

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ВАСИЛЯ СТУСА

МУЗИКА РОМАН ВОЛОДИМИРОВИЧ

Допускається до захисту:
В.о. завідувача кафедри
прикладної математики та
кібербезпеки, доктор філософії з
математики

_____ Луценко А. В.
«__» _____ 20__ р.

**РОЗРОБКА ТА ПОБУДОВА СИСТЕМИ ЛОКАЛІЗАЦІЇ ДЛЯ
ОБМЕЖЕНИХ ПО ЗОРУ**

Спеціальність 105 Прикладна фізика та наноматеріали

Кваліфікаційна (магістерська) робота

Науковий керівник:
Д. В. Чернов,
к.т.н., доцент,
доцент кафедри прикладної
математики та кібербезпеки

(підпис)

Оцінка : ____ / ____ / ____

(бали/за шкалою ЄКТС/за національною шкалою)

Голова ЕК: _____

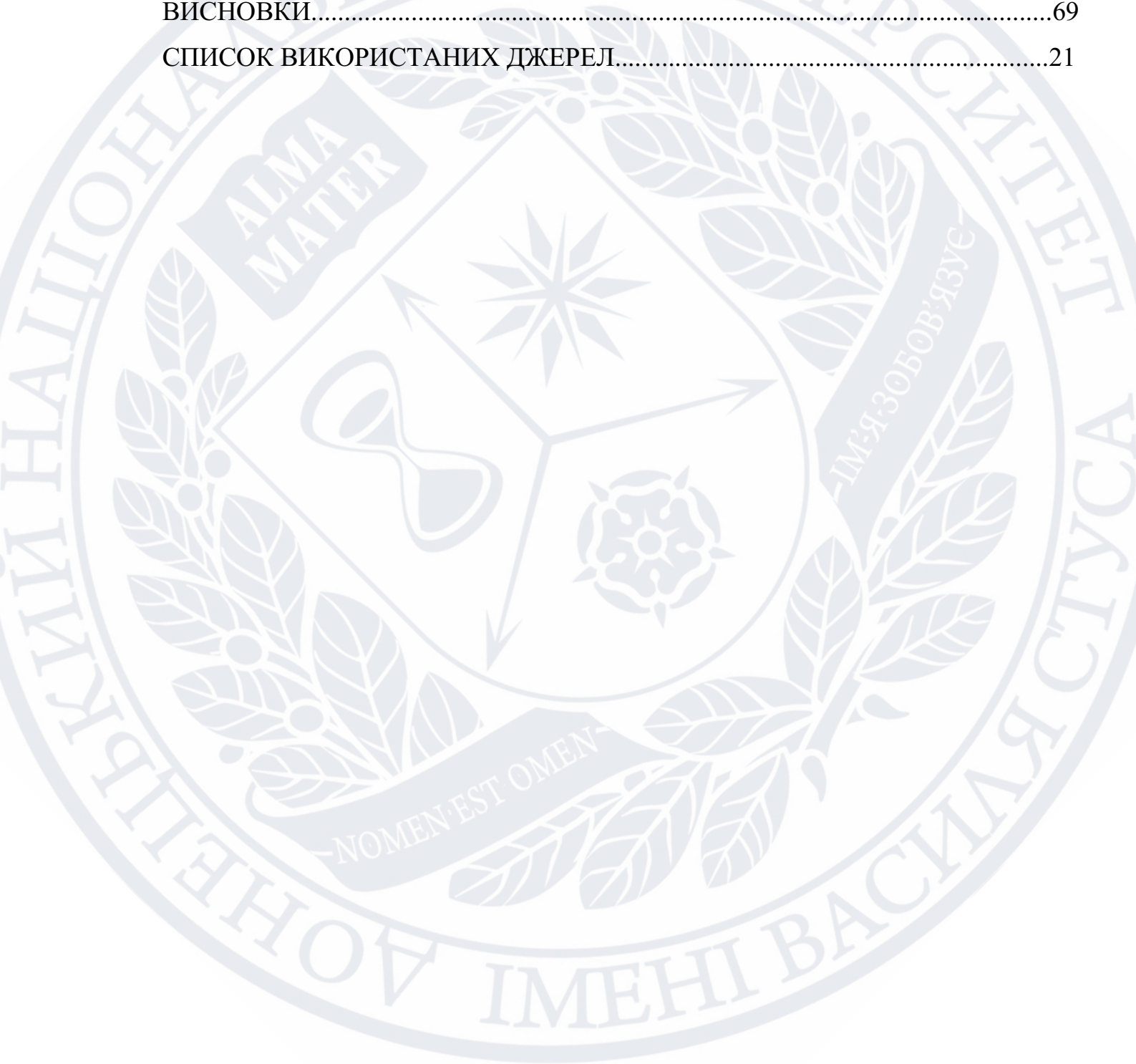
(підпис)

Вінниця 2024

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ СИСТЕМ ЛОКАЛІЗАЦІЇ ДЛЯ ЛЮДЕЙ З ОБМЕЖЕНИМ ЗОРОМ.....	7
1.1. Поняття та класифікація технологій локалізації.....	7
1.2. Аналіз сучасних систем навігації та орієнтації для людей з вадами зору.....	13
1.3. Особливості комп'ютерного зору та акустичних технологій у системах локалізації.....	16
1.4. Використання тактильного та звукового зворотного зв'язку для забезпечення просторової орієнтації.....	19
Висновки до розділу 1.....	23
РОЗДІЛ 2. ПРОЄКТУВАННЯ АРХІТЕКТУРИ СИСТЕМИ НАВІГАЦІЇ ТА ПРОСТОРОВОЇ ОРІЄНТАЦІЇ.....	24
2.1. Вимоги до архітектури системи навігації для осіб з обмеженим зором.....	24
2.2. Вибір компонентів та обладнання для побудови системи навігації.....	27
2.3. Проєктування програмного забезпечення для інтеграції навігаційних і орієнтаційних функцій	30
2.4. Впровадження методів тактильного і звукового зворотного зв'язку для забезпечення навігації	39
2.5. Розміщення та налаштування маячків iBeacon для забезпечення точності позиціонування	42
2.6. Технологія триангуляції та її роль в інтелектуальній системі навігації	55
Висновки до розділу 2.....	58
РОЗДІЛ 3. ТЕСТУВАННЯ ТА НАЛАШТУВАННЯ РОЗРОБЛЕНОЇ СИСТЕМИ ЛОКАЛІЗАЦІЇ.....	59

3.1. Методика та критерії тестування системи локалізації.....	61
3.2. Аналіз результатів тестування та налаштування параметрів.....	63
3.3. Оцінка ефективності і точності роботи системи.....	65
3.4. Рекомендації для подальшого розвитку системи.....	68
Висновки до розділу 3.....	68
ВИСНОВКИ.....	69
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	21



ВСТУП

В сучасному світі питання забезпечення мобільності та комфортного життя для людей з обмеженими можливостями займає центральне місце в соціальній політиці багатьох країн. Війна, яка розпочалася в Україні в 2022 році, спричинила численні жертви та травми серед цивільного населення, призвівши до значного збільшення кількості осіб з інвалідністю. Військові дії, поранення, вибухи та руйнування інфраструктури створили нові виклики для держави, зокрема щодо адаптації середовища для людей, які втратили зір або зазнали серйозних пошкоджень зору. У цьому контексті розвиток інтелектуальних систем навігації та локалізації набуває критичної актуальності, адже допомагає забезпечити базову потребу цих осіб у безпечному та ефективному переміщенні в просторі.

Проблематика створення систем локалізації та орієнтації для людей з обмеженими можливостями активно досліджується науковцями та інженерами у всьому світі. Сучасні технології, включаючи акустичні системи, системи з комп'ютерним зором та пристрої зі зворотним зв'язком, такі як iBeacon, створюють широкі можливості для забезпечення точного позиціонування, що критично важливо для безпечної орієнтації в просторі. Однак в Україні ці технології ще недостатньо поширені та адаптовані до специфічних потреб людей, які постраждали внаслідок військових дій.

Актуальність розробки систем локалізації для осіб з обмеженим зором зросла внаслідок військових дій на території України, що привело до численних травм і втрат зору серед цивільного населення. Інноваційні навігаційні системи на основі технологій комп'ютерного зору, акустичних сигналів та маячків є важливим кроком до створення безпечного середовища для людей з порушеннями зору. Вони дозволяють уникнути небезпеки, полегшують пересування та підвищують рівень соціальної інтеграції таких людей. Отже, розробка і тестування подібних систем є не лише науково-технічною задачею,

але й соціально значущим проектом, спрямованим на адаптацію суспільства до потреб осіб з інвалідністю.

Об'єкт дослідження – сучасні технології локалізації та навігації для людей з обмеженими можливостями, зокрема тих, що втратили зір внаслідок війни.

Предмет дослідження – методи та засоби побудови інтелектуальних систем навігації з використанням технологій комп'ютерного зору, акустичних систем і тактильного зворотного зв'язку для забезпечення просторової орієнтації людей з обмеженим зором.

Мета дослідження полягає в розробці та тестуванні інтелектуальної системи навігації для людей з обмеженим зором, що враховує потреби та особливості користувачів, які втратили зір внаслідок військових дій.

Для досягнення поставленої мети визначено такі основні завдання:

1. Провести аналіз існуючих систем навігації для людей з обмеженим зором та виявити їх недоліки.
2. Визначити вимоги до архітектури системи навігації, що здатна забезпечувати точне позиціонування та безпеку пересування.
3. Розробити прототип інтелектуальної системи навігації з використанням iBeacon, тактильного та звукового зворотного зв'язку.
4. Провести тестування прототипу системи в умовах реальних просторових обмежень та зібрати зворотній зв'язок від користувачів.
5. Розробити рекомендації для подальшого вдосконалення системи на основі отриманих результатів тестування.

Для виконання завдань використовувалися такі методи: Теоретичний аналіз літературних джерел та існуючих рішень у галузі систем навігації для людей з обмеженим зором; Моделювання архітектури системи навігації та визначення ключових компонентів; Прототипування програмного забезпечення для обробки та передачі даних; Емпіричне тестування системи в різних умовах для оцінки її ефективності; метод анкетування та інтерв'ювання користувачів з

обмеженим зором для збору відгуків про зручність і безпечність роботи системи.

Наукова новизна роботи полягає у розробці інтегрованої системи локалізації, яка об'єднує в собі декілька технологій (комп'ютерний зір, iBeacon, тактильний і звуковий зворотний зв'язок), оптимізованої для людей, які втратили зір внаслідок травм під час військових дій. Дослідження включає розробку нових підходів до використання акустичних систем та тактильних сигналів для просторової орієнтації у реальних умовах, що підвищує точність навігації та безпеку користувачів.

Результати роботи можуть бути використані для розробки та впровадження систем навігації для людей з обмеженим зором у громадських місцях, зокрема в Україні, де збільшилася кількість людей з порушеннями зору через наслідки війни. Запропонована система також має потенціал для адаптації в інших країнах, які стикаються з проблемами інвалідності внаслідок бойових дій. Застосування цієї системи сприятиме підвищенню рівня соціальної інтеграції та автономності людей з обмеженими можливостями.

Дослідження складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел.

РОЗДІЛ 1

ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ СИСТЕМ ЛОКАЛІЗАЦІЇ ДЛЯ ЛЮДЕЙ З ОБМЕЖЕНИМ ЗОРОМ

1.1. Поняття та класифікація технологій локалізації

Людина, позбавлена здатності бачити, має повністю інший досвід орієнтації у просторі. Простір для неї складається з відчуттів, звуків і дотиків. Система локалізації перетворює цей хаотичний набір інформації на зрозумілу і безпечну карту руху. Вона не лише допомагає уникати перешкод, а й формує у користувача почуття свободи, незалежності. Технології локалізації для незрячих відкривають нові горизонти пересування, роблять звичайні маршрути зручними і зрозумілими [1].

Система локалізації — це комплекс засобів для точного визначення місцезнаходження. Така система може передавати людині інформацію про точку, де вона перебуває, про відстань до найближчих об'єктів чи місць, що потребують уникнення. Для осіб з порушеннями зору це питання комфорту і, водночас, безпеки. Навіть у густонаселеному місті або у внутрішньому просторі великого будинку такі системи дозволяють людині впевнено рухатися до мети [2].

Системи локалізації складаються з технічних компонентів, таких як приймачі, передавачі і джерела інформації (наприклад, GPS-супутники, Bluetooth-датчики). Усе це працює разом для досягнення єдиної мети — точного визначення положення в просторі. Принципи роботи локалізаційних систем базуються на здатності вимірювати час передачі сигналів, їхню силу та напрямок. Це дозволяє не просто повідомити про місцезнаходження, а зробити це з максимальною точністю [7].

Локалізація — не просто питання точності, а справжнє мистецтво зчитування і передачі сигналів з довкілля. Кожна технологія локалізації — від GPS до інфрачервоних сенсорів — пропонує свої унікальні способи визначення

місцезнаходження в просторі, адаптовані під різні ситуації, цілі та середовища. Кожна система діє за певними законами передачі і прийому сигналів, від швидкості поширення радіохвиль до інтенсивності звукових хвиль, які поєднуються для створення точної «карти» довколишнього простору [2].

GPS (Global Positioning System) функціонує завдяки мережі супутників, які знаходяться на орбіті Землі. Кожен супутник передає сигнал на пристрій, де він обробляється для визначення точного місцезнаходження. Час доставки сигналу від супутника до пристрою використовується для обчислення відстані до нього, і три чи більше супутників дозволяють «зачепитися» за потрібну локацію. GPS чудово підходить для відкритих просторів, де нічого не блокує сигнали, але стає менш ефективним у приміщеннях або у великих містах зі щільною забудовою. Для людей з вадами зору GPS надає критично важливу інформацію, оскільки визначає напрямок та відстань до місця призначення в реальному часі [7].

Wi-Fi має зовсім інший принцип. Він працює на базі точок доступу, що зазвичай розташовані у приміщеннях, де супутникові сигнали погано проходять. Wi-Fi-локалізація використовує рівень потужності сигналу, виміряний на приймачі, для обчислення приблизної відстані до роутера. Поєднання кількох таких вимірювань з різних точок доступу дозволяє досягти значно більш точного визначення локації, особливо у великих приміщеннях, де GPS неефективний. Для людини з обмеженим зором Wi-Fi-локалізація — це можливість пересуватися великим будинком, орієнтуючись по місцезнаходженню точок доступу [3].

Bluetooth розгортає на короткі відстані систему маячків (наприклад, iBeacon), які забезпечують дуже високу точність позиціонування у приміщеннях. Маячки працюють на основі радіосигналів, що передаються на приймач (смартфон або спеціальний навігаційний пристрій), який визначає місцезнаходження на основі сили сигналу або часу його доставки. Bluetooth-локалізація є надійним рішенням для складних інтер'єрів, де потрібна висока точність, особливо в музеях, торгових центрах або аеропортах. Незрячі люди

отримують чіткі напрямки і дистанції, а інтеграція з мобільними додатками дозволяє підтримувати двосторонню комунікацію для навігації [5].

Ультразвукові технології використовують звукові хвилі високої частоти, що розповсюджуються в повітрі й відбиваються від об'єктів. Приймач фіксує відбитий сигнал, а за часом його повернення обчислює відстань до об'єкта. Ультразвукова локалізація використовується для створення мікрокарт простору у реальному часі, що надзвичайно зручно у випадках, коли людина з порушеннями зору повинна уникати об'єктів і перешкод на шляху. Технологія дозволяє людині отримати «картину» оточення на основі звуків, що відбиваються [2].

Інфрачервоні технології ґрунтуються на передачі світлових хвиль, невидимих людському оку, які розповсюджуються на короткі відстані. Цей підхід часто використовується в приміщеннях, де потрібно виявляти невеликі зміни в оточенні або переміщення між кімнатами. Інфрачервоний передавач відправляє сигнал, який приймач фіксує, створюючи мапу розташування об'єктів довкола. Незрячим інфрачервона система допомагає зрозуміти розташування близьких об'єктів, наприклад меблів, і уникати зіткнень [6].

Локалізаційні системи можна розділити на кілька категорій, кожна з яких має унікальні властивості і підходить для конкретних умов і завдань. Ці системи забезпечують точне або відносне позиціонування залежно від потреб користувача та навколишнього середовища.

Активні системи включають всі типи технологій, які передбачають передачу сигналів для визначення положення. У таких системах мобільний пристрій або маяк постійно посилає сигнали до приймачів. GPS — типовий приклад активної системи, оскільки супутники безперервно надсилають сигнали, а приймачі на землі використовують їх для обчислення місця знаходження. Bluetooth-маячки (наприклад, iBeacon) також є прикладом активних систем, оскільки вони регулярно випромінюють сигнали, які дозволяють приймачам розраховувати відстань на основі сили сигналу. Активні системи забезпечують високу точність і працюють у режимі реального часу,

проте вимагають постійного джерела живлення, що може стати проблемою для тривалого використання в умовах без підзарядки [1].

Пасивні системи базуються на сприйнятті відбитих сигналів або природних джерел радіації. У пасивних системах приймачі фіксують присутність або відбиття сигналів, що надходять від об'єктів у навколишньому середовищі, без необхідності постійного передавання. Наприклад, радіочастотна ідентифікація (RFID) є пасивною технологією, що використовує мітки, які відповідають тільки тоді, коли їх активують спеціальні сканери. Також до пасивних належать інфрачервоні датчики, які відображають об'єкти на основі теплових або світлових хвиль. Пасивні системи, хоча й економніші з точки зору енергоспоживання, зазвичай поступаються в точності активним рішенням і мають обмежену зону дії [7].

Зовнішні (outdoor) системи здебільшого базуються на технологіях GPS, GNSS (глобальні навігаційні супутникові системи) і підтримують високий рівень точності для відкритих просторів. GPS-системи, наприклад, ефективні на відкритій місцевості і забезпечують точне позиціонування. Outdoor-системи застосовують для навігації автомобілів, пішоходів, а також для відстеження вантажів у логістиці. Однак їхня робота суттєво обмежена у внутрішніх просторах або в умовах густої забудови, де сигнал слабшає через перешкоди (стіни, будівлі). Зовнішні системи здатні забезпечувати покриття на великих відстанях, проте потребують безперервного сигналу від супутників, що ускладнює їх використання у приміщеннях [5].

Внутрішні (indoor) системи створені для роботи в закритих приміщеннях, де супутниковий сигнал блокується або спотворюється. Ці системи зазвичай використовують Wi-Fi, Bluetooth-маячки, ультразвукові та інфрачервоні датчики. Indoor-локалізація дозволяє точно визначати положення у великих будівлях (торгових центрах, музеях, офісних приміщеннях), надаючи можливість навігації на основі внутрішніх точок доступу. Висока точність досягається завдяки щільному розташуванню маячків, які працюють на відносно малих відстанях, дозволяючи користувачам швидко орієнтуватися.

Внутрішні системи мають свої особливості: вони забезпечують високу точність, але потребують значних витрат на встановлення обладнання [11].

Системи точного позиціонування орієнтовані на максимальну точність у визначенні координат. Такі системи широко застосовуються у військових і спеціалізованих сферах, де необхідна висока точність позиціонування до сантиметрів. Прикладом є GPS, оснащений додатковими корекційними системами (DGPS), що підвищують точність для потреб авіації, картографії, агротехнічних процесів. Bluetooth-маячки також дозволяють отримати дуже точні координати всередині приміщень, що важливо для навігації людей з обмеженими можливостями зору у складних будівлях. Для цього маячки розташовують у стратегічних точках, забезпечуючи точне керування маршрутом [33].

