифікації надають базові засоби для реалізації основних функціональних можливостей системи. Проведений порівняльний аналіз показав, що з урахуванням вимог технічного завдання не всі методи можуть бути застосовані в розробці.

Мобільний робот «Фенікс 3» забезпечений системою об'їзду перешкод, для чого передбачається використовувати СТЗ на базі багатоканального УЗ далекоміра.

В рамках побудови архітектури бортової системи робота «Фенікс 3», було виконано проектування одноканального УЗ далекоміра, реалізованого за мережевою технологією на базі п'єзоперетворювачів MA40S8S та MA40S8R фірми MuRata.

Як показали проведені розрахунки, шина CAN має низку переваг у порівнянні із RS-485, а саме: апаратна реалізація адресації та арбітражу шини. Ґрунтуючись на отриманих результатах, можна рекомендувати прийняти рішення використовувати шину CAN як бортову мережу робота «Фенікс 3».

Також, у роботі приведена обробка результатів, отриманих при аналізі осцилограм сигналів одноканального УЗ далекоміра.

Результати бакалаврської кваліфікаційної роботи планується використати при побудові курсу лабораторних робіт на кафедрі автоматизованих систем моніторингу навколишнього середовища Одеського державного екологічного університету з дисципліни «Internet речей».

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Фу К., Гонсалес Р., Ли К. Робототехника: Пер. с англ. Москва: Мир, 1989. 624 с.
2. Романовский П. И. Ряды Фурье. Теория поля. Аналитические и специальные функции. Преобразование Лапласа. Москва: Наука. Гл. ред. физ.-мат. л-ры, 1980. 336 с.
3. Великодний С. С. Аналіз динамічної точності дволанкового маніпулятора промислового робота. *Автоматизированные системы управления и приборы автоматики*. 2005. Вып. 130. С. 82–85.
4. Невлюдов І. Ш., Великодний С. С. Метод інтерполяції дуги кола для систем програмного відтворення рухів. *Радиоэлектроника и информатика*. 2007. № 3. С. 31–37.
5. Невлюдов І. Ш., Великодний С. С. Алгоритм інтерполяції дуги кола для систем програмного відтворення рухів. *Автоматизированные системы управления и приборы автоматики*. 2007. Вып. 142. С. 90–95.
6. Невлюдов И. Ш., Великодний С. С., Омаров М. А. Использование CAD/CAM/CAE/CAPP при формировании управляющих программ для станков с ЧПУ. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2010. № 2/2 (44). С. 37–44.
7. Великодний С. С. Методи реінжинірингу програмних систем. *Технологии приборостроения*. 2014. Спец. вып. С. 65–68.
8. Великодний С. С. Проектування траєкторії руху технологічного обладнання при виготовленні елементів суднових конструкцій. *Автоматизация судовых технических средств*. Вып. 16. 2010. С. 10–18.
9. Худяев А. А. Чебитько, А. Е., Великодний С. С. Алгоритм формирования траектории движения рабочего органа манипулятора по дуге окружности. *Нові рішення в сучасних технологіях. Вісник національного технічного університету “ХПІ”*. 2004. № 39. С. 28–46.

10. Великодний С. С., Котенко Е. В. Разработка системы реального времени распознавания лиц с использованием примитивов Хаара и алгоритма ADABOOST. *Холодильна техніка і технологія*. 2010. № 5 (127). С. 67–70.
11. Великодний С. С., Бурлаченко Ж. В., Зайцева-Великодна С. С. Реінжиніринг графічних баз даних у середовищі відкритої системи автоматизованого проектування BRL-CAD. Моделювання структурної частини. *Вісник Кременчуцького національного університету ім. Михайла Остроградського*. 2019. Вип. 3 (116). С. 130–139. (кат. «Б») DOI: 10.30929/1995-0519.2019.3.130-139.
12. Oskar J. O. Master Thesis LiTH-ISY-3132. Computer Vision Classification of Leaves from Swedish Trees. *Söderkvist*. 2001. # 3. P. 45–48.
13. Theodoris S., Koutroumbas K. Pattern Recognition. Academic Press, 1999. 124 p.
14. Шикин А. В., Боресков А. В. Компьютерная графика. Полигональные модели. Москва: ДИАЛОГ-МИФИ, 2010. 464 с.
15. Gonzalez R.C., Wintz P. Digital Image Processing. Addison–Wesley: Reading, Mass., 1996. 96 p.
16. Путятин Е. П., Аверин С. И. Обработка изображений в робототехнике. Москва: Машиностроение, 1990. 320 с.
17. Васильев В. И. Распознающие системы. Справочник. Киев: Наук. думка, 1983. 422 с.
18. Баклицкий В. К., Бочкарёв А. М., Мусьяков М. П. Методы фильтрации сигналов в корреляционно-экстремальных системах навигации. Москва: Радио и связь, 1986. 216 с.
19. Хорн Б. К. Зрение роботов: Пер. с англ. Москва: Мир, 1989. 487 с.
20. Романовский П. И. Ряды Фурье. Теория поля. Аналитические и специальные функции. Преобразование Лапласа. Москва: Наука. Гл. ред. физ.-мат. л-ры, 1991. 336 с.

21. Жлуктенко В. І., Наконечний С. І. Теорія ймовірностей та математична статистика: навч.-метод. посіб. у 2-х частинах. Ч. 1: Теорія ймовірностей. Київ: КНЕУ, 2009. 304 с.
22. Sung K. K., Poggio T. Learning Human Face Detection in Cluttered Scene. Lecture Notes in Computer Science. Computer Analysis of Images and Patterns. 1995. P. 432–439.
23. Пентланд А. С., Чаудхари Т. Распознавание лиц для интеллектуальных сред. Открытые Системы. № 3. 2009. С. 86–95.
24. Абламейко С. В., Лагуновский Д. М. Обработка изображений: Технология, методы, применение. Минск: Техника, 2009. 302 с.
25. Форсайт П. Компьютерное зрение. Современный подход. Москва: Издательский дом «Вильямс». 2004. 928 с.
26. Компьютерное зрение. URL: <http://www.roboforum.ru/viewforum.php?f=51&sid=29ea9ba7faf446dda7cbdbcbd5a45d42> (дата звернення: 30.04.2020).
27. Open Source Computer Vision Library. URL: <http://www.intel.com/technology/computing/opencv/index.htm> (дата звернення: 30.04.2020).
28. Цифровое компьютерное зрение. URL: <http://graphics.cs.msu.ru/courses/cg02b/library/> (дата звернення: 28.04.2020).
29. Катус Г. П. Техническое зрение роботов. Москва: Машиностроение, 1989. 176 с.
30. Хорн Б. К. Зрение роботов. Москва: Мир, 1989. 488 с.
31. Грегори К. Использование Visual C++ 6.0. Спец. издание: Пер. с англ. Санкт-Петербург: Вильямс, 2004. 864 с.
32. Архангельский А. Я. Программирование в C++ Builder 4. Москва: БИНОМ, 2005. 928 с.