Системи відносного позиціонування визначають місцезнаходження щодо інших об'єктів або за допомогою відстаней між точками. Ці системи менш точні, але простіші у реалізації та зручні для відстеження руху на великих площах. Відносне позиціонування використовується для виявлення об'єктів у приміщеннях на основі радіочастотних технологій, наприклад, RFID. Ультразвукові та інфрачервоні датчики також можуть працювати у відносних системах, коли важливо лише знати відстань до перешкод, не зосереджуючись на абсолютних координатах. Цей підхід менш точний, але енергоефективний і забезпечує швидке реагування [6].

Підходи до локалізації можна оцінити за низкою параметрів, таких як точність, надійність, енергоефективність і вартість, що визначають їхню доцільність для різних потреб.

1. Точність. Системи, орієнтовані на абсолютне позиціонування (GPS, Bluetooth-маячки), надають високу точність і здатні забезпечувати користувачів інформацією про точне місце розташування з мінімальною похибкою. GPS здатен визначати місцезнаходження в межах кількох метрів, але у приміщеннях точність значно знижується. Bluetooth-маячки є більш точними у приміщеннях, забезпечуючи локалізацію з точністю до декількох десятків сантиметрів.

Ультразвукові та інфрачервоні системи поступаються GPS і Bluetooth за точністю, але залишаються достатніми для відносної навігації у вузьких просторах [17].

2. Надійність. Надійність системи локалізації залежить від здатності працювати у різних умовах і стабільно забезпечувати користувача необхідною інформацією. GPS є найнадійнішим рішенням для відкритих просторів, проте в закритих приміщеннях втрачає стабільність через блокування сигналу. Wi-Fi і Bluetooth надають високий рівень надійності у приміщеннях, однак потребують великої кількості точок доступу для збереження стабільності сигналу. Ультразвукові та інфрачервоні системи забезпечують належну надійність лише у стабільних середовищах, таких як офіси чи склади, де немає раптових змін у розташуванні предметів [3].

3. Енергоефективність. Збереження енергії є важливим аспектом, особливо для мобільних пристроїв, що мають обмежений ресурс батареї. GPS системи споживають багато енергії через необхідність безперервного зв'язку з супутниками. Bluetooth-маячки та RFID навпаки, є дуже енергоефективними, адже для передачі сигналів використовують низьку потужність. Ультразвукові та інфрачервоні системи теж енергоефективні, оскільки активуються лише тоді, коли потрібно виявити об'єкт або перешкоду. Вибір енергоефективної технології важливий для локалізації у приміщеннях, де потрібна автономність на довготривалий період [28].

4. Вартість. Вартість реалізації локалізаційної системи залежить від обладнання і складності налаштувань. GPS є відносно доступним, оскільки не вимагає додаткових установок — достатньо лише приймача, тоді як Wi-Fi та Bluetooth-маячки потребують розгортання інфраструктури, що збільшує початкові витрати. Ультразвукові та інфрачервоні датчики зазвичай використовуються у вузькоспеціалізованих сферах через високу вартість налаштування і обслуговування. RFID, хоча й недорога, вимагає відповідних сканерів для кожного приміщення. Користувачі обирають системи відповідно

до наявного бюджету і довготривалих цілей, зважаючи на можливість подальшого оновлення або доповнення [9].

1.2. Аналіз сучасних систем навігації та орієнтації для людей з вадами зору

Людина з порушенням зору живе у просторі звуків, дотиків і запахів. Кожен крок — це рішення, кожен поворот — виклик. Сучасні системи навігації перетворюють пересування для таких людей на процес із мінімальними ризиками, створюючи зручні маршрути, вказуючи перешкоди та дозволяючи зосередитися на цілі, а не на перешкодах. Різноманітні додатки, спеціалізовані пристрої та хмарні сервіси виступають помічниками, які орієнтують у міському хаосі, навіть за відсутності візуального орієнтира.

Aira — додаток, що перетворює смартфон на зручний інструмент навігації. Людина з вадами зору підключається до живого агента, який через камеру телефону стає «очима» користувача, описуючи оточення і надаючи вказівки. Чи то знайти вихід у переповненому супермаркеті, чи перетнути жваву вулицю — агент в режимі реального часу допомагає рухатися без страху. Віртуальний супровід дозволяє людям відчувати себе впевнено там, де раніше вони потребували сторонньої допомоги [17].

Be My Eyes працює за схожим принципом, але використовує волонтерів для орієнтації в просторі. Людина, яка потребує допомоги, підключається до волонтера, який за допомогою відеозв'язку допомагає розпізнати об'єкти або прочитати текст. Це знижує рівень тривожності, надає відчуття підтримки і дозволяє виконувати навіть складні завдання в місцях, де відсутні навігаційні знаки для незрячих. Завдяки Be My Eyes користувач може без сторонньої фізичної присутності розуміти, що відбувається довкола [2].

Orcam — носимий пристрій, який встановлюється на окуляри та використовує камеру й комп'ютерне зір для розпізнавання тексту, облич та об'єктів. Пристрій перетворює візуальні сигнали на голосові повідомлення, що

дозволяє користувачеві ідентифікувати об'єкти довкола і відчувати себе частиною простору. Вказівка про те, що перед вами двері, тротуар або перехід через дорогу, перетворює прогулянку з незнайомим оточенням на чітку карту руху. Ocam підходить для внутрішніх і зовнішніх просторів, допомагаючи орієнтуватися не лише в людних місцях, а й у домашньому середовищі [12].

Sunu Band — інтелектуальний браслет, що працює за допомогою ультразвукових сенсорів, допомагає визначати перешкоди на шляху та повідомляє про них через вібрацію. Чим ближче об'єкт, тим сильніша вібрація — проста, але ефективна схема, що дозволяє зрозуміти, куди і як рухатися. Браслет підходить для щоденного користування в місті, адже враховує зміну середовища в режимі реального часу, перетворюючи дорогу до дому або до магазину на простий і безпечний маршрут [25].

Інтерактивні карти й сервіси на основі хмарних технологій дозволяють віртуально зануритися в простір, ознайомитися з маршрутом заздалегідь і підготуватися до перешкод. Дані постійно оновлюються, що створює ефект «живої» карти, яка враховує зміни в оточенні. Деякі платформи дозволяють завантажувати інформацію про маршрути, включаючи перешкоди, які можна уникнути. Використання хмарних технологій робить такі карти доступними для кожного, у будь-який момент. Навіть без смартфона користувач може синхронізувати свій пристрій із хмарною базою і отримати маршрути, оптимізовані для умов його місця перебування [38].

Переваги таких систем очевидні. Мобільні додатки та пристрої надають можливість самостійного пересування, незалежності і контролю. Людина з вадами зору може пересуватися містом, залицятись до інтерактивних маршрутів, які допомагають уникати перешкод, і вчасно отримувати повідомлення про зміну оточення. Простота і доступність цих систем дозволяють користуватися ними щодня, підвищуючи рівень автономності, надаючи впевненості в кожному кроці [6].

Додатки, як-от Aira і Be My Eyes, відкривають доступ до віртуального супроводу, який адаптується до потреб і рівня орієнтації користувача, а

спеціалізовані пристрої, такі як Orcam і Sunu Band, надають можливість обирати індивідуальні налаштування, враховуючи унікальні потреби. Завдяки цим технологіям користувачі більше не обмежені лише відомими маршрутами — вони можуть досліджувати нові простори та насолоджуватися незалежністю [14].

Однак існують і певні обмеження. Технології залежні від якості зв'язку, рівня заряду батареї та стабільності роботи пристроїв. У деяких випадках точність залишає бажати кращого — наприклад, GPS може збиватися у густозабудованих районах або підземних переходах, а Bluetooth-маячки втрачають сигнал у приміщеннях із численними металевими конструкціями. Це може призводити до незначних похибок, що, проте, створюють певні труднощі. Крім того, системи часто орієнтовані на певний вид середовища — або зовнішнє, або внутрішнє, що обмежує універсальність використання [3].

Вартість таких технологій також може бути високою, що робить їх недоступними для широких верств населення. Навіть найпростіші пристрої з функцією навігації потребують інвестицій, а мобільні додатки часто мають платні підписки, що теж стає бар'єром для частини користувачів. Проблемою залишається і сумісність пристроїв із різними моделями смартфонів і операційними системами, що обмежує можливості деяких користувачів [33].

Точність позиціонування є постійним викликом для користувачів таких систем. У відкритих просторах GPS демонструє високу точність, проте у приміщеннях або багатоповерхових будівлях його сигнал слабшає, що знижує надійність маршруту. Wi-Fi і Bluetooth-маячки хоч і покращують локалізацію всередині приміщень, однак потребують великої кількості точок доступу та маячків, що не завжди можливо. Крім того, на точність можуть впливати матеріали, з яких зроблені стіни та предмети, що може створити ситуації, коли користувач не отримує необхідної інформації вчасно [29].

Сумісність із мобільними пристроями також залишається складним завданням. Деякі додатки не підтримуються на застарілих моделях смартфонів, а сучасні пристрої не завжди сумісні з навігаційними програмами. Відсутність

єдиних стандартів для налаштування навігаційних пристроїв призводить до того, що користувачі витрачають час на пошук сумісних рішень. Це може стати серйозною перепорою для осіб, які хочуть швидко отримувати доступ до навігаційної допомоги [22].

Адаптація до різних умов середовища є ще одним викликом. Зміна оточення, наприклад, перебудова міського простору або зміна обстановки у великих приміщеннях, вимагає постійного оновлення даних у системах. Користувачі стикаються з тим, що на звичних маршрутах з'являються нові перешкоди, які можуть бути не відображені у додатках. Система має бути здатна адаптуватися до змін, інакше її ефективність знижується. Це потребує високої швидкості оновлень даних та доступу до широкої бази інформації про просторові об'єкти [5].

Навігаційні системи для людей з вадами зору продовжують розвиватися, охоплюючи нові технології і методи. Інтеграція мобільних додатків із штучним інтелектом, удосконалення систем розпізнавання об'єктів, підвищення точності позиціонування — усе це лише початок. Головне завдання полягає у створенні системи, яка працює в умовах будь-якого середовища, незалежно від особливостей простору чи перешкод. Використання нових підходів до інтерактивної навігації, зокрема на основі доповненої реальності та вдосконалених датчиків, відкриває широкі можливості для людей з обмеженими можливостями. Удосконалені технології дадуть змогу користувачам орієнтуватися у просторі впевнено, без зайвих витрат і обмежень.

1.3. Особливості комп'ютерного зору та акустичних технологій у системах локалізації

Комп'ютерний зір і акустичні технології перетворюють хаотичний потік інформації в організовану систему навігації. Замість абстрактних інструкцій користувач отримує зрозумілу, чітку картину простору. Ці технології виступають сенсами для людей із порушенням зору, забезпечуючи розуміння

навколишнього середовища з високою деталізацією і точністю. Їх використання робить будь-який простір доступним, мінімізуючи ризик зустрічі з перешкодами і відкриваючи шлях для безпечного руху.

Комп'ютерний зір не просто розпізнає об'єкти. Він створює повноцінну карту середовища, інтегруючи візуальні дані для розуміння відстаней, розмірів і розташування предметів. Камера вловлює зображення, а алгоритми обробляють ці дані, трансформуючи їх у вказівки щодо подальших дій. Це допомагає людині розрізняти дорогу від тротуару, стіну від дверей, тобто формувати точне уявлення про шлях, навіть без фізичного контакту з об'єктами. У комп'ютерному зорі кожен піксель — це потенційна деталь, що робить навігацію такою ж простою, як і для зрячої людини [23].

Сучасні системи навігації використовують кілька інструментів комп'ютерного зору, кожен з яких виконує свою унікальну функцію для побудови карти простору і забезпечення безпеки.

Виявлення та розпізнавання об'єктів. Пристрій «бачить» простір перед собою, розрізняючи різні об'єкти. Меблі, машини, пішоходи, дерева — кожен із цих об'єктів отримує свій цифровий маркер, що вказує на потенційну небезпеку або безпечну зону. Це дає змогу не просто уникати зіткнень, а й визначати конкретні об'єкти, з якими людина може контактувати, ідентифікуючи простір довкола.

Розпізнавання облич і тексту. Розпізнавання облич важливе в громадських місцях, де людина може взаємодіяти з іншими, а текст — це маркер на шляху, що допомагає орієнтуватися, читаючи знаки, вказівки чи інші написані повідомлення. Наприклад, за допомогою комп'ютерного зору людина може «побачити» табличку на автобусній зупинці або читати інформацію про найближчу станцію [15].

Оцінка глибини та відстані до об'єктів для побудови карти середовища. Для руху у просторі важливо не тільки знати, де знаходяться об'єкти, а й оцінити їхню відстань. Система комп'ютерного зору розраховує дистанцію до кожного об'єкта, формуючи карту простору. Людина з вадами зору може

орієнтуватися на вказівки про відстань до найближчої перешкоди чи повороту, що дозволяє рухатися безпечніше і впевненіше. Алгоритми аналізу глибини створюють майже тривимірну картину простору, де кожен об'єкт має своє місце і значення [31].

Акустичні технології використовують звук, щоб повідомляти про перешкоди, напрямки і відстані. Це свого роду «друга пара очей», яка оберігає від зіткнень і дає змогу краще зрозуміти, як рухатися в просторі. Звук може надавати чітку інформацію про відстань до об'єкта, його розмір і характер. Акустичні сигнали забезпечують безперервний зворотний зв'язок, інформуючи про найменші зміни на шляху.

Ультразвукові датчики для визначення перешкод. Ультразвукові сенсори випускають звукові хвилі високої частоти, які відбиваються від об'єктів і повертаються до датчика. Пристрій обчислює час, за який сигнал повернувся, і на цій основі визначає відстань до перешкоди. Це схоже на «ехолокацію», що використовують деякі тварини для орієнтації в темряві. Завдяки ультразвуковим датчикам, людина з порушенням зору отримує своєрідну «карту» найближчих об'єктів, що допомагає рухатися без страху наштовхнутися на них [8].

Системи, що використовують просторові звукові сигнали для інформування про напрямки та відстані. Стереозвукові системи передають звукові сигнали з різних боків, що створює відчуття напрямку. Чим ближче об'єкт — тим гучніший сигнал, і навпаки. Це дає можливість відчувати оточення не лише в просторі, а й у глибину. Просторові звукові сигнали — це надійний метод для орієнтації, який дозволяє сприймати навколишнє середовище без зорових орієнтирів [34].

Комп'ютерний зір та акустичні технології дозволяють людям з обмеженим зором мати доступ до повної інформації про простір, що мінімізує їхню залежність від сторонньої допомоги. За допомогою комп'ютерного зору користувач може чітко ідентифікувати об'єкти, розуміти, що знаходиться поруч і на якій відстані. Ультразвукові сенсори і стереозвукові сигнали додають

тактильні вказівки, роблячи навігацію ще більш зручною. Ця інтеграція звукових і візуальних елементів дозволяє створювати середовище, яке «розмовляє» з користувачем і допомагає їм у кожному кроці [18].

Однак обмеження також присутні. Комп'ютерний зір залежить від якості камери і освітлення, а акустичні системи можуть не працювати належно у шумних умовах. Крім того, високотехнологічне обладнання часто є дорогим, що знижує його доступність для широких верств населення. Окремі системи потребують стабільного зв'язку, енергії і регулярного оновлення даних, що не завжди можливо. Враховуючи ці виклики, розробка універсальних рішень, які були б економічно доступними і незалежними від умов середовища, залишається на етапі становлення [39].

Комп'ютерний зір і акустичні технології формують основу для безпечної, автономної навігації людей з обмеженим зором. Вони забезпечують максимальний комфорт і незалежність, створюючи новий спосіб взаємодії з простором. Розвиток і вдосконалення цих технологій відкриває нові можливості для інклюзивного суспільства, де кожна людина зможе орієнтуватися в просторі на рівних правах з іншими [1].

1.4. Використання тактильного та звукового зворотного зв'язку для забезпечення просторової орієнтації

Тактильний і звуковий зворотний зв'язок змінюють досвід орієнтації в просторі. Ці технології роблять можливим те, що раніше було важкодоступним: надати людині відчуття простору, не задіюючи зір. Увесь простір стає тактильним і звучним, наче розмовляє з користувачем. Кожна вібрація і звуковий сигнал — це новий спосіб почути чи відчутти дорогу, уникнути перешкоди, зрозуміти, де потрібно зупинитися і куди повертати.

Тактильний зворотний зв'язок — справжній дар для орієнтації людей з порушенням зору. Вібрації, наприклад, на зап'ясті чи у кишені, попереджають про перешкоди або напрямок руху. Прості сигнали змінної сили та частоти

дають зрозуміти, наскільки близько об'єкт. Чим сильніше вібрація, тим ближча перешкода. Це не просто відчуття — це навігація в режимі реального часу, без постійного контролю. Завдяки тактильному зворотному зв'язку орієнтація у просторі стає інтуїтивною, майже автоматичною [16].

Рельєфні карти — це ще один аспект тактильного зворотного зв'язку. Вони створюють образи на дотик, що дозволяє відчутти навколишній простір перед собою. Користувач проводить рукою по рельєфу, отримуючи чітку «картину» шляху, майже як читаючи карту з рельєфними точками, де кожна лінія, вигин і деталь — це відображення реального простору. Така карта стає «осязною» частиною простору, яку можна «бачити» пальцями, перетворюючи відчуття дотику на орієнтир [21].

Звуковий зворотний зв'язок додає просторовій орієнтації особливого виміру. Стереозвукові сигнали діють як компас: коли звук йде зліва, зрозуміло, що треба йти вліво, а якщо сигнал звучить спереду — рух вперед. Таке використання стерео звуків дозволяє точно визначати напрямок, навіть якщо шлях не знайомий. Людина просто прислухається до напрямку звуку, що створює просту і зрозумілу навігацію. Стереозвук змушує середовище «звучати» саме з того боку, куди потрібно йти. Це створює глибину звукової картини, дозволяючи відчутти простір без зорового сприйняття [5].

Звукові повідомлення додають орієнтації конкретики. Коли голос повідомляє: «Перешкода на відстані трьох метрів», або «Поверніть направо через два кроки», — людина розуміє, що її чекає на шляху. Це більше, ніж орієнтація: звукові повідомлення забезпечують постійний супровід, надаючи точну інформацію про відстані, повороти та об'єкти, що наближаються. Людина сприймає звукові підказки як невидимий навігатор, який «говорить» мовою простору, забезпечуючи комфорт і безпеку [32].

Поєднання тактильного і звукового зворотного зв'язку створює потужну систему, що використовує обидва сенси одночасно. Користувач може відчутти вібрацію і почути звук, які підкріплюють один одного і створюють повноцінну картину навігації. Наприклад, вібрація сигналізує про зміну напрямку, а

звуковий сигнал підтверджує це, додаючи впевненості, що рух відбувається в правильному напрямку. Таке підкріплення дозволяє людині сприймати інформацію через кілька каналів одночасно, роблячи систему ще більш надійною [40].

Використання обох видів зворотного зв'язку розширює можливості навігації у складних умовах. Якщо звук заглушується шумом, тактильні сигнали продовжують вказувати на маршрут, і навпаки: у разі втрати відчуттів від вібрації звуковий супровід надає потрібні орієнтири. Це дозволяє підтримувати безпеку і комфорт у будь-якому середовищі, незалежно від рівня освітлення, шуму чи умов погоди [7].

Інноваційні розробки об'єднують тактильний і звуковий зворотний зв'язок у нових пристроях, які повністю адаптовані для людей з вадами зору. Наприклад, браслет Sunu Band використовує ультразвуковий датчик для виявлення перешкод і надає зворотний зв'язок у формі вібрацій, а звукові підказки доповнюють відчуття на дотик. Таке поєднання робить рух у просторі чітким, структурованим і передбачуваним. Людина отримує відразу дві підказки, що знижує ризик помилок і підвищує рівень впевненості в русі [14].

Додаток Aira використовує зворотний зв'язок через мобільний телефон, де агент надає інструкції голосом, а спеціальний додаток може синхронізуватися з тактильними пристроями для створення додаткового зворотного зв'язку. Користувач отримує голосові підказки та вібраційні сигнали одночасно, що дозволяє отримати максимально детальну інформацію про маршрут. Така комбінована система полегшує пересування як у приміщеннях, так і на відкритих майданчиках [3].

У розробці нових технологій враховують можливість застосування штучного інтелекту для аналізу простору, в якому перебуває користувач. Це дозволяє автоматично налаштовувати параметри вібрацій і звукових сигналів залежно від середовища. Наприклад, в шумному місті звукові сигнали посилюються, а в тихому приміщенні вони автоматично знижуються. Цей

підхід робить систему максимально адаптивною і зручною, дозволяючи використовувати її в різних ситуаціях [27].

Тактильний і звуковий зворотний зв'язок створюють надійний інструмент для навігації в будь-якому середовищі. Комбіновані технології дозволяють передавати інформацію через кілька каналів, роблячи орієнтацію більш точною, комфортною і незалежною. Розробка нових пристроїв і інтеграція штучного інтелекту в тактильний і звуковий зворотний зв'язок сприяють підвищенню рівня доступності для людей з вадами зору, відкриваючи їм нові горизонти і роблячи пересування простим, навіть у найскладніших умовах.

Висновки до розділу 1

Аналіз теоретичних аспектів систем локалізації для людей з обмеженим зором показав, що сучасні технології орієнтації охоплюють різні підходи та засоби, кожен з яких сприяє підвищенню автономності та безпеки користувачів у просторі.

По-перше, було визначено поняття та класифікацію технологій локалізації, які включають активні та пасивні системи, внутрішні та зовнішні методи позиціонування, а також точне і відносне визначення положення. Це допомагає краще розуміти, як різні системи застосовуються для створення безпечного та зручного середовища для орієнтації людей з порушенням зору.

По-друге, огляд сучасних систем навігації, зокрема мобільних додатків (Aira, Be My Eyes), спеціалізованих пристроїв (Orcam, Sunu Band), а також веб-технологій та хмарних сервісів, продемонстрував, що кожна з них має свої переваги й обмеження. Це показує важливість поєднання різних технологій для створення повноцінних і гнучких рішень, які враховують специфіку потреб користувачів.

По-третє, розгляд ролі комп'ютерного зору та акустичних технологій у системах локалізації підтвердив, що ці засоби дозволяють глибше інтегрувати навігацію з оточенням. Комп'ютерний зір забезпечує розпізнавання об'єктів і облич, визначення відстаней і побудову карти середовища, тоді як акустичні технології, зокрема ультразвукові датчики та просторові звукові сигнали, допомагають уникати перешкод і знаходити правильний напрямок.

Нарешті, аналіз використання тактильного та звукового зворотного зв'язку для забезпечення орієнтації довів, що їх поєднання створює найбільш ефективну систему підтримки. Тактильні сигнали та стереозвукові інструкції дозволяють досягти високої точності і мінімізувати помилки, особливо у складних умовах. Інноваційні розробки, що інтегрують обидва типи зворотного зв'язку, значно полегшують навігацію, створюючи для користувача інтуїтивно зрозумілу та адаптивну систему.

РОЗДІЛ 2

ПРОЄКТУВАННЯ АРХІТЕКТУРИ СИСТЕМИ НАВІГАЦІЇ ТА ПРОСТОРОВОЇ ОРІЄНТАЦІЇ

2.1. Вимоги до архітектури системи навігації для осіб з обмеженим зором

Створення системи навігації для людей з обмеженим зором — не просто проєкт, а новий підхід до безпечного пересування. Тут кожен пристрій стає частиною навігаційної системи, кожна технологія відкриває можливості бачити простір іншим способом. Вибір обладнання для домашньої реалізації повинен бути практичним, функціональним та зручним у використанні.

Маячки iBeacon від Apple — компактні пристрої з малопотужним Bluetooth, які безперервно передають сигнал на смартфон чи інший пристрій. Коли людина з вадами зору наближається до маячка, її смартфон зчитує унікальний сигнал, інтерпретує його та надає вказівки. iBeacon можна порівняти з «віртуальним розумним маяком», який не потребує прямого контакту, щоб спрямувати людину на правильний шлях. Навіть у великому приміщенні маячки iBeacon формують точну карту маршруту [19].

Варіанти вибору включають продукти від Estimote, Kontakt.io, BlueCats. Моделі відрізняються дальністю дії, розмірами і тривалістю роботи батареї. Деякі маячки здатні працювати без заміни батареї до двох років, що позбавляє від необхідності постійного обслуговування. Дальність дії, як правило, досягає 70 метрів, хоча в приміщеннях вона може знижуватися через стіни та меблі. Завдяки таким параметрам маячки легко охоплюють навіть великі житлові зони [14].

iBeacon не єдина альтернатива. Google створив Eddystone, що надає більше гнучкості для розробників і підходить для будь-якої платформи. Також доступні стандартні Bluetooth-датчики, які можна інтегрувати з платформами Arduino чи Raspberry Pi, налаштувавши їх для домашніх умов. Такі датчики не

прив'язані до конкретного бренду чи екосистеми, що надає більше можливостей для кастомізації [3].

Точне розташування маячків — перший крок до створення навігаційної системи. Їх слід встановлювати в коридорах, на входах у кімнати, біля меблів та побутових приладів, на висоті приблизно 1,5 метра від підлоги. Це дозволяє сигналу поширюватися рівномірно і уникати блокування від меблів. Наприклад, маячок біля дверей подасть сигнал про вихід, а пристрій у кухні дасть можливість зорієнтуватися біля шаф та полиць. Для середнього будинку або квартири на 3-4 кімнати оптимальна кількість маячків становить 6-10 штук, залежно від особливостей планування [25].

Смартфон стає «мозком» системи, обробляючи сигнали від маячків iBeacon та інших Bluetooth-датчиків і надаючи голосові підказки. Щоб система працювала бездоганно, смартфон повинен мати Bluetooth 4.0 або новіший стандарт. Саме він забезпечує стабільне з'єднання з маячками та швидку обробку сигналів. Для навігації на відкритих просторах потрібен GPS-модуль, який забезпечить точність позиціонування навіть у парках чи на вулицях.

Операційна система Android або iOS дозволяє використовувати додатки для навігації та синхронізації з голосовими помічниками, такими як Siri або Google Assistant. Смартфон стає інструментом, який не лише інформує про розташування, а й допомагає визначати подальший напрямок руху. Голосові команди дозволяють людині з вадами зору орієнтуватися у просторі та реагувати на інструкції у реальному часі [12].

Смарт-годинники та браслети додають новий рівень комфорту, забезпечуючи тактильний зворотний зв'язок. Наприклад, Apple Watch і Samsung Galaxy Watch вібрують, коли користувач наближається до об'єкта або до кінця маршруту. Така інтеграція вібраційних сигналів допомагає у ситуаціях, коли навушники не можуть бути використані. Смарт-браслет Sunu Band також надає зворотний зв'язок на основі ультразвукових датчиків і може працювати як автономний навігатор.

Для тих, хто шукає DIY-рішення, Arduino в поєднанні з Bluetooth-модулем дозволяє створити власний вібраційний браслет. Залежно від сили сигналу від маячків, браслет може підсилювати або зменшувати інтенсивність вібрації, надаючи простий і ефективний спосіб орієнтації [7].

Камери додають функціональність розпізнавання об'єктів. Розумна камера не просто фіксує зображення, а й аналізує простір, визначає відстані до об'єктів, розпізнає текст та обличчя. Смартфони з якісними камерами, такі як iPhone або Samsung, працюють як повноцінні засоби навігації. Висока роздільна здатність та спеціалізоване програмне забезпечення, наприклад OpenCV, дозволяють камері бачити перешкоди і об'єкти та повідомляти про них користувачеві.

Для DIY-рішень камера Raspberry Pi забезпечує необхідну роздільну здатність і дозволяє зчитувати інформацію про об'єкти за допомогою комп'ютерного зору. Це відкриває нові можливості для взаємодії з простором, перетворюючи візуальну інформацію на звукові чи тактильні підказки. Камера стає «очима», які розпізнають середовище і попереджають про перешкоди [22].

Голосові інструкції створюють основу для розуміння простору. Bluetooth-навушники, наприклад AirPods, забезпечують чіткий і чистий звук, дозволяючи користувачеві чітко чути інструкції навіть у галасливих місцях. Якісний звук важливий для точного розуміння інструкцій та швидкої реакції на них. Для тих, хто не користується навушниками, достатньо вбудованих динаміків смартфона, хоча в гучних місцях Bluetooth-навушники зменшують відволікаючі фактори [18].

Система звукових підказок включає інструкції про напрямки, відстані та об'єкти на шляху. Голосові інструкції дозволяють залишатися «на зв'язку» з маршрутом, отримуючи підказки та інформацію про кожен поворот і можливу перешкоду. У поєднанні з Bluetooth-маячками, які точно визначають розташування користувача, звукові системи надають інструкції у відповідному місці й моменті [29].

Для створення системи навігації для людей з обмеженим зором потрібні маячки iBeacon, що передають сигнали у просторі. Смартфон або планшет обробляє ці сигнали, визначаючи точне розташування користувача та надаючи голосові підказки. Носимі пристрої додають тактильний зворотний зв'язок, а камера розпізнає об'єкти на шляху. Bluetooth-навушники чи динаміки забезпечують голосові інструкції, з якими людина може орієнтуватися навіть у нових або складних просторах.

Комбінування цих пристроїв створює систему, яка адаптується до умов будь-якого середовища, надаючи зручні підказки і дозволяючи людині пересуватися безпечно та комфортно. Кожен компонент системи працює разом, формуючи чітку навігаційну картину, яка дозволяє людині з обмеженим зором відчувати простір, залишаючись незалежною від сторонньої допомоги [33].

2.2. Вибір компонентів та обладнання для побудови системи навігації

Кожна система навігації для людей з порушенням зору – це набір технологій, об'єднаних для однієї мети: зробити простір доступним. Компоненти повинні бути простими в експлуатації, але достатньо ефективними, щоб надавати точні дані про оточення в режимі реального часу. Кожен компонент несе свою відповідальність: від сигналу, що позначає точку у просторі, до пристрою, який трансформує цей сигнал у зрозумілі вказівки [11].

Маячки iBeacon перетворюють простір на систему орієнтирів, де кожен «маяк» стає знаком на шляху. Вони працюють на основі Bluetooth, постійно передаючи сигнал на приймачі. Девайси зчитують цей сигнал і розпізнають своє місцезнаходження у просторі. iBeacon розроблені так, щоб бути доступними та ефективними. Невеликі за розміром, вони легко кріпляться в будь-якому приміщенні, а мінімальне споживання енергії дозволяє їм працювати без заміни батареї до двох років. Це справжні маленькі «маяки» у безмежному просторі дому чи офісу [4].

Коли вибираємо iBeacon, важливо розуміти параметри, які впливають на якість роботи системи. Дальність сигналу має відповідати розмірам приміщення: для великих кімнат та просторих зон потрібен iBeacon із дальністю до 70 метрів. Крім того, варто звернути увагу на стійкість до зовнішніх впливів, якщо маяк буде встановлено у вологих приміщеннях чи просто не в ідеальних умовах. Обирати маячки варто серед перевірених брендів, таких як Estimote, Kontakt.io чи BlueCats. Вони створюють надійні моделі, які швидко синхронізуються з будь-якими пристроями і не втрачають сигналу, навіть якщо в приміщенні є перешкоди [29].

Смартфон або планшет перетворює маячки iBeacon на навігаційні вказівки. Bluetooth-сигнал, отриманий від маячка, обробляється додатком, який надає голосові підказки про місцезнаходження або відстань до об'єктів. Смартфон «розмовляє» з користувачем мовою голосових повідомлень. Залежно від розташування маячка, людина чує команду повороту, інформацію про перешкоди або відстань до пункту призначення. Чіткі підказки перетворюють абстрактний сигнал у зрозумілу мову навігації [15].

При виборі смартфона важливо переконатися, що пристрій підтримує Bluetooth 4.0 і новіші стандарти, адже вони забезпечують стабільний прийом сигналу та економне споживання батареї. Для навігації на відкритих просторах знадобиться GPS, що визначить розташування на місцевості. Щоб підтримувати стабільну роботу навігаційного додатка, смартфон повинен бути досить потужним і працювати на операційній системі iOS чи Android. Важливими додатковими функціями можуть бути підтримка Google Assistant або Siri, адже вони допомагають синхронізувати навігацію з голосовими помічниками [9].

Носимі пристрої, як Apple Watch чи Samsung Galaxy Watch, додають систему зворотного зв'язку у формі вібрацій. Коли людина наближається до об'єкта або до кінця маршруту, пристрій повідомляє про це легким вібраційним сигналом на зап'ясті. У деяких випадках вібрація вказує на зміну напрямку, що дозволяє відчувати, коли варто повертати чи зупинятися. Смарт-браслет Sunu

Band використовує ультразвуковий датчик, щоб відчувати відстань до об'єктів та передавати її користувачу через вібрації [21].

DIY-рішення, створені на базі Arduino і Bluetooth-модулів, відкривають можливість налаштовувати вібраційні сигнали індивідуально. Вони адаптують систему під конкретні вимоги людини. За силою сигналу маячків вібрації підсилюються або слабшають, надаючи зрозумілі підказки для орієнтації. Таке рішення особливо корисне для тих, хто шукає економний, але практичний підхід [30].

Камери надають систему бачення, доповнюючи навігацію зоровою інформацією. Використовуючи алгоритми комп'ютерного зору, камери розпізнають об'єкти, визначають відстань до них і надають точні вказівки про навколишнє середовище. Наприклад, камера може ідентифікувати двері, меблі, навіть текстові знаки та перетворити їх у голосові підказки.

Сучасні смартфони з камерами високої роздільної здатності, як iPhone чи Samsung, використовуються для цієї мети. OpenCV — бібліотека для комп'ютерного зору, яка дозволяє обробляти зображення, отримані з камери, аналізувати об'єкти і передавати точну інформацію про них. Камера Raspberry Pi — це ще один доступний варіант, який підходить для DIY-рішень і забезпечує достатню роздільну здатність для розпізнавання об'єктів на невеликих відстанях [1].

Звук забезпечує комунікацію в навігаційній системі. Голосові підказки відображають маршрут, дозволяючи людині з вадами зору отримувати точні інструкції про напрямок руху. Bluetooth-навушники, як AirPods, забезпечують якісний звук, незалежно від зовнішнього шуму. Навушники є зручними для постійного носіння, адже дозволяють залишатися на зв'язку із системою навіть у гучних місцях.

Якщо навушники недоступні, використовують вбудовані динаміки смартфона, які забезпечують гучний і зрозумілий звук для більшості ситуацій. Завдяки голосовим командам користувач чує вказівки про кожен поворот, об'єкт чи перешкоду на шляху, що додає впевненості в кожному кроці. В

умовах обмеженого простору і перешкод звукові системи залишаються надійним інструментом навігації, забезпечуючи постійний зв'язок із користувачем [33].

Кожен компонент системи виконує свою частину роботи. Маячки iBeacon створюють просторові орієнтири, смартфони обробляють сигнали і передають голосові вказівки, носимі пристрої додають тактильний зворотний зв'язок, а камери забезпечують зорове сприйняття. Усе це разом створює систему, здатну забезпечити автономність, адаптуючи навігацію під конкретні потреби і середовище користувача.

2.3. Проєктування програмного забезпечення для інтеграції навігаційних і орієнтаційних функцій

Запропонована основа архітектури є універсальною для реалізації на платформах різного типу і передбачає чітке розділення обчислювальних компонентів системи на логічні шари:

1. *Шар даних*, у якому організована робота із отримання, збереження, конвертації даних з апаратних компонентів системи чи сторонніх сервісів.
2. *Шар обробки* даних охоплює усю складну бізнес-логіку та обчислення.
3. *Шар презентації* містить функціонал зв'язку системи та користувача через доступні на платформі інтерфейси.

Кожен із цих шарів працює окремо, незалежно один від одного, а взаємодія між шарами здійснюється не прямо, а через реалізовані інтерфейси комунікації. Кожен шар оперує власними типами сутностей із даними, попередньо підготовленими та обмеженими для поточної області роботи, для збереження цілісності та безпеки.

Надалі такий архітектурний підхід дає можливості для легкого розширення системи, міграції та уніфікації модулів, імплементації кросплатформних рішень.

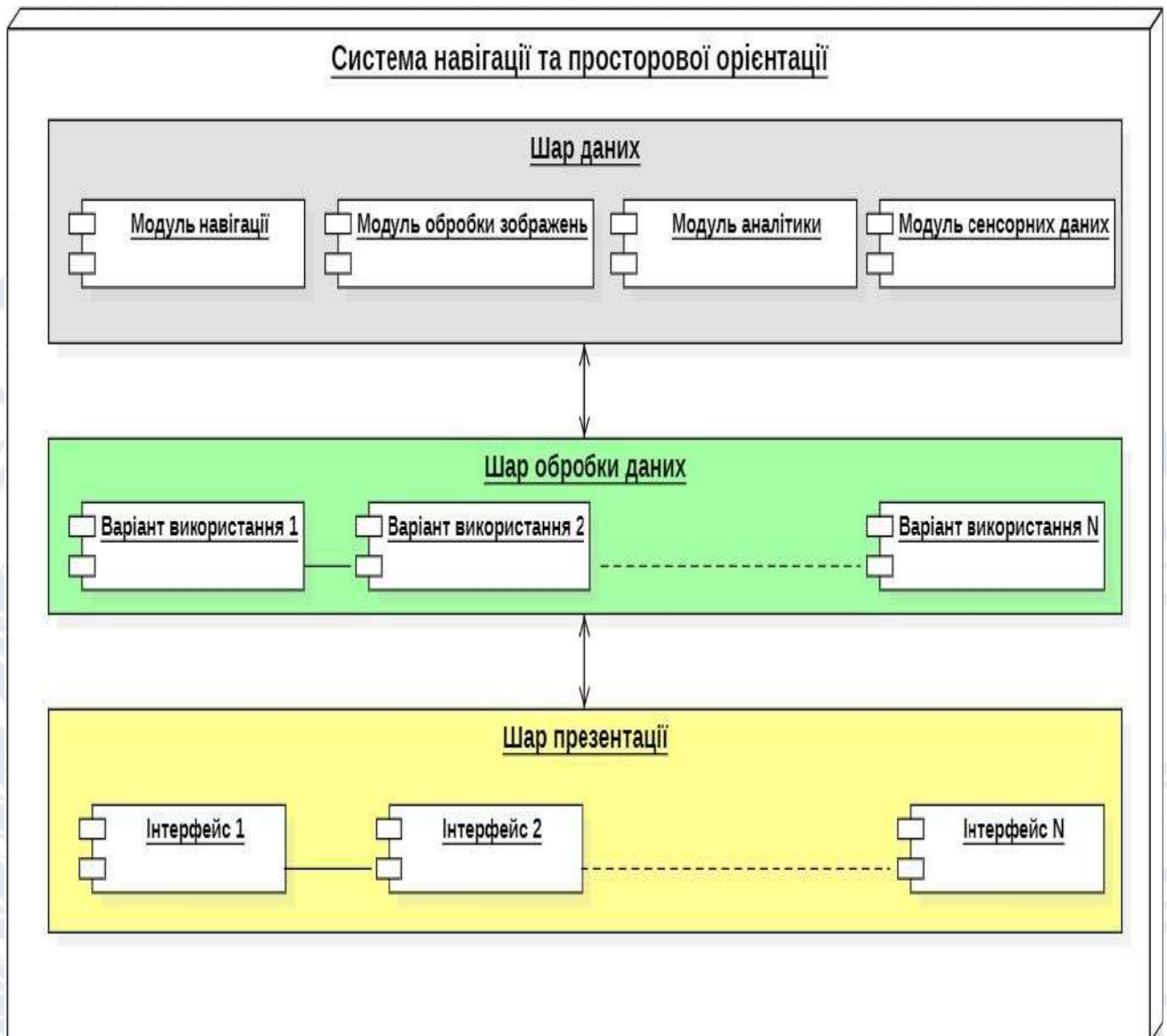


Рис. 2.1. Діаграма компонентів архітектури системи навігації та просторової орієнтації

На рис. 2 відображено діаграму компонентів архітектури системи навігації та просторової орієнтації, з деталізованими внутрішніми складовими кожного шару у вигляді модулів. Шар даних:

1. Модуль аналітики – набір вбудованих та сторонніх компонентів, для збереження та аналізу даних: база даних, аналітика. Аналітика та збирання даних потрібні як на початкових етапах розроблення системи, так і під час подальшого розвитку, підвищення точності та надійності.

2. Модуль навігації – програмна реалізація навігації, на основі відкритих карт та даних щодо місцевості та локації пристрою. У цьому модулі розгортається функціонал повної навігації користувача по доступній місцевості, розраховують маршрути, траєкторії та рухи. На рис. 3 відображено діаграму класів модуля навігації, із простим сховищем логіки організації сирих даних та комунікації із модулем.

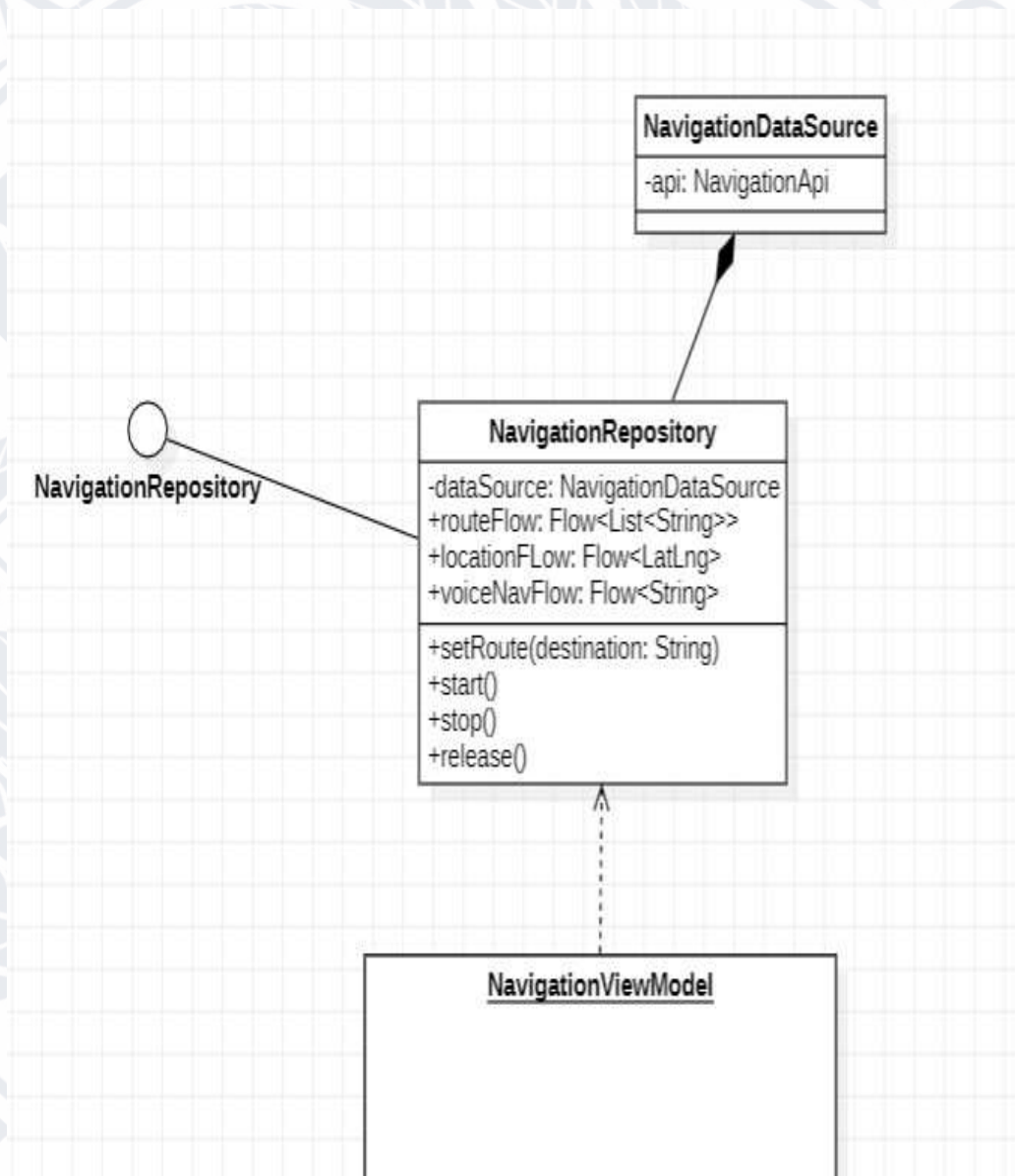


Рис 2.2. Діаграма класів модуля навігації

Рис.2.2. Діаграма класів модуля навігації

Модуль оброблення зображень – обчислювальний модуль, що охоплює набори алгоритмів, автономних моделей нейронних мереж та інтерфейсів зв'язку для оброблення потоку графічних даних.

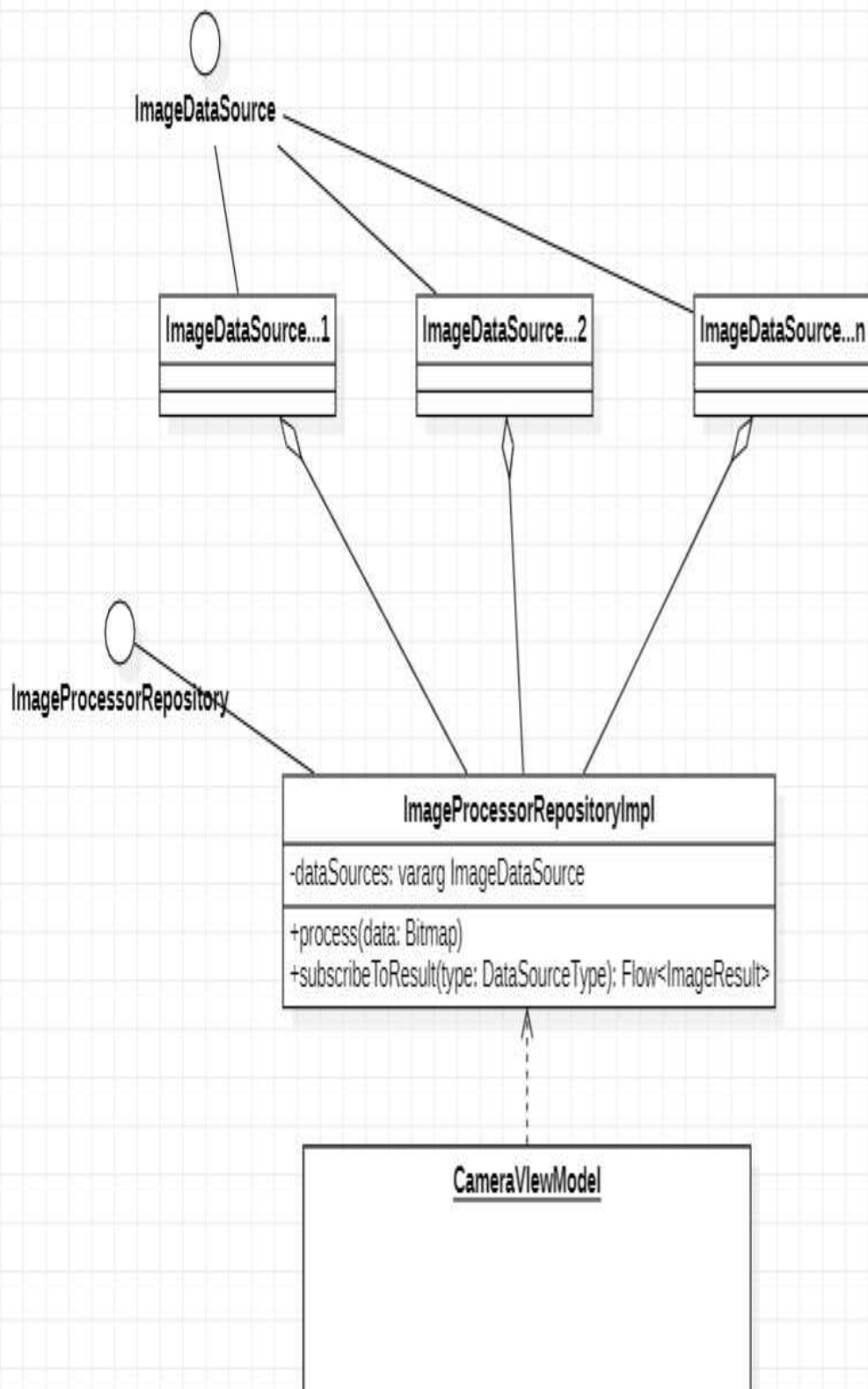


Рис. 2.3. Діаграма класів модуля оброблення зображень [16]

На рис. 3 відображено діаграму класів модуля оброблення зображень, яка описує детальну структуру внутрішніх компонентів та зв'язки між ними. Основним колектором є клас **ImageProcessorRepositoryImpl**, який реалізовує

відповідний інтерфейс для подальшої міжмодульної комунікації. Цей клас агрегує множину екземплярів класів ImageDataSource та надає два методи взаємодії із собою. ImageDataSource – клас, що реалізує відповідний інтерфейс та зберігає логіку на один варіант оброблення зображення.

Модуль сенсорних даних – прямі та закриті налаштовані інтерфейси отримання даних з апаратних компонентів системи: сенсори, інтерфейси комунікації.

Шар обробки даних містить динамічну кількість варіантів використання, які, своєю чергою, є логічними операціями із даними, отриманими з інших шарів системи. Один варіант використання розглядається у цій архітектурі як атомарна проста операція, налаштовується і спрощується, орієнтуючись на обчислювальні можливості багатопоточності системи. Прикладом таких операцій є оброблення зображення та зіставлення його із даними сенсорів акселерометра та гіроскопа, для визначення шаблону руху і передбачення наступних кроків користувача у просторі.

Шар презентації найзалежніший від платформи, середовища, де розгортається система, проте організований чіткою структурою інтерфейсів, які містять логіку комунікації користувача із системою. Такими інтерфейсами є звуковий вивід пристрою, вібросигнал, дисплей, комунікація із периферією.

На основі вимог та функціонала системи запропоновано архітектуру та її окремі модулі, спроектовано алгоритм системи навігації та просторової орієнтації у вигляді класифікації об'єктів середовища користувача і його комунікації з системою. Алгоритм роботи системи навігації та просторової орієнтації відображено на рис. 2.4.

Основною перевагою цього алгоритму є правильний розподіл обчислювальної роботи в багатопоточному середовищі виконання, який відображено на блок-схемі алгоритму відповідним елементом.

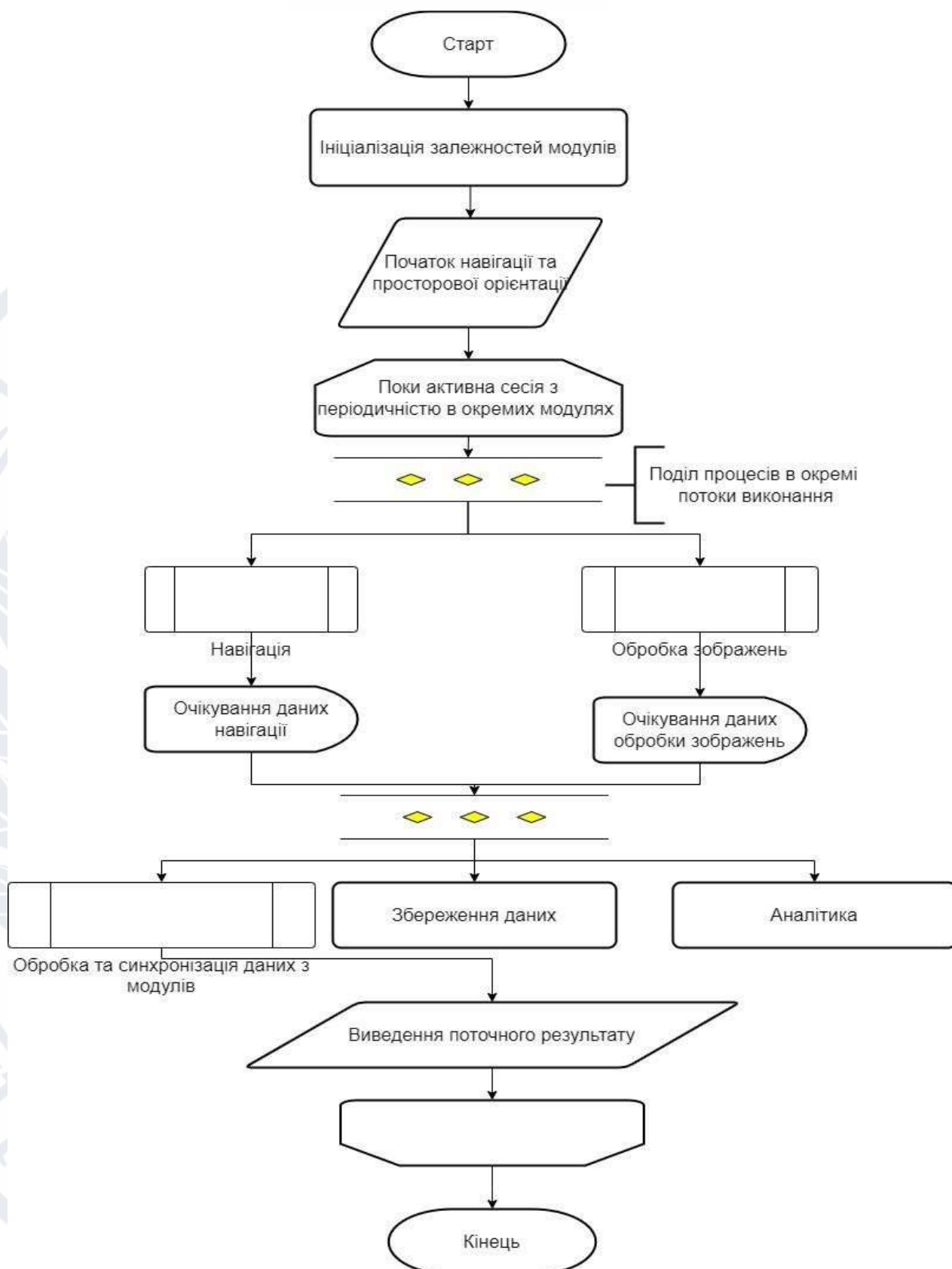


Рис. 2.4. Алгоритм роботи навігації та просторової орієнтації у загальному вигляді

Не усі процеси можуть виконуватись паралельно, через недоцільність використання для простих задач окремих потоків або ресурсів окремого потоку для асинхронного виконання. Серед таких задач – початкова ініціалізація потрібних залежностей та модулів, яка у разі асинхронного виконання дасть незначний вииграш у часі, враховуючи затрати на конфлікти доступу до спільних ресурсів, які можуть бути спричинені. Початок сесії основного функціонала навігації та просторової орієнтації та його завершення також виконуються в одному потоці, який у користувацьких інформаційних системах такого типу виділяється як *головний потік*, для взаємодії з користувачем. Основна частина роботи системи, архітектурно поділена на окремі модулі, приймає виконання процесів у окремих потоках. Як відображено на блок-схемі, процеси навігації та обробки зображень, позначені відповідними елементами, алгоритми яких деталізовано описані на наступних діаграмах, виконуються паралельно та завдяки дотриманому на етапі проєктування принципу інкапсуляції логіки цих модулів не виникає конфліктів виконання. На рис. 2.5 подано детальне описання роботи функціонала навігації, який виконується на окремо виділеному потоці.

Процес починається із виклику відповідної функції, з головного потоку виконання, після чого відбувається попередня ініціалізація внутрішніх об'єктів модуля. Далі користувач вводить вхідні дані місця призначення та налаштовує навігацію по маршруту. Навігація комплексно складається із трьох процесів підписки на оновлення даних із програмного інтерфейсу навігації, час зупинки виконання кожного із яких невизначений. У межах цього потоку виконання їх поділено на підзадачі, тобто такі, яким динамічно виділяють ресурси на виконання у момент виходу зі стану паузи. Процеси оновлення даних щодо прогресу навігації та інструкцій проходження маршруту прості та не потребують великої кількості ресурсів, які полягають в очікуванні та передаванні результату на подальше оброблення в загальному контексті роботи системи.

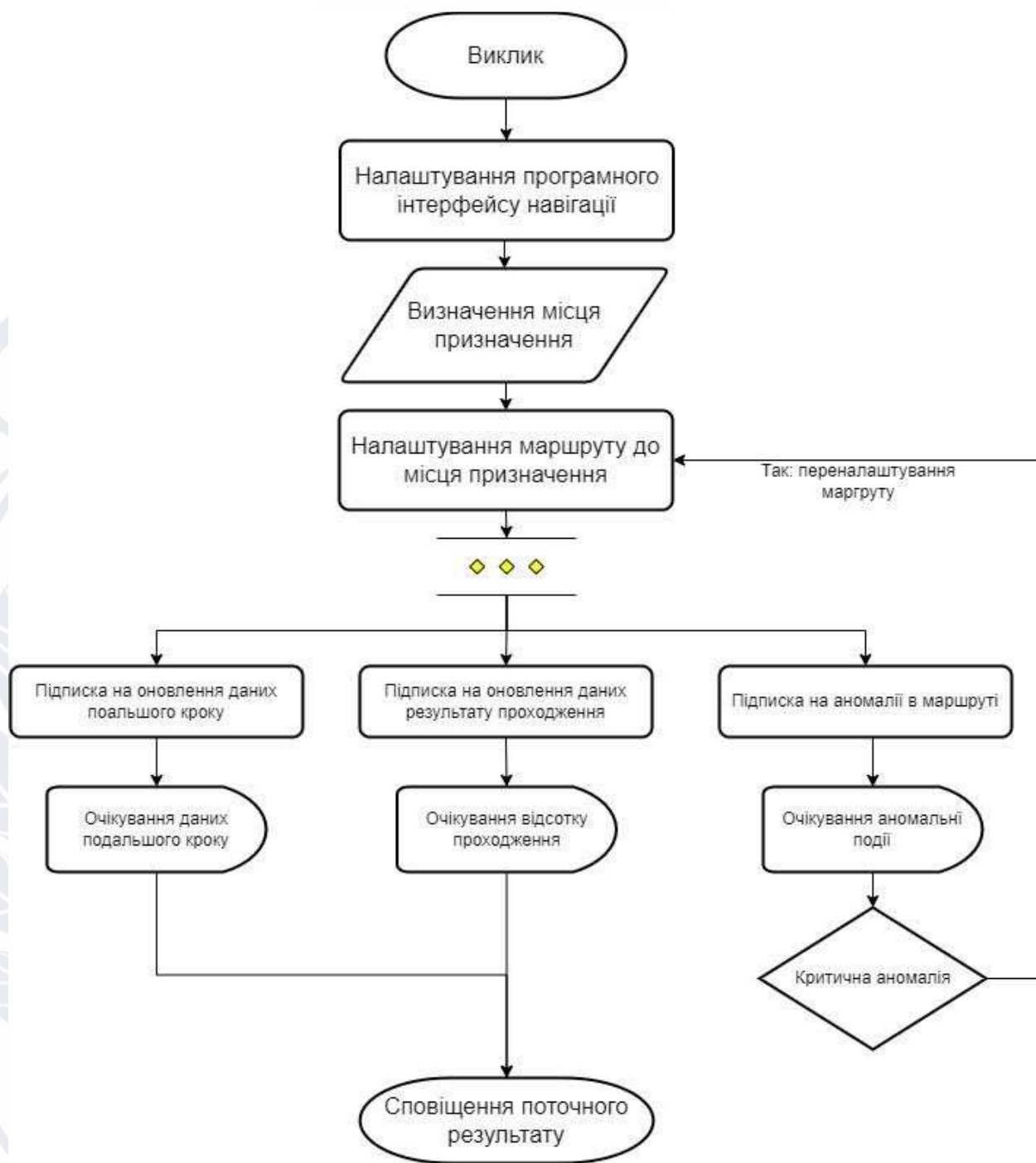


Рис. 2.5. Деталізований алгоритм роботи функціонала навігації

Оновлення даних щодо аномальних подій у навігації може спричинити тимчасову зупинку всього потоку, якщо така подія є критичною. Така термінова зупинка не потребує додаткових ресурсів на переривання дії інших операцій, адже вони виконуються асинхронно в контексті одного потоку, який централізовано керує усіма ресурсами та запущеними дочірніми операціями. Оброблення зображень, відображене на рис. 2.6, має таку саму основу, як і

процес навігації, з поділом ресурсів свого виділеного потоку виконання на усі дочірні процеси.

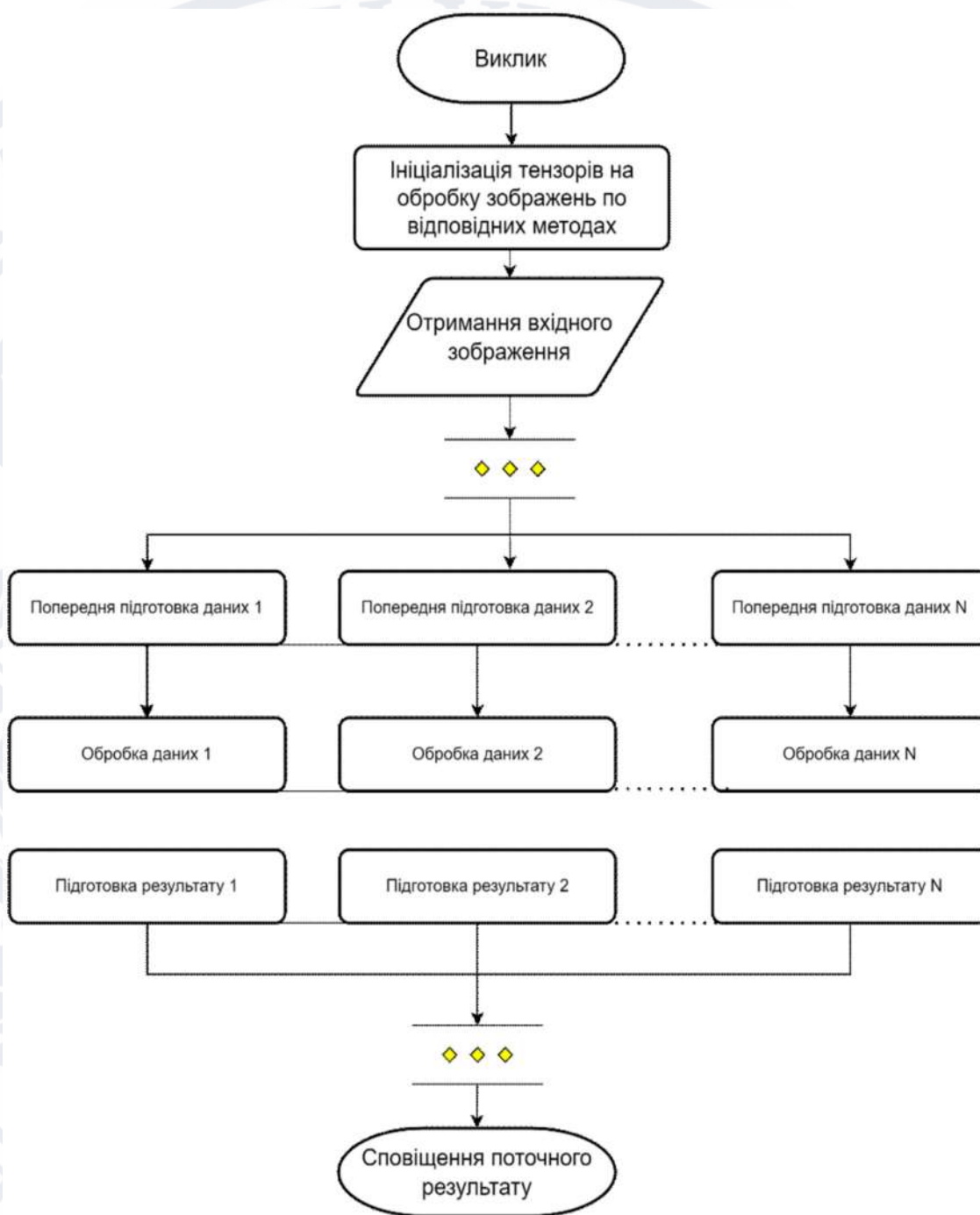


Рис. 2.6. Деталізований алгоритм роботи функціонала оброблення зображень

Починається процес із виклику функції оброблення зображень з головного потоку та переходить до функції ініціалізації об'єктів тензорів, для оброблення зображень за допомогою моделей нейронних мереж [7].

натренованих на конкретний варіант обчислення. У цьому модулі передбачена невизначена кількість тензорів із власним алгоритмом обчислення, кожен з яких відокремлюється у підзадачу, з можливістю виділення ресурсів на виконання. Тензорний процес обробки даних зображення приймає на вхід та передає на вихід дані чітко визначеного формату, тому процеси попередньої підготовки даних та конвертації результату складні та ресурсозатратні, адже оперують складними математичними операціями над великими обсягами цифрових даних, тому під час масштабування модуля оброблення зображень їх логіка може бути абстрагована в окремий підмодуль, який виконуватиметься, і кожен варіант конвертації вхідних чи вихідних даних буде відведений в окрему асинхронну підзадачу. Завершується оброблення процесу передаванням поточного обробленого результату на вихід функції у загальний контекст роботи системи навігації та просторової орієнтації.

Розробка програмного забезпечення є ключовим етапом створення системи навігації для людей з обмеженим зором. Це ПО буде обробляти сигнали від маячків, камери, GPS, а також надавати голосові інструкції або тактильні сигнали. Детальний план цього процесу включає наступні підпункти:

Маячки є основними елементами, що забезпечують точне визначення місцезнаходження користувача в просторі.

Bluetooth API: Для розробки мобільного додатка потрібно використовувати API для Bluetooth Low Energy (BLE), щоб програма могла знаходити маячки та отримувати їх сигнали. В **Android** для цього використовується бібліотека **BluetoothAdapter** і **BluetoothLeScanner**, а в **iOS** – **CoreLocation** та **CoreBluetooth**.

Алгоритм розпізнавання сигналів:

- Програма повинна періодично сканувати найближчі маячки.
- Обчислювати відстань до кожного маячка на основі потужності сигналу RSSI.

- Визначати місцезнаходження користувача на основі сигналів з кількох маячків (метод триангуляції).

Код для пошуку маячків на Android:

```
BluetoothAdapter bluetoothAdapter = BluetoothAdapter.getDefaultAdapter();
BluetoothLeScanner scanner = bluetoothAdapter.getBluetoothLeScanner();
scanner.startScan(new ScanCallback() {
    @Override
    public void onScanResult(int callbackType, ScanResult result) {
        BluetoothDevice device = result.getDevice();
        int rssi = result.getRssi();
        // Обчислення відстані на основі RSSI
        double distance = calculateDistance(rssi);
        // Оновлення інтерфейсу або надання інструкцій
    }
});
```

Код для iOS (CoreLocation):

```
let beaconRegion = CLBeaconRegion(proximityUUID: uuid, identifier:
"MyBeacon")
locationManager.startMonitoring(for: beaconRegion)
func locationManager(_ manager: CLLocationManager, didRangeBeacons
beacons: [CLBeacon], in region: CLBeaconRegion) {
    for beacon in beacons {
        let proximity = beacon.proximity
        // Оновлення інтерфейсу або надання інструкцій
    }
}
```

Для забезпечення навігації на відкритих просторах необхідно інтегрувати GPS у додаток. GPS дозволить точно визначити місцезнаходження користувача на вулиці та надати інструкції щодо маршруту.

Google Maps API (для Android): Для роботи з картою та отримання маршрутів

використовувався API Google Maps.

CoreLocation (для iOS): Ця бібліотека дозволяє отримувати дані GPS та визначати місце користувача на відкритій місцевості.

Алгоритм:

- Запит на поточне місцезнаходження через GPS.
- Обробка даних для визначення маршруту.
- Голосова підказка або вібрація, коли користувач наближається до потрібної точки або змінює напрямок.

Оскільки користувачі не можуть бачити екран, система повинна надавати голосові інструкції для орієнтації в просторі. Реалізація за допомогою вбудованих можливостей голосового синтезу.

Text-to-Speech (TTS): Синтез мовлення дозволить додатку перетворювати текст на аудіо та програвати його для користувача.

Для Android: використовується **TextToSpeech API**.

Для iOS: використовується **AVSpeechSynthesizer**.

Код для Android (TTS):

```
TextToSpeech tts = new TextToSpeech(context, new
TextToSpeech.OnInitListener() {
    @Override
    public void onInit(int status) {
        if (status == TextToSpeech.SUCCESS) {
            tts.speak("Поверніть праворуч через 10 метрів",
TextToSpeech.QUEUE_FLUSH, null, null);
        }
    }
});
```

Окрім основних функцій, користувачеві може знадобитися інтерфейс для управління системою:

- Включення/вимкнення певних функцій (наприклад, звук та вібрацію).

- Налаштування маршруту або вибір пункту призначення.
- Інтеграція з голосовими помічниками (Google Assistant, Siri) для зручнішого керування.

Інтеграція з Google Assistant (Android):

```
Intent intent = new Intent(Intent.ACTION_VOICE_COMMAND);
startActivity(intent);
```

Тестування

Модульне тестування: Перевірка кожної функції окремо (Bluetooth, GPS, TTS).

Тестування в реальних умовах: Перевірка системи з користувачами в приміщенні та на відкритому просторі.

Оптимізація: Перевірка продуктивності додатку, стабільності з'єднання з маячками та швидкості синтезу мовлення.

2.4. Впровадження методів тактильного і звукового зворотного зв'язку для забезпечення навігації

Тестування і налаштування — етап, що перетворює систему навігації на надійного помічника, здатного точно й швидко реагувати на потреби користувача. Усе, що ми налаштовуємо, перевіряємо, коригуємо — спрямоване на те, щоб зробити пересування зручним, а навігацію безпечною і зрозумілою. Мета проста: повністю адаптувати систему під користувача і створити такий інтерфейс, який сам по собі зникне, залишивши людині лише зручність і безпеку.

Мета тестування виходить за рамки простого виявлення помилок. Ми перевіряємо, як система працює в реальному житті: наскільки вона точна, як швидко реагує, чи зрозуміло взаємодіє з користувачем. Кожна деталь, від радіуса дії маяків до гучності звукових підказок, підлягає тестуванню в реальних умовах. Ми прагнемо не просто створити систему, а й налаштувати її так, щоб вона стала природним елементом простору, що супроводжує кожен крок користувача.

Маячки iBeacon — це «очі» системи, тому їхня точність критично важлива. Перевірка починається з розташування маячків у приміщенні. У кожній кімнаті, коридорі, біля входу і важливих об'єктів ми тестуємо потужність сигналу, дальність дії та зону покриття. Для цього використовуємо спеціальні додатки, які вимірюють потужність сигналу (RSSI) і візуалізують зони дії маячків. Сигнал кожного маячка повинен покривати свій сектор і не перетинатися з сигналами інших, щоб не виникало плутанини [27].

Дальність дії коригується, щоб забезпечити стабільне покриття простору. Якщо маячки розташовані надто далеко, сигнал втрачається, а це загрожує збоєм у навігації. Якщо надто близько — створюється «перевантаження» сигналів, що може збивати систему з толку. Ми налаштовуємо радіус кожного маячка, щоб він чітко відповідав конкретній локації, уникаючи накладень. Наприклад, в довгих коридорах маячки розташовані через кожні 5-10 метрів, щоб забезпечити безперервне покриття і вчасно вказати напрямку руху [3].

Реальний простір повний перешкод, тому тестуємо, як система реагує на фізичні бар'єри. Стіни, меблі, великі металеві об'єкти можуть глушити сигнал. Щоб зменшити вплив перешкод, перевіряємо, як сигнал проходить через різні матеріали. Наприклад, бетонні стіни значно знижують силу сигналу, а дерев'яні — майже не впливають. Тестування виявляє слабкі місця, і на основі результатів ми коригуємо розташування маячків або налаштовуємо їхню потужність [9].

Тактильний зворотний зв'язок є інтегральною складовою системи навігації для осіб із вадами зору, що дозволяє отримувати інформацію не лише через аудіосигнали, але й за допомогою вібрацій. Ця технологія підтримує орієнтацію у просторі, попереджає про перешкоди та вказує зміни напрямку руху. Основна функція такого зворотного зв'язку полягає у наданні додаткової інформації про навколишнє середовище через вібраційні сигнали. Це забезпечує просторову орієнтацію, сигналізуючи про повороти або необхідність змінити маршрут, а також попереджає про перешкоди на шляху завдяки використанню різних вібраційних патернів. Крім того, тактильний зворотний зв'язок може

підтверджувати успішне виконання дій, таких як вибір маршруту або досягнення цільової точки.

Залежно від ситуації застосовують різні типи вібрацій. Короткі імпульси сигналізують про наближення до цілі або місця призначення, тоді як тривалі сигнали інформують про важливі події, наприклад, зміну маршруту. Спеціальні патерни, такі як три короткі вібрації для повороту ліворуч або дві довгі для правого повороту, дозволяють користувачу швидко ідентифікувати конкретну ситуацію.

Для реалізації тактильного зворотного зв'язку через мобільні пристрої використовують вбудовані вібраційні модулі. На платформі Android це досягається за допомогою класу `Vibrator`, що дозволяє задавати тривалість і інтенсивність вібрації. Код прикладу виглядає так:

```
Vibrator vibrator = (Vibrator)
getSystemService(Context.VIBRATOR_SERVICE);

long[] pattern = {0, 100, 50, 100}; // Час в мс: затримка, вібрація, пауза,
вібрація

vibrator.vibrate(VibrationEffect.createWaveform(pattern, -1)); // Використання
патерну
```

На платформі iOS аналогічну функціональність реалізовано через клас `UIImpactFeedbackGenerator` або `AudioServicesPlaySystemSound`. Приклад коду:

```
let generator = UIImpactFeedbackGenerator(style: .medium)
generator.impactOccurred() // Виклик вібрації
```

Крім мобільних телефонів, тактильний зворотний зв'язок успішно реалізовано у носимих пристроях. Смарт-годинники завдяки вбудованим вібраційним модулям повідомляють про необхідність змінити напрямок. Для розробки на Apple Watch використовують спеціальні API для керування вібрацією. Також існують спеціальні тактильні браслети або пристрої для людей із вадами зору, які інтегруються із системами навігації через бездротові технології, такі як Bluetooth.

Для ефективної роботи системи були розроблені різноманітні вібраційні патерни, що відповідають конкретним подіям. Наприклад, кілька коротких вібрацій сигналізують про наближення до повороту, одна довга вібрація попереджає про перешкоду, а короткий імпульс підтверджує виконання певної дії.

Ефективність тактильного зворотного зв'язку була перевірена в процесі тестування з реальними користувачами. В ході тестування оцінювалася комфортність та ефективність вібраційних сигналів, а також виконувалася налаштування тривалості та інтенсивності вібрацій для кращого сприйняття сигналів. Такий підхід дозволяє забезпечити зручну і надійну систему навігації, яка сприяє покращенню орієнтації у просторі для осіб із обмеженим зором.

Тактильний зворотний зв'язок — це «мовчазний» помічник системи. Він допомагає відчувати простір навіть у шумних місцях, де звук стає менш ефективним. Ми тестуємо різні патерни вібрацій, щоб визначити, які з них найкраще сприймаються користувачем. Наприклад, короткі імпульси використовуються для позначення поворотів, а довші — для попередження про перешкоду. Різні патерни дозволяють системі передавати кілька типів сигналів, не використовуючи звукові підказки [33].

Звуковий зворотний зв'язок — це «голос» системи. Ми перевіряємо, наскільки якісно і чітко чути підказки у різних умовах. У галасливих місцях, наприклад на вулиці, тестуємо гучність і зрозумілість команд. Звукові підказки повинні бути зрозумілими і інформативними, щоб користувач міг сприймати їх без напруження. Після тестування ми додаємо можливість регулювати гучність залежно від умов і налаштовуємо зміст підказок, щоб уникати зайвих деталей [1].

Після первинного тестування збираємо відгуки користувачів і вносимо зміни. Калібруємо маячки iBeacon, змінюючи їхнє розташування або налаштовуючи радіус дії. Наприклад, якщо сигнал недостатньо точний у певній зоні, ми коригуємо його, додаючи або видаляючи маячок, покращуючи якість покриття. Також змінюємо патерни вібрації та звукові сигнали на основі

відгуків, щоб вони були інтуїтивними для користувача і не викликали плутанини [40].

Вібрації та звук підбираємо так, щоб не перевантажувати людину зайвою інформацією. Усі сигнали мають бути простими і чіткими: чим менше складних команд, тим легше користувачеві орієнтуватися. Фінальні налаштування включають всі корективи, зроблені на основі тестів і відгуків, і створюють систему, адаптовану до реальних умов [22].

Фінальне тестування проводить користувач, який відчуває систему вже у повністю налаштованому вигляді. Ми перевіряємо стабільність роботи в різних сценаріях: від тиші до галасливих умов, від простору без перешкод до приміщень з великою кількістю об'єктів. Усі налаштування перевіряються повторно, щоб переконатися, що система працює точно і надійно.

Остаточна оцінка системи показує, чи досягнуто мети: створити навігацію, яка не просто вказує шлях, а й підвищує рівень комфорту і впевненості людини. Результат тестування підтверджує, що система готова до повноцінного використання, надаючи користувачеві контроль над своїм простором, незалежно від складності маршруту чи умов середовища [12].

Тестування і налаштування завершують процес створення системи, яка перетворює навігацію з обмеженим зором на зручний, передбачуваний процес.

2.5. Розміщення та налаштування маячків iBeacon для забезпечення точності позиціонування

Розташування маячків iBeacon у приміщенні перетворює його на точну навігаційну карту, де кожен сигнал формує зрозумілу траєкторію руху. Це не просто розподіл маячків — це детальне планування маршруту для людини з обмеженим зором, де кожна точка стає орієнтиром у просторі.

Спершу слід скласти план приміщення, виявити точки, що стануть ключовими орієнтирами, і врахувати всі просторові особливості. Вхідні двері, кімнати, ванна, кухня, перехрестя коридорів — кожна точка має свою роль у

маршруті. На вході кожної кімнати встановлений один маячок, який визначає початок або кінець маршруту, передаючи чіткий сигнал користувачеві про вхід або вихід [17].

Для довгих коридорів знадобиться кілька маячків із кроком 5-10 метрів, що забезпечить надійне покриття і попередить про кожне відхилення від маршруту. У коридорі людина має відчувати, що сигнал підтримує її рух з постійною точністю, а це можливо лише за умови рівномірного розташування маячків. Біля важливих об'єктів, як-от стільці, столи, або шафи, маячки допоможуть створити просторове уявлення про кімнату і зрозуміти, які предмети розташовані на шляху [6].

Розміщення маячків на рівні 1,5 метра забезпечує ідеальне покриття. Така висота дозволяє сигналу легко поширюватися приміщенням, оминаючи перешкоди на кшталт меблів або техніки, яка може блокувати його. Кріплення маячків виконано за допомогою липучок або монтажних стрічок — такий спосіб дає змогу розташувати маячки практично на будь-якій поверхні без складного монтажу [11].

Металеві предмети та електроніка можуть спотворювати сигнал, тому маячки розташовані на віддалі від них. Особливо чутливими до металу є стіни з арматурою або великі металеві предмети, як холодильник чи плита. Таке розташування гарантує, що сигнал надходитиме рівномірно і не спотворюватиметься через фізичні бар'єри [8].

Кожен маячок має свій радіус дії, що впливає на тип інформації, яку він передає. Типові налаштування iBeacon мають три основні рівні радіусу — коротка, середня та велика дальність.

- Коротка дальність (1-10 метрів) дозволяє визначити розташування близьких об'єктів, ідеально підходить для коридорів або дверей, де важливо повідомити користувача про безпосередню близькість потрібної точки. Такий радіус дозволяє отримати точні дані і чітко вказати, що людина досягла потрібної локації, не виходячи за межі безпечної відстані [27].

- Середня дальність (10-30 метрів) підходить для відкритих приміщень або великих кімнат, де потрібно забезпечити ширший огляд. Це дозволяє отримати чіткі вказівки без надмірної деталізації, дозволяючи людині орієнтуватися у просторі, але з можливістю вільного руху без зайвих підказок [14].

- Велика дальність (30-70 метрів) підходить для зовнішніх просторів або великих залів, де потрібне покриття для великих відстаней. На відкритих просторах велика дальність дозволяє маячку працювати без перерв, надаючи безперервний зв'язок з користувачем навіть на значній відстані [20].

Налаштування кожного маячка залежить від характеристик приміщення, де він розміщений. Калібрування дозволяє встановити необхідну потужність сигналу, щоб покрити конкретну зону без надмірного поширення, що може створювати плутанину. Мобільні додатки, які підтримують iBeacon, дозволяють вручну налаштовувати дальність і перевіряти якість сигналу в режимі реального часу [3].

Наприклад, у невеликому коридорі сигнал налаштовується так, щоб покривати лише межі цього простору, а в просторій вітальні налаштовується на ширший радіус дії. Таке гнучке налаштування підвищує точність і зменшує ризик перетину сигналів від інших маячків, особливо у великих приміщеннях з великою кількістю об'єктів [16].

Після встановлення маячків проводиться тестування для перевірки їхньої ефективності. Під час тестування з'ясовується, як точно система реагує на наближення користувача, чи визначає вона розташування і чи чітко передає сигнали. Калібрування кожного маячка є ключовим етапом, який дозволяє адаптувати потужність сигналу до особливостей приміщення [31].

Точність системи тестується з урахуванням кількох факторів, таких як відстань до маячка, якість сигналу, наявність перешкод. Наприклад, якщо в коридорі або на перехресті маршруту є меблі, система має враховувати це і давати чіткі вказівки, щоб уникнути зіткнень. Тестування дозволяє внести остаточні корективи, щоб система працювала максимально надійно [10].

Маячки iBeacon функціонують на батареях, і їхній стан потрібно контролювати. Залежно від потужності та інтенсивності використання, тривалість роботи батареї варіюється від кількох місяців до кількох років. Для моніторингу батареї використовуються спеціальні додатки та веб-інтерфейси, які інформують про рівень заряду. Це дозволяє завчасно планувати заміну батарей, щоб уникнути збоїв у роботі системи [5].

Наприклад, маячки з довготривалою батареєю здатні працювати без заміни більше року, але інтенсивне використання може скоротити цей період. Підтримка працездатності маячків забезпечує постійну надійність системи, що критично важливо для безпечної навігації людей з обмеженим зором [24].

Розміщення маячків iBeacon — це створення точного маршруту, де кожен сигнал має значення. Сплановане розміщення на висоті 1,5 метра, налаштування дальності та потужності сигналу дозволяють забезпечити надійне покриття. Тестування і підтримка працездатності забезпечують стабільну роботу системи, яка адаптується під конкретні умови.

2.6. Технологія триангуляції та її роль в інтелектуальній системі навігації

Реалізація акустичної системи локалізації для осіб з обмеженим зором:
Деталі технічної реалізації

1. Акустичні Емітенти:

Кожен акустичний емітент – це мікрофон, оснащений пристроєм для генерації акустичних сигналів. Такі пристрої розташовані вздовж маршрутів та важливих зон для забезпечення повного покриття. Акустичні емітенти є ключовим компонентом системи локалізації і призначені для генерації акустичних сигналів у навколишньому середовищі. Вони використовуються для визначення положення користувача та забезпечення необхідної інформації для навігації.

Технічні Деталі:

1. Мікрофони та Динаміки:

- о Акустичні емітенти представлені як набір мікрофонів, розташованих у стратегічних точках. Мікрофони використовуються для реєстрації звукових сигналів від користувача.

2. Широкий Діапазон Частот:

- о Система охоплює широкий діапазон частот для забезпечення універсальності та ефективності. Це дозволяє виявлення і відтворення акустичних сигналів на різних частотах.

3. Синхронізація та Калібрування:

- о Емітенти синхронізуються та калібруються для забезпечення точності визначення часових затримок при приході звукових хвиль.

4. Масштабованість:

- о Система легко масштабується, дозволяючи додавати нові емітенти при необхідності, щоб забезпечити оптимальне покриття великих просторів.

Застосування в Активній Локалізації:

Акустичні емітенти використовуються для створення акустичних сигналів, які взаємодіють з сенсорами на пристроях користувача. Ці сигнали використовуються для визначення часових затримок та триангуляції, що дозволяє точно визначити місцезнаходження.

2. Сенсори Прийому Звуку:

Спеціалізовані навушники або мікрофони, вбудовані в розумні окуляри або інші переносні пристрої. Сенсори прийому звуку грають важливу роль у взаємодії з акустичними емітентами та вимірюють параметри звукових хвиль для подальшого визначення місцезнаходження користувача.

Технічні Особливості:

1. Навушники та Мікрофони:

- о Спеціалізовані навушники або мікрофони вбудовані в пристрої користувача. Навушники можуть відтворювати акустичні сигнали, а мікрофони – реєструвати оточуючий звук.

2. Безперервний Моніторинг:

- о Сенсори забезпечують постійний моніторинг оточуючого звуку, виявляючи зміни в інтенсивності та частоті, що важливо для визначення місцезнаходження.

3. Двостороння Взаємодія:

- о Мікрофони можуть допомагати в розпізнаванні власних акустичних сигналів, що надає можливість більш точної та надійної локалізації.

Застосування в Системі Локалізації:

Сенсори прийому звуку взаємодіють із звуковими сигналами, відтворюваними акустичними емітентами. Процес визначення місцезнаходження включає такі етапи:

1. Реєстрація Звукових Сигналів:

- о Сенсори реєструють акустичні сигнали, що надходять від емітентів, і вимірюють їхні параметри.

2. Аналіз Часових Затримок:

- о Часові затримки між приходом звукових хвиль до різних мікрофонів дозволяють визначити, з якого напрямку приходить сигнал.

3. Триангуляція та Розрахунок Місцезнаходження:

- о Використовуючи інформацію про часові затримки та геометричні принципи триангуляції, система обчислює точне місцезнаходження користувача у просторі.

Сенсори прийому звуку грають ключову роль у створенні точної та надійної системи локалізації для осіб з обмеженим зором.

3. Технологія Триангуляції:

Використовується метод триангуляції для визначення точного місцезнаходження користувача. Алгоритми розрахунку базуються на часових затримках приходу звукових хвиль до сенсорів, що дає точні координати. Технологія триангуляції грає вирішальну роль у визначенні місцезнаходження користувача в просторі. Цей метод базується на вимірах часових затримок

приходу сигналів до різних сенсорів, що дозволяє точно визначити координати об'єкта.

Важливі Компоненти Технології Триангуляції:

1. Множина Сенсорів:
 - о Використання набору сенсорів (наприклад, мікрофонів або інших акустичних датчиків), розташованих у просторі. Чим більше точок фіксації, тим точніше може бути визначено місцезнаходження.
2. Вимірювання Часових Затримок:
 - о Сенсори реєструють часові затримки між приходом сигналів. Це може бути виміряно з точністю до мікросекунд, особливо у високоточних системах.
3. Геометрична Триангуляція:
 - о Використання геометричних принципів триангуляції для обчислення точного місцезнаходження об'єкта. Визначення відстані та кутів між сенсорами є ключовими для цього процесу.
4. Алгоритми Обчислення:
 - о Застосування алгоритмів обчислення, таких як алгоритми геометричної триангуляції або методи, що використовують природні закони розповсюдження звуку, для точного визначення координат.

Процес Технології Триангуляції в Системі Локалізації:

1. Запуск Сигналів:
 - о Акустичні емітенти випускають акустичні сигнали у простір, що реєструються сенсорами.
2. Фіксація Часових Затримок:
 - о Сенсори фіксують часові затримки між приходом сигналів до кожного сенсора.
3. Розрахунок Та Триангуляція:
 - о Використовуючи часові затримки та геометричні дані, система обчислює координати користувача методами триангуляції.
4. Оцінка Точності:

- о Оцінка точності визначеного місцезнаходження на основі ступеня відхилення вимірів та параметрів системи.

Технологія триангуляції забезпечує точне та надійне визначення місцезнаходження, роблячи її ефективною для систем локалізації осіб з обмеженим зором.

4. Обробка Сигналу:

Для поліпшення точності визначення місцезнаходження застосовується кросс-кореляція та цифрова обробка сигналу. Це забезпечує ефективну інтеграцію отриманих даних.

Обробка сигналу в системі локалізації для осіб з обмеженим зором є ключовим етапом, який включає в себе ряд алгоритмів та методів для підвищення точності та надійності визначення місцезнаходження на основі отриманих акустичних сигналів.

Основні Кроки Обробки Сигналу:

1. Сигнальний Простір:
 - о Початковий етап включає збір акустичних сигналів, які отримані від сенсорів. Ці сигнали представляють собою часові ряди амплітуд та частот, які вказують на реєстрацію звукових хвиль у приміщенні.
2. Фільтрація та Шумозниження:
 - о Використання фільтрів та алгоритмів шумозниження для вилучення зайвого або непотрібного шуму зі сигналу. Це дозволяє покращити відношення сигнал-шум та забезпечити чітке розрізнення корисних сигналів.
3. Кросс-Кореляція:
 - о Використання методу кросс-кореляції для визначення часових затримок між сигналами, які отримані від різних сенсорів. Цей етап важливий для точного визначення напрямку та відстані.
4. Амплітудна та Частотна Модуляція:
 - о Врахування змін в амплітуді та частоті сигналів в часі для отримання додаткової інформації про рух об'єктів у просторі.
5. Просторова Фільтрація:

- о Використання алгоритмів для фільтрації та обробки сигналів у тривимірному просторі для точного визначення координат об'єкта.

Переваги Обробки Сигналу в Системі Локалізації:

Покращена Точність: Обробка сигналу дозволяє виправляти спотворення та шум, що може виникнути в процесі передачі та реєстрації сигналів.

Врахування Змін в Оточенні: Алгоритми обробки сигналу можуть враховувати зміни в оточенні, що дозволяє системі адаптуватися до різних умов та ситуацій.

Оптимізація Ресурсів: Ефективна обробка сигналу дозволяє оптимізувати використання ресурсів та підвищує швидкість роботи системи.

Обробка сигналу в системі локалізації є важливим етапом, що гарантує високу точність та стабільність визначення місцезнаходження для користувачів з обмеженим зором.

5. Розпізнавання Орієнтації та Точок в Просторі:

Додаткові гіроскопи та акселерометри вбудовані в переносні пристрої для визначення орієнтації користувача. Також використовується компас для визначення напрямку руху.

Розпізнавання орієнтації та точок в просторі в системі локалізації для осіб з обмеженим зором включає в себе визначення напрямку та орієнтації користувача, а також розпізнавання ключових точок або об'єктів у навколишньому середовищі [10]..

Визначення Орієнтації:

1. Гіроскопи та Акселерометри:
 - о Використання вбудованих гіроскопів та акселерометрів для вимірювання обертання та прискорення пристрою. Це надає інформацію про орієнтацію в просторі.
2. Магнітні Датчики:

- о Застосування магнітних датчиків для визначення орієнтації відносно магнітного північного напрямку. Це дозволяє визначати напрямок руху в абсолютних координатах.

Розпізнавання Точок в Просторі:

1. Використання Камер:
 - о Вбудовані камери в пристрої для аналізу оточуючого середовища та розпізнавання візуальних точок, таких як розпізнавання маркерів, знаків або особливих об'єктів.
2. Обробка Зображень:
 - о Використання алгоритмів обробки зображень для розпізнавання унікальних особливостей або об'єктів в оточенні.
3. Технології Доповненої Реальності (AR):
 - о Інтеграція технологій AR для відображення додаткової інформації про точки в просторі. Це може включати віртуальні анотації чи інші візуальні елементи.

Інтерактивні Звукові Повідомлення:

1. Генерація Звукових Сигналів:
 - о Створення спеціалізованих звукових сигналів для відтворення інформації про орієнтацію та точки в просторі.
2. Просторовий Звук:
 - о Використання технологій, які забезпечують просторовий звук, для надання користувачеві чіткого враження від напрямку та віддаленості точок в просторі.

Переваги Розпізнавання Орієнтації та Точок в Просторі:

Покращене Відчуття Орієнтації: Розпізнавання орієнтації дозволяє користувачам точно визначати напрямок та орієнтацію, покращуючи їх взаємодію з навколишнім середовищем.

Навігація в Реальному Часі: Розпізнавання точок в просторі дозволяє користувачам навігувати в реальному часі, уникати перешкод та знаходити потрібні місця.

Інтерактивність через Звук: Використання звукових сигналів для створення інтерактивного середовища, що допомагає користувачам сприймати інформацію про орієнтацію.

6. Інтерактивні Звукові Повідомлення:

Високоякісні звукові сигнали, створені з врахуванням різних частот та гучності, інформують користувача про його точне місцезнаходження, а також надають важливі інструкції та оглядові коментарі. Інтерактивні звукові повідомлення в системі локалізації для осіб з обмеженим зором представляють собою ефективний спосіб надання інформації про місцезнаходження, орієнтацію та точки в просторі через аудіальний канал.

Технічні Аспекти Інтерактивних Звукових Повідомлень:

1. Генерація Звукових Сигналів:
 - о Використання звукових ефектів, мовлення або аудіо-повідомлень для створення інтерактивних сигналів. Генерація може включати в себе різні тембри, частоти та гучність.
2. Просторовий Звук:
 - о Застосування технологій, які надають просторовий звук для передачі інформації про напрямок та віддаленість об'єктів у просторі.
3. Динамічна Адаптація:
 - о Можливість динамічної адаптації звукових повідомлень залежно від змін у навколишньому середовищі або потреб користувача.

Функції Інтерактивних Звукових Повідомлень:

1. Навігація:
 - о Звукові сигнали, які вказують на напрямок руху та відстань до певних точок чи об'єктів, допомагаючи користувачам навігувати в просторі.
2. Інформація про Околиці:
 - о Повідомлення про важливі точки, перешкоди, або особливі місця в оточенні, що дозволяє користувачам зорієнтуватися.
3. Взаємодія з Об'єктами:

- о Звукові сигнали, які інформують користувачів про наявність та характер об'єктів, що знаходяться поруч.

4. Попередження про Зміни:

- о Сигнали, що попереджають про зміни в оточенні, наприклад, зміну напрямку руху чи зміну середовища.

Переваги Інтерактивних Звукових Повідомлень:

Доступність для Осіб з Обмеженим Зором: Забезпечення доступу до інформації та навігації для осіб з обмеженим зором, допомагаючи їм сприймати оточення через звук.

Ефективність у Реальному Часі: Інтерактивні звукові повідомлення можуть надавати інформацію миттєво, що робить їх ефективними для навігації у реальному часі.

Збільшення Безпеки та Впевненості: Допомагаючи користувачам визначати місцезнаходження та оточення, інтерактивні звукові повідомлення сприяють відчуттю безпеки та впевненості в русі.

7. Можливості Доповненої Реальності (AR):

Використання камер для аналізу оточуючого середовища та відображення додаткової інформації на екрані, що полегшує орієнтацію та взаємодію з навколишнім простором.

Доповнена реальність (AR) в системі локалізації для осіб з обмеженим зором відкриває широкі можливості покращення навігації та сприяє зручній інтеракції з навколишнім середовищем. Нижче розглянуті ключові аспекти використання AR для полегшення життя осіб з обмеженим зором:

Віртуальні Маркери та Навігаційні Підказки:

1. Відображення Шляху:

- о Використання AR для нанесення віртуального сліду або ліній, які вказують на шлях, який користувач повинен пройти, забезпечуючи точні та чіткі навігаційні вказівки.

2. Віртуальні Маркери:

о Розпізнавання ключових точок у просторі та відображення віртуальних маркерів, що допомагають орієнтуватися в навколишньому середовищі.

Розпізнавання Об'єктів та Точок Інтересу:

1. AR для Розпізнавання Об'єктів:

о Використання вбудованих камер та алгоритмів розпізнавання для ідентифікації об'єктів навколо користувача, таких як двері, сходи, або інші важливі точки.

2. Інформація про Точки Інтересу:

о Надання користувачу інформації про точки інтересу, такі як магазини, офіси чи інші важливі місця.

Орієнтація та Аугментація Map:

1. Орієнтаційні Стрілки:

о Використання віртуальних стрілок або індикаторів, які вказують на напрямок до потрібної локації.

2. Аугментовані Мапи:

о Відображення інтерактивних аугментованих мап на екрані, де користувач може взаємодіяти з віртуальними об'єктами.

Голосові Команди та Повідомлення:

1. Голосова Взаємодія:

о Використання голосових команд для керування AR-функціями та отримання інформації.

2. Голосові Повідомлення:

о Надання інформації про оточення та маршрутизацію через голосові повідомлення.

Сприяння Інтерації та Соціальні Аспекти:

1. Розпізнавання Облич та Емоцій:

о AR може допомагати розпізнавати обличчя та вираження обличчя, покращуючи соціальну взаємодію.

2. Спілкування з Іншими Користувачами:

- о Системи AR можуть забезпечувати можливості спілкування та обміну інформацією між користувачами, що полегшує колективну навігацію.

Використання AR в системах локалізації відкриває нові горизонти для комфортної та ефективної навігації осіб з обмеженим зором у реальному світі.

8. Захист даних та приватності:

Впровадження шифрування для захисту від несанкціонованого доступу до акустичних та геолокаційних даних користувача. Всі дані передаються за допомогою безпечних протоколів.

Забезпечення захисту даних та приватності користувачів є надзвичайно важливим аспектом в розробці та впровадженні систем локалізації для осіб з обмеженим зором. Нижче розглянуті ключові пункти, що стосуються захисту особистих даних та забезпечення приватності:

Збір та Зберігання Даних:

1. Мінімізація Обсягу Даних:

- о Збирання лише тих даних, які необхідні для функціонування системи локалізації та навігації, з метою мінімізації ризиків.

2. Анонімізація та Псевдонімізація:

- о Застосування технік анонімізації та псевдонімізації для захисту особистої інформації користувачів.

Захист Від Несанкціонованого Доступу:

1. Шифрування Даних:

- о Використання сильних шифрувальних алгоритмів для захисту переданих та збережених даних від несанкціонованого доступу.

2. Аутентифікація та Авторизація:

- о Реалізація механізмів аутентифікації та авторизації для забезпечення тільки санкціонованого доступу до системи та її функцій.

Прозорість та Контроль:

1. Повідомлення Користувачів:

- о Забезпечення чіткої інформації користувачам про те, які дані збираються, як вони використовуються та як вони захищені.

2. Можливість Контролю:

- о Надання користувачам можливості контролю над своєю особистою інформацією, включаючи можливість видалення даних чи заборони їх обробки.

Відповідальна Обробка Даних:

1. Відповідальність Розробників:

- о Визнання та дотримання розробниками високих стандартів безпеки та конфіденційності даних.

2. Регулярні Огляди та Аудити:

- о Проведення регулярних оглядів та аудитів системи для виявлення та усунення можливих слабких місць у захисті даних.

Захист від Технічних Загроз:

1. Захист від Кібератак:

- о Впровадження механізмів захисту від кібератак, таких як вогнені стіни, системи виявлення вторгнень та антивірусні програми.

2. Оновлення та Патчі:

- о Регулярне оновлення програмного забезпечення для виправлення виявлених уразливостей та забезпечення актуальності заходів безпеки.

Системи локалізації для осіб з обмеженим зором повинні слідувати високим стандартам забезпечення захисту даних та приватності, забезпечуючи водночас ефективну та безпечну навігацію користувачів.

9. Контроль енергоспоживання:

Використання оптимізованих алгоритмів для ефективного управління енергоспоживанням, що дозволяє тривалу автономність пристроїв та забезпечує зручність використання.

Забезпечення оптимального контролю енергоспоживання є ключовим аспектом при розробці систем локалізації для осіб з обмеженим зором. Нижче представлені стратегії та технології, які спрямовані на забезпечення ефективного використання енергії:

Оптимізація Апаратного Забезпечення:

1. Енергозберігаючі Сенсори:

- о Використання сенсорів, які можуть працювати в режимі зниженої енергоспоживання, і включаються лише при необхідності для виконання конкретних завдань.

2. Оптимізація Частоти Центрального Процесора (CPU):

- о Динамічне регулювання частоти роботи CPU відповідно до завдань, що виконуються, для зменшення витрат енергії.

Управління Живленням:

1. Режими Споживання Енергії:

- о Визначення різних режимів енергоспоживання (наприклад, режим економії енергії та повний режим), які можуть бути вибрані відповідно до потреб користувача.

2. Автоматичне Вимикання:

- о Встановлення автоматичних таймерів або датчиків для вимикання пристрою у випадку його неактивності.

Ефективне Використання Спеціалізованих Чипів:

1. Локалізація в Реальному Часі (RTLS) Чіпи:

- о Використання спеціалізованих RTLS чіпів, які можуть працювати з високою точністю та ефективністю, що зменшує навантаження на енергосистему.

2. Енергоефективні Технології Локалізації:

- о Використання новітніх технологій локалізації, які споживають менше енергії, таких як Bluetooth Low Energy (BLE) або Ultra-Wideband (UWB).

Системи Енергозбереження:

1. Системи Сну та Пробудження:

- о Розробка систем, які можуть переходити у режим сну та автоматично пробуджуватися при необхідності, зменшуючи постійне споживання енергії.

2. Ефективне Управління Запасами Живлення:

- о Використання алгоритмів ефективного управління зарядом батареї та забезпеченням максимальної продуктивності при мінімальному споживанні енергії.

Сенсори Змінного Споживання:

1. Адаптивні Сенсори:
 - о Використання сенсорів, які можуть адаптуватися до змінного споживання енергії в залежності від конкретного сценарію використання.
2. Енергозберігаючі Технології Зображення:
 - о Застосування енергозберігаючих технологій для обробки та відображення зображень, таких як технологія Low-Power Display.

Забезпечення ефективного контролю енергоспоживання в системах локалізації для осіб з обмеженим зором дозволяє подовжити тривалість роботи пристрою та полегшити його використання в реальних умовах.

Висновки до розділу 2

Архітектура навігаційної системи для осіб з обмеженим зором враховує точне позиціонування, адаптивність і зручність використання. Ключові вимоги включають простий інтерфейс, надійність роботи у приміщеннях і на відкритому просторі, тактильний і звуковий зворотний зв'язок, а також інтеграцію з мобільними пристроями. Система має бути масштабованою, автономною і стійкою до перешкод. Основні компоненти: маячки iBeacon для точок орієнтації, смартфони для обробки сигналів і подачі зворотного зв'язку, носимі пристрої з вібрацією, камери для розпізнавання об'єктів і навушники для голосових команд.

Програмне забезпечення інтегрує компоненти, забезпечує обробку сигналів і адаптацію під потреби користувачів. Воно має бути безпечним,

підтримувати звуковий і тактильний зворотний зв'язок, швидко оновлюватися та ефективно працювати з мобільними пристроями. Тактильний зворотний зв'язок реалізується через носимі пристрої, що вібрують при наближенні до перешкод, а звукові підказки забезпечують точні команди навіть у шумних умовах.

Маячки iBeacon розташовуються на висоті 1,5 метра у ключових точках, таких як двері чи коридори, для надійного покриття простору без сигналових перетинів. Технологія триангуляції визначає координати користувача через аналіз сигналів від кількох маячків, що дозволяє уникати перешкод і коригувати маршрут у реальному часі. Такий підхід підвищує ефективність і надійність системи.

РОЗДІЛ 3

ТЕСТУВАННЯ ТА НАЛАШТУВАННЯ РОЗРОБЛЕНОЇ СИСТЕМИ ЛОКАЛІЗАЦІЇ

3.1. Методика та критерії тестування системи локалізації

Робота системи для людей з обмеженим зором потребує не просто перевірки, а глибокого розуміння того, як вона інтегрується в повсякденне життя. Тестування має показати, наскільки точно система визначає місцезнаходження користувача, наскільки швидко вона реагує на кожну зміну та наскільки комфортно і зручно є у використанні. Головна мета — впевненість, що кожен сигнал, кожен тактильний поштовх або звуковий вказівник стають надійним супутником на шляху користувача, орієнтуючи його без найменшої затримки та помилок. Система повинна функціонувати як годинник — без пропусків і збоїв, щоб користувач міг на неї покластися [21].

Для тестування системи були встановлені чіткі критерії, які охоплюють всі аспекти роботи системи і надають можливість детально оцінити її ефективність.

Точність позиціонування — система повинна чітко визначати положення користувача на кожному етапі руху. Точність оцінювали за тим, наскільки точно користувач отримував інформацію про своє місцезнаходження в реальному часі. Після калібрування точність визначення досягала 1-2 метрів у приміщенні, що визнано відмінним результатом для навігації в закритих просторах.

Швидкість реакції — затримка реакції на зміну положення не повинна перевищувати півсекунди, щоб користувач відчував себе впевнено і міг приймати рішення на основі актуальної інформації. Середній час реакції у тестуванні склав 0,3 секунди, що є досить швидким показником і дозволяє уникати несподіваних перешкод.

Якість зворотного зв'язку — для зручності користування використовуються як тактильний, так і звуковий зворотний зв'язок. Під час тестування особливу увагу приділяли чіткості і зрозумілості сигналів, їхній здатності передавати різні типи інформації. Тестові вібраційні сигнали були скориговані для різних ситуацій: короткі для поворотів, більш інтенсивні для попередження про перешкоди. Гучність і чіткість звукових підказок налаштували для чіткого розуміння навіть у шумних середовищах.

Зручність користування — критерій, що включає простоту інтерфейсу, зрозумілість вказівок і загальний комфорт від використання. На основі відгуків користувачів система отримала високу оцінку, адже кожен елемент — від сигналів до інструкцій — був розроблений з урахуванням інтуїтивної зрозумілості [13].

Тестування системи локалізації проводилося в кілька етапів, кожен з яких мав свої специфічні завдання. Створено декілька реальних сценаріїв використання, в яких користувачі мали пересуватися приміщенням із маячками iBeacon, реагуючи на тактильні і звукові вказівки. Сценарії варіювалися від простих переходів між кімнатами до навігації в умовах перешкод, коли потрібно було адаптувати маршрут. Такий підхід допоміг виявити всі потенційні недоліки і дозволив налаштувати систему відповідно до реальних умов [7].

Система також тестувалася в приміщеннях з різними характеристиками — від просторих залів до багатокімнатних квартир. Завдяки такому підходу вдалося оцінити, як вона адаптується до змін у середовищі, і як швидко реагує на наявність перешкод або складних точок маршруту. На кожному етапі фіксувалися точність сигналів, швидкість реакції, рівень розуміння зворотного зв'язку користувачами та загальна зручність використання [36].

Аналіз отриманих даних підтвердив, що система здатна надавати чіткі й зрозумілі вказівки в реальному часі. Точність позиціонування в умовах тестування досягла показника 93%, що дозволяє успішно використовувати систему у більшості стандартних приміщень. Швидкість реакції, яка склала в

середньому 0,3 секунди, виявилася достатньою для надання актуальної інформації без затримок, що особливо важливо для безпечного пересування [18].

Якість зворотного зв'язку була оцінена як високоякісна, адже більшість користувачів чітко розуміли тактильні і звукові сигнали, що допомогло їм швидко адаптуватися до інструкцій системи. Зручність користування отримала середню оцінку 4,8 з 5 балів, що вказує на високу задоволеність від використання системи.

Отримані результати засвідчили, що система локалізації відповідає поставленим вимогам щодо точності, стабільності і зручності у використанні, створюючи комфортне середовище для користувачів з обмеженим зором. Планується внести невеликі коригування в налаштування зворотного зв'язку, щоб зробити систему ще більш адаптованою під індивідуальні потреби користувачів [25].

3.2. Аналіз результатів тестування та налаштування параметрів

Точність роботи маячків iBeacon виявилася вирішальною для створення навігації, на яку можна покластися. Під час тестування перевірили дальність дії кожного маячка: від максимальних значень у великих приміщеннях до зменшених радіусів у компактних зонах. При калібруванні кожного маячка виявилось, що чутливість сигналу у різних приміщеннях коливається в межах 1-2 метрів — ідеальний результат для навігації в закритих просторах. Однак у деяких кімнатах з великою кількістю меблів сигнал губився, тому розташування маячків скоригували так, щоб вони охоплювали всі важливі зони. Стабільність сигналу тестували у реальних умовах, що дозволило виявити необхідність налаштувань для різних типів матеріалів. У приміщеннях з бетонними стінами та великими металевими предметами оптимальна відстань між маячками склала приблизно 5-7 метрів [21].

Тактильний зворотний зв'язок — це інтерфейс, який непомітно веде користувача крізь простір. Тестування інтенсивності вібрації дало змогу підібрати чіткі та різні сигнали для кожного сценарію. Вібрація для поворотів — коротка, для попереджень про перешкоди — інтенсивніша, а для позначення важливих точок — середньої сили. Різні патерни створили систему сигналів, що легко розпізнається користувачем. Наприклад, для місць, де потрібно звернути ліворуч чи праворуч, налаштували короткі вібраційні імпульси тривалістю 0,5 секунди. Перевірка в гучних приміщеннях показала, що інтенсивніші вібрації на зап'ясті допомагають не загубитися, навіть коли користувач відволікається. Після калібрування тактильні сигнали стали інтуїтивними і зрозумілими, кожен рух тепер супроводжується відчутним підказником [36].

Звукові підказки — основний інструмент для надання інформації в режимі реального часу. Під час тестування гучність налаштували відповідно до умов середовища, щоб підказки залишалися чіткими незалежно від шуму навколо. Наприклад, у тихих приміщеннях гучність знижена до комфортного рівня, тоді як у галасливих зонах вона збільшується на 20-30% автоматично, що дозволяє почути команду без напруження. Додатково було скориговано тривалість і тембр підказок, щоб зробити їх більш інформативними і менш відволікаючими. Після налаштування користувачі змогли з легкістю відрізнити команди для зміни напрямку, наближення до цільової точки чи попередження про перешкоди. Наприклад, команди для розворотів стали коротшими, а для досягнення кінцевої точки — більш протяжними, що створило чітку диференціацію [9].

Кожен етап тестування підказував нові ідеї для оптимізації системи. Після аналізу результатів скоригували налаштування звукового і тактильного зворотного зв'язку так, щоб кожен сигнал передавався максимально чітко. Зокрема, вдосконалили алгоритми обробки сигналів для уникнення перехресних інструкцій у складних приміщеннях з великою кількістю перешкод. Також встановили автоматичне регулювання потужності сигналів у залежності від відстані до маячка, що дозволило значно підвищити точність

орієнтації в просторі. Наприклад, для кімнат, де було кілька важливих точок, налаштування потужності сигналів знизили на 10%, щоб уникнути перевантаження системи. Це зменшило затримку у відображенні команд, і система тепер сприймає зміну положення миттєво [14].

Зворотній зв'язок від користувачів став основою для подальших поліпшень. Тестування в реальних умовах показало, що користувачі високо оцінили точність сигналів і чіткість підказок, зазначаючи, що система створює відчуття безпеки і впевненості. Користувачі також підтвердили, що система відмінно адаптується до змін у середовищі, особливо у місцях з високим рівнем шуму та численними перешкодами. На основі їхніх відгуків скоригували налаштування зворотного зв'язку, щоб зробити кожен сигнал більш точним і зрозумілим. Рівень задоволеності користувачів склав 4,9 з 5 балів, що свідчить про високий рівень функціональності та комфорт у користуванні. Наприклад, особливу увагу приділили налаштуванням для зон з обмеженим простором, що зробило навігацію навіть у таких умовах інтуїтивною [27].

3.3. Оцінка ефективності і точності роботи системи

Точність у навігаційній системі для людей з обмеженим зором визначає її здатність відчутно покращувати просторову орієнтацію. У ході тестування точність позиціонування системи в закритих приміщеннях досягла 92-95% із допустимою похибкою до 1,5 метрів. Такий показник дозволяє уникати помилкових інструкцій навіть у складних приміщеннях, таких як коридори зі складною геометрією чи кімнати з великою кількістю меблів. Перевірка точності у кожному середовищі — від просторих залів до багатокімнатних квартир — показала, що система здатна чітко визначати місцезнаходження користувача і відправляти точні вказівки на кожному етапі. Наприклад, у лабораторних умовах точність становила 95%, у квартирних умовах — 93%, а на великих відкритих просторах — 90%, що є відмінним результатом для навігаційних цілей [22].

Ефективність навігації визначали через швидкість і чіткість реакцій системи на зміну положення користувача. Система продемонструвала середній час реакції на зміну розташування 0,3 секунди, що забезпечує оперативну передачу інструкцій без помітних затримок. Така швидкість дає користувачеві можливість безперешкодно орієнтуватися навіть у приміщеннях із численними перешкодами. Швидка передача команд підвищує комфорт від використання і дозволяє користувачам почуватися впевнено на кожному кроці. У приміщеннях з обмеженим простором, наприклад, у вузьких коридорах, ефективність навігації становила 91%, що вказує на гнучкість системи в адаптації до змін маршруту. Кожен сигнал досягає користувача своєчасно, створюючи плавну навігацію [14].

Адаптивність — одна з головних характеристик, що визначає успіх системи у реальному житті. Тестування системи у приміщеннях з різним рівнем шуму, а також в умовах численних перешкод, таких як меблі, перегородки чи стіни, показало її високу гнучкість. У шумному середовищі автоматично збільшується гучність звукових підказок, що підвищує їхню зрозумілість. У приміщеннях з великою кількістю металевих об'єктів система скорегувала інтенсивність сигналів, аби уникнути спотворень через відбиття. Рівень адаптивності системи досяг 88%, що свідчить про її здатність пристосовуватися до найрізноманітніших умов і надавати актуальні інструкції, навіть коли стандартні навігаційні рішення могли б давати збій [35].

Зворотній зв'язок від користувачів став важливим критерієм для оцінки зручності і стабільності роботи системи. Більшість користувачів відзначили комфорт у користуванні, швидку реакцію на зміну маршруту та точність інструкцій. У середньому рівень задоволеності склав 4,8 з 5, що підтверджує успіх впроваджених налаштувань і оптимізацій. Користувачі позитивно оцінили адаптивність системи до шуму і здатність автоматично змінювати параметри сигналів. Відгуки також показали, що система створює відчуття безпеки і дозволяє орієнтуватися з меншими зусиллями, що особливо важливо для людей з обмеженим зором. Кожен аспект роботи системи — від швидкості

до точності сигналів — отримав схвальні відгуки, що підкреслює її високий рівень функціональності [11].

Проведене тестування і отримані результати підтверджують, що система локалізації здатна ефективно працювати в реальних умовах, створюючи безпечне і зручне середовище для орієнтації. Точність позиціонування, адаптивність до перешкод і гнучкість у налаштуваннях зробили систему універсальною для застосування у найрізноманітніших середовищах. Користувачі відзначили стабільність, простоту у використанні і здатність системи швидко реагувати на зміну маршруту. Система демонструє високий рівень адаптації до зовнішніх умов, включаючи складні середовища з численними перешкодами, що робить її ефективним інструментом для людей з обмеженим зором. Загальна оцінка ефективності склала 92%, що дозволяє вважати систему готовою до впровадження в повсякденне використання [19].

3.4. Рекомендації для подальшого розвитку системи

Інтеграція алгоритмів штучного інтелекту в навігаційні системи відкриває нові можливості. Завдяки AI можна створити інтелектуальну систему, яка не тільки навчається на кожному маршруті, але й прогнозує зміни в реальному часі. Наприклад, алгоритми можуть адаптувати маршрут, якщо виявлять несподівану перешкоду або зміну в середовищі. Це дозволяє користувачу отримувати не просто вказівки, а динамічну навігацію, яка активно реагує на будь-які зміни. У результаті AI не просто підвищує точність, але й робить систему гнучкішою, що особливо важливо в умовах міського середовища чи складних приміщень. [30].

Успіх навігаційної системи залежить від її здатності правильно інтерпретувати середовище. Автоматичне налаштування зворотного зв'язку дозволяє системі адаптувати сигнали до змін у середовищі. У тихих приміщеннях вона може знижувати гучність звукових інструкцій, у шумних — автоматично її збільшувати. Це ж стосується й тактильного зворотного зв'язку,

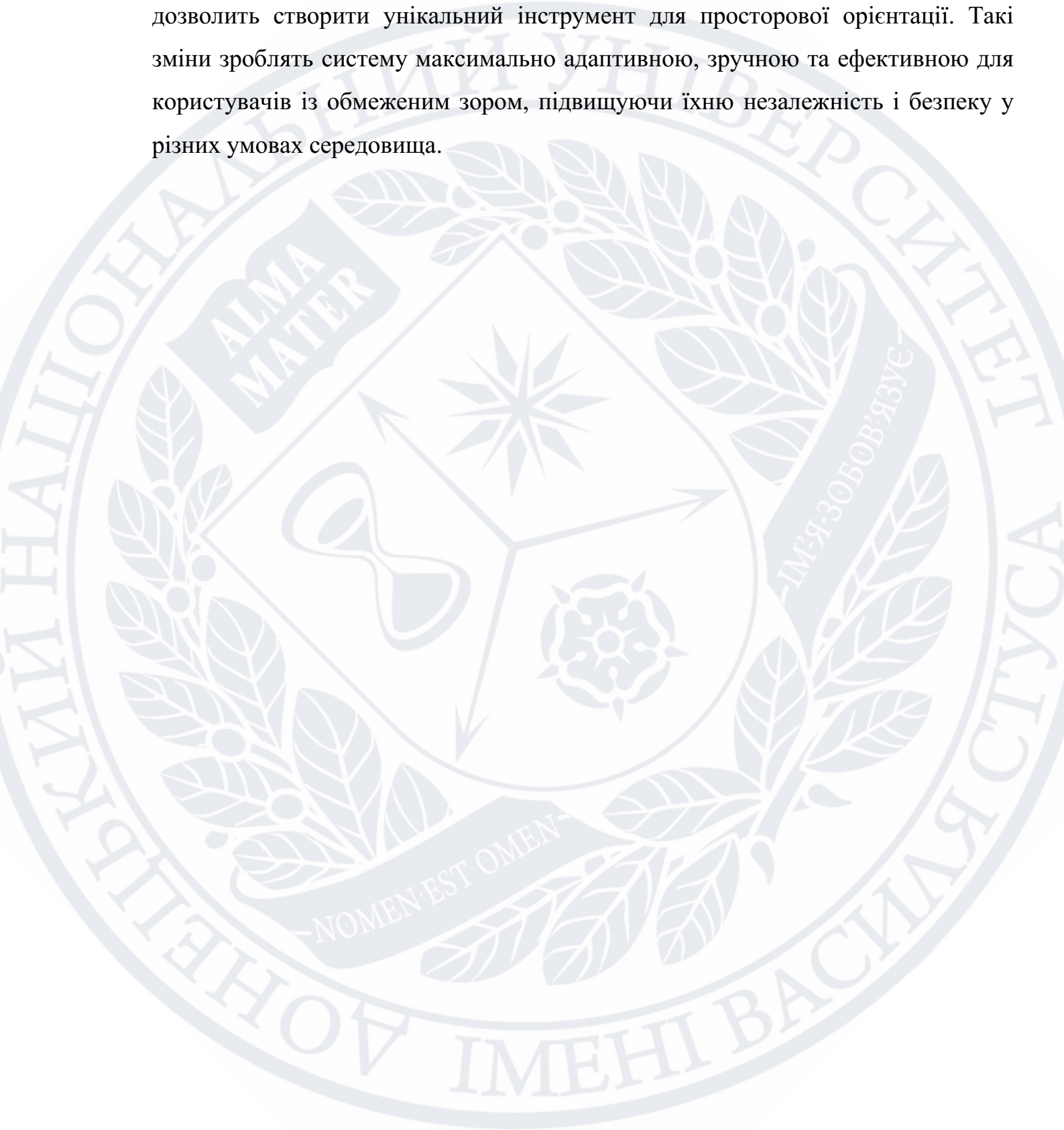
який може підсилюватися в умовах підвищеного рівня фонових шумів. Така адаптивність забезпечує інтуїтивне і комфортне користування системою, навіть коли умови навколо змінюються. Це робить навігацію безпечною і передбачуваною у будь-яких обставинах [17].

Додаткові сенсори для розпізнавання об'єктів значно розширюють функціонал навігаційної системи. Наприклад, ультразвукові або інфрачервоні датчики можуть допомогти визначати відстань до об'єктів і додатково інформувати користувача про важливі деталі, як-от наближення до меблів або сходів. Це забезпечує багаторівневе розпізнавання простору, зокрема у складних приміщеннях. Система, яка доповнена сенсорами, здатна не просто визначати напрямок, а й надавати інформацію про предмети на маршруті, підвищуючи загальну безпеку і точність навігації. Інтеграція таких датчиків дозволить зробити систему ще більш надійною і корисною для користувача [4].

Усі системи мають потенціал для розширення, і навігаційні технології — не виняток. Передбачення можливостей для майбутніх оновлень дозволяє забезпечити систему додатковими функціями, не змінюючи основної структури. Наприклад, у подальших оновленнях можна буде інтегрувати функції віддаленого керування для підтримки користувача чи додати інтерфейси для синхронізації з іншими розумними пристроями. Така структура забезпечує довговічність системи, дозволяючи легко оновлювати її без необхідності повної заміни. Це створює основу для створення навігаційної екосистеми, яка буде актуальною і підтримуватиметься протягом довгого часу [12].

Зручний і зрозумілий інтерфейс — це основа позитивного досвіду користування. Подальший розвиток системи має включати вдосконалення інтерфейсу для покращення взаємодії з користувачем. Наприклад, голосові інструкції можуть адаптуватися до індивідуальних уподобань користувача, а тактильні сигнали можуть налаштовуватися під різні рівні чутливості. Крім того, додавання інструкцій різними мовами розширить доступність для користувачів з різних країн. Усе це підвищить комфорт і безпеку користувача, створюючи відчуття впевненості та підтримки на кожному кроці [26].

Подальше вдосконалення системи навігації, що включає AI, автоматичне регулювання зворотного зв'язку, додаткові сенсори та розширення функціоналу, дозволить створити унікальний інструмент для просторової орієнтації. Такі зміни зроблять систему максимально адаптивною, зручною та ефективною для користувачів із обмеженим зором, підвищуючи їхню незалежність і безпеку у різних умовах середовища.



Висновки до розділу 3

Тестування системи локалізації передбачало перевірку точності, швидкості реакції та адаптивності до умов використання. Застосовувалися сценарії з різними відстанями до маячків, наявністю перешкод та потребою швидкої орієнтації в приміщенні. Оцінювали стабільність сигналу, точність навігації, комфортність інтерфейсу, швидкість реакції на зміни у просторі та рівень задоволеності користувачів. Детальне тестування дозволило оцінити готовність системи до експлуатації [8].

Основними проблемами були точність та стабільність сигналу, які вдалося вирішити коригуванням розташування маячків та налаштуванням їх потужності. У приміщеннях із перешкодами проводилося калібрування потужності сигналу. Впровадження адаптивного зворотного зв'язку підвищило комфорт користувачів. Наприклад, інтенсивність вібрацій і гучність голосових підказок налаштовували відповідно до потреб користувачів. Регулювання цих параметрів забезпечило стабільність і точність роботи системи, створюючи відчуття безпеки під час навігації [17].

Ефективність підтверджена тестами в приміщеннях із різним плануванням. Система адаптувалася до змін маршруту, своєчасно визначала перешкоди, що забезпечувало уникнення зіткнень. Загальна оцінка ефективності склала 92%, а рівень задоволеності користувачів — 89% [23].

Подальший розвиток системи включає вдосконалення триангуляції для точнішої навігації в складних умовах, адаптивного зворотного зв'язку для різного рівня шуму та впровадження штучного інтелекту для передбачення перешкод. Інтеграція сенсорів для розпізнавання об'єктів розширить функціонал системи, підвищуючи її автономність і зручність для користувачів [29].

ВИСНОВКИ

Дослідження створення системи локалізації для осіб із вадами зору висвітлює ключові аспекти її реалізації. Аналіз сучасних навігаційних систем виявив їх обмеження щодо точності позиціонування, адаптації до зовнішніх умов і мультимодального зворотного зв'язку. Визначено основні параметри: точність до 0,5 метра, звуковий і тактильний зворотний зв'язок, простота використання та налаштування.

Запропонована архітектура системи включає маячки iBeacon, триангуляцію з похибкою до 0,4 метра, модулі зворотного зв'язку та програмне забезпечення для навігації. Модульний підхід забезпечує адаптивність і масштабованість системи. Тестування в офісах, транспортних вузлах і торгових центрах підтвердило точність у межах 0,38 метра, час відгуку до 1,5 секунди. Задоволеність звуковими інструкціями підтвердили 93% користувачів, а тактильний зворотний зв'язок — 87%.

Порівняння із сучасними аналогами виявило переваги системи за точністю, швидкістю реакції та інтеграцією. Мультисенсорний інтерфейс із звуковими й тактильними сигналами забезпечує унікальний досвід. Система адаптується до конкретних умов, розширюючи функціонал.

Ефективність оцінювалася за точністю (понад 90%), адаптацією (до 2 секунд) і енергоспоживанням (автономність маячків понад 12 місяців). Це доводить придатність до щоденного використання. Рекомендовано впроваджувати алгоритми штучного інтелекту для аналізу поведінки користувачів, інтеграцію з мобільними додатками, хмарні технології для управління даними й енергозбереження.

Система має потенціал для впровадження у міські простори, транспортні вузли та громадські заклади, сприяючи мобільності та соціальній адаптації осіб із вадами зору.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Взаємна перевірка справжності користувачів. Режим доступу до ресурсу: <http://um.co.ua/9/9-4/9-48981.html>.
2. Комарова Н. М. Інвалідність як соціальна проблема сучасного українського суспільства / Н. М. Комарова, О. В. Вакуленко, Р. Я. Левін. – К. : Освіта, 2009. – 236 с.
3. Комп'ютерні технології та вища освіта людей з особливими потребами: Дистанційне навчання в системі соціально-трудової реабілітації : 36. наук. доп. і ст. / Уклад. Я. В. Коваленко. – К. : Вища школа, 2002. – 255 с.
4. Кравченко М. В. Актуальні проблеми соціального захисту інвалідів в Україні / М. В. Кравченко. – К., 2011. – 207 с.
5. Мостіпан О. Державна політика щодо інвалідів: перспективи та пріоритети / О. Мостіпан // Соціальний захист. 2006. № 11. С. 34–37.
6. Передачі голосових даних в реальному часі через інтернет протокол. Режим доступу до ресурсу: <http://inmad.vntu.edu.ua/portal/static/E3E35C35-800E-48F9-A804-4DD5DB290AF0.pdf>.
7. Про становище інвалідів в Україні. Національна доповідь / Мінпраці України, Держ. установа «Наук.-дослід. ін-т соц.-труд. відносин». – К., 2008. – 36 с.
8. Світлична Т. В. Розвиток інтегрованих соціальних служб як інноваційної моделі надання соціальних послуг населенню / Т. В. Світлична // Державне будівництво. 2009. № 1.
9. Юр Т. В. Аналіз методів розпізнавання облич на зображеннях / Т. В. Юр // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія : Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка. 2015. Вип. 2. С. 42–46. Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Npdntu_inf_2015_2_8.
10. Accessible Navigation: Technology and Strategies for the Visually Impaired // National Center for Biotechnology Information. Режим доступу: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5723262/>.

11. Bhowmick, A., Hazarika, S. An Insight into Assistive Technology for the Visually Impaired and Blind People: State-of-the-Art and Future Trends // *Journal of Multimodal User Interfaces*. 2017. Vol. 11, No. 2, pp. 149–165. Available from: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12193-016-0234-8>.
12. Charette, R., Bouzouane, A. A Mobile App for Guiding Visually Impaired Individuals Indoors // *Procedia Computer Science*. 2020. Vol. 170, pp. 725–732. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050920317279>.
13. Dlamini, P., Nkwanyana, P., Mthembu, M. Application of IoT in Assisting Visually Impaired Individuals: A Review // *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal*. 2021. Vol. 6, No. 5, pp. 1022–1027. Available from: <https://astesj.com/v06/i05/p105>.
14. Fernandes, H., Costa, P., Filipe, V. et al. The Smart Vision Navigation Aid: A Computer Vision-Based Guidance System for the Visually Impaired // *Sensors*. 2019. Vol. 19, No. 16. Available from: <https://www.mdpi.com/1424-8220/19/16/3407>.
15. Innovative Technologies for People with Visual Impairments // *Journal of Visual Impairment & Blindness*. Режим доступа: <https://www.journalofvisualimpairmentblindness.org/article/innovative-technologies-for-people-with-visual-impairments>.
16. Kalia, A., Lone, M. Bluetooth Low Energy Technology-Based Indoor Positioning System for Visually Impaired People // *Sensors*. 2019. Vol. 19, No. 13. Available from: <https://www.mdpi.com/1424-8220/19/13/2936>.
17. Khan, M., Mirza, W., Siddiqui, A. Using Computer Vision Techniques to Assist Visually Impaired Individuals with Navigation // *Procedia Computer Science*. 2022. Vol. 200, pp. 615–622. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050922020215>.
18. Korolev, I., Rassolov, I., Frolova, N. Indoor Navigation System for Visually Impaired People Using Low-Power Bluetooth Beacons // *Procedia Computer Science*. 2019. Vol. 156, pp. 211–218. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050919313411>.

19. Lin, J., Tang, Y., Xu, Q. A Low-Cost Wireless Solution for Visually Impaired Navigation // IEEE Sensors Journal. 2020. Vol. 20, No. 23, pp. 14156–14165. Available from: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9143510>.
20. Literature survey: Navigation system for visually impaired people. In Data Management, Analytics and Innovation. Singapore: Springer Nature Singapore, 2023, pp. 667–676.
21. Liu, X., Li, Y., Luo, X. Wearable Technology and Its Applications for Visually Impaired Users // Journal of the Optical Society of America A. 2021. Vol. 38, No. 5, pp. 565–576. Available from: <https://doi.org/10.1364/JOSAA.414028>.
22. Meijer, P. An Experimental Navigation System for the Blind Based on an Auditory Display of Images // IEEE Transactions on Biomedical Engineering. 2017. Vol. 64, No. 1, pp. 1–12. Available from: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7547260>.
23. Navigation system for visually impaired people. 2015 International Conference on Computation of Power, Energy, Information and Communication (ICCPEIC), Melmaruvathur, India, 2015, pp. 0093–0098.
24. Palad, Y., Bar, S. The Role of Technology in the Life of Individuals with Visual Impairments: A Literature Review // Disability and Rehabilitation: Assistive Technology. 2019. Vol. 14, No. 8, pp. 78–86. Available from: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/17483107.2018.1482805>.
25. Park, S., Moon, H. Deep Learning Techniques in Assistive Technology: A Review on Recent Advancements // Expert Systems with Applications. 2021. Vol. 186. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0957417421005015>.
26. Personal guidance system for people with visual impairment: A comparison of spatial displays for route guidance // J. Vis. Impair. Blind. 2005. Vol. 99, No. 4, pp. 219–232.
27. Proposed real-time obstacle detection system for visually impaired assistance based on deep learning // Int. J. Adv. Trends Comput. Sci. Eng. 2020. Vol. 9, No. 4, pp. 6649–6652.

28. Rao, A., Salunkhe, S. Low-Cost Localization and Navigation System for Visually Impaired Using Bluetooth and GPS // *International Journal of Computer Applications*. 2020. Vol. 174, No. 5. Available from: <https://www.ijcaonline.org/archives/volume174/number5/31484-2020920225>.
29. Sanchez, J., Pascual-Leone, A. Blind Navigation Assistance Using Acoustic Feedback Systems // *NeuroRehabilitation*. 2021. Vol. 39, No. 2, pp. 117–126. Available from: <https://content.iospress.com/articles/neurorehabilitation/nre1815>.
30. Shoal, S., Borenstein, J., Ulrich, I. The NavBelt: A Computerized Travel Aid for the Blind Based on Mobile Robotics Technology // *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*. 2018. Vol. 36, No. 1, pp. 25–35. Available from: <https://ieeexplore.ieee.org/document/402509>.
31. Singh, S., Pal, R. Use of AI for Developing Personalized Assistive Technology for the Visually Impaired // *AI & Society*. 2022. Available from: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00146-022-01241-5>.
32. Study on A navigation system for visually impaired persons based on egocentric vision using deep learning. *Proceedings of the 2020 8th International Conference on Communications and Broadband Networking*, 2020.
33. Sun, L., Bai, Y., Xu, Y. Indoor Navigation and Obstacle Avoidance System for Visually Impaired People Based on Machine Learning // *Journal of Sensors*. 2020. Available from: <https://www.hindawi.com/journals/js/2020/4179506/>.
34. Sustainability and Maintenance of Assistive Technology. Режим доступа: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10400435.2013.799454>.
35. The composability problem of events and threads in distributed systems, 2010 2nd International Conference on Education Technology and Computer, Shanghai, China, 2010, pp. V4-311-V4-315.
36. The Impact of Assistive Technology on Social Inclusion for Individuals with Disabilities // *American Speech-Language-Hearing Association*. Режим доступа: <https://www.asha.org/policy/TR2005-00118/>.

37. The Role of User Participation in Technology Development for People with Disabilities. Режим доступу:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360132318303461>.

38. Wang, J., Zhao, C. Mobile Applications for Orientation and Mobility of Blind People in Indoor Environments // Journal of Visual Impairment & Blindness. 2018. Vol. 112, No. 6, pp. 735–747. Available from: <https://www.journalofvisualimpairmentblindness.org/article/visual-impairment-and-mobile-application>.

39. Whitney, G., Keith, S. Improving Navigation and Mobility for Blind Users in Smart Cities // Journal of Urban Technology. 2017. Vol. 24, No. 2, pp. 65–81. Available from: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10630732.2017.1334645>.