

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет комп'ютерної інженерії та управління
(повна назва)

Кафедра електронних обчислювальних машин
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
Пояснювальна записка

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Дослідження системи комп'ютерного зору для
реалізації в реабілітаційній ортопедії

(тема)

Виконав:

студент II курсу, групи КСМм-23-1
Коробко В.Ю.
(прізвище, ініціали)

Спеціальність 123 «Комп'ютерна інженерія»
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Комп'ютерні системи та мережі
(повна назва освітньої програми)

Керівник: доц. Барковська О.Ю.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри ЕОМ

(підпис)

Коваленко А.А.

(прізвище, ініціали)

2025 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет _____ комп'ютерної інженерії та управління _____

Кафедра _____ електронних обчислювальних машин _____

Рівень вищої освіти _____ другий (магістерський) _____

Спеціальність _____ 123 «Комп'ютерна інженерія» _____
(код і повна назва)

Тип програми _____ освітньо-професійна _____
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма _____ Комп'ютерні системи та мережі _____
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____
(підпис)

“ _____ ” _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студенту _____ Коробку Володимиру Юрійовичу _____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Дослідження системи комп'ютерного зору для реалізації в реабілітаційній ортопедії

затверджена наказом по університету від “ 22 ” листопада 2024 р. № 1237 Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії _____ 20 січня 2025 р.

3. Вхідні дані до роботи Відеофайли тривалістю до 6 секунд переміщення здорової людини та пацієнта з відхиленням опорно-рухового апарату.

Програмне забезпечення для отримання даних з акселерометрів розробки WitMotion та програмне забезпечення власної розробки для обробки відеофайлів та сформованих з акселерометрів у форматі csv.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати у роботі _____

Огляд маркерних методів захоплення руху антропометричних об'єктів.

Огляд безмаркерних методів захоплення руху антропометричних об'єктів.

Оцінка ефективності існуючих систем

Розробка програмного забезпечення для захоплення та аналізу руху з використанням готових моделей розпізнавання.

Проведення експериментів для підвищення ефективності визначення відхилень постави пацієнта від норми з використанням акселерометрів.

Оцінка результатів експериментів.

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (слайдів) 16 слайдів

6. Консультанти розділів роботи (заповнюється за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1)

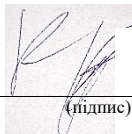
Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Огляд маркерних та безмаркерних методів захоплення руху	26.11.24-30.11.24	
2	Вибір та обґрунтування методики дослідження	02.12.24-05.12.24	
3	Вибір інструментальних засобів	06.12.24-10.12.24	
4	Оцінка ефективності існуючих систем	11.12.24-21.12.24	
5	Розробка контекстно-залежної моделі захоплення руху. Проведення експериментів	23.12.24-03.01.25	
6	Оформлення матеріалів кваліфікаційної роботи	04.01.25-07.01.25	
7	Подання кваліфікаційної роботи керівникові та її попередній захист	08.01.25-11.01.25	
8	Подання кваліфікаційної роботи на рецензування	13.01.25-17.01.25	

Дата видачі завдання 25 листопада 2024 р.

Студент


(підпис)

Керівник роботи


(підпис)

доц. Барковська О.Ю.

(посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи: 84 с., 19 рис., 18 табл., 2 дод., 15 джерел.

СИСТЕМА, ЗАХОПЛЕННЯ РУХУ, МАРКЕРНІ МЕТОДИ, БЕЗМАРКЕРНІ МЕТОДИ, РЕАБІЛІТАЦІЯ, ПОСТАВА.

Метою кваліфікаційної роботи є дослідження методів комп'ютерного зору та їхньої інтеграції з акселерометричними технологіями для покращення аналізу рухів пацієнтів у реабілітаційній ортопедії.

У ході виконання кваліфікаційної роботи був проведений ґрунтовний аналіз безмаркерних і акселерометричних методів. Оцінено їхні сильні та слабкі сторони, а також можливість використання в умовах реабілітаційних центрів. Зокрема, розглянуто вплив зовнішніх факторів на точність безмаркерного методу та визначено переваги акселерометрів у складних умовах.

Також було вдосконалено алгоритми обробки даних, зокрема через впровадження методів синхронізації даних акселерометрів і відеозаписів. Це дозволило зменшити похибку комбінованого методу до 5.05% порівняно з окремим використанням MediaPipe або акселерометрів.

Запропоновані вдосконалення мають значні переваги з точки зору точності, стійкості до зовнішніх умов і можливості моніторингу пацієнтів з порушеннями постави. Це дозволяє більш достовірно діагностувати та підвищує ефективність реабілітаційних програм. Цей розвиток пов'язаний із зростанням попиту на неінвазивні та високоточні методи діагностики та моніторингу пацієнтів, особливо в ортопедичній реабілітації у віддалених районах.

Наступними кроками в розвитку проекту є впровадження алгоритмів машинного навчання для автоматизації аналізу, адаптація системи для роботи в реальному часі та тестування в реальних клінічних умовах.

ABSTRACT

Master's thesis: 84 pages, 19 figures, 18 tables, 2 appendices, 15 sources.

MOTION CAPTURE SYSTEM, MARKER-BASED METHODS, MARKERLESS METHODS, REHABILITATION POSTURE.

The aim of this qualification work is to study computer vision methods and their integration with accelerometer technologies to improve the analysis of patient movements in rehabilitation orthopedics.

A thorough analysis of markerless and accelerometer-based methods was conducted during the study. Their strengths and weaknesses were evaluated, along with the possibility of their application in rehabilitation centers. Specifically, the impact of external factors on the accuracy of markerless methods was considered, and the advantages of accelerometers in challenging conditions were identified.

Additionally, data processing algorithms were improved, including the implementation of synchronization methods for accelerometer data and video recordings. This allowed the combined method's error rate to be reduced to 5.05%, compared to the separate use of MediaPipe or accelerometers.

The proposed improvements demonstrate significant advantages in terms of accuracy, resilience to external factors, and the ability to monitor patients with posture disorders. This ensures more reliable diagnostics and enhances the effectiveness of rehabilitation programs.

This development is relevant due to the growing demand for non-invasive and highly accurate diagnostic and monitoring methods, especially in orthopedic rehabilitation in remote areas. The next steps in the project's development include implementing machine learning algorithms for analysis automation, adapting the system for real-time operation, and testing the proposed approach in real clinical settings.

ЗМІСТ

ВСТУП	8
1 ОГЛЯД ПРОБЛЕМНОЇ ОБЛАСТІ	9
1.1 Визначення проблемної області	9
1.2 Актуальність дослідження	11
1.3 Завдання, які вирішують методи комп'ютерного зору в медицині.....	16
1.3.1 Завдання, які вирішують методи комп'ютерного зору в реабілітаційній ортопедії.....	17
1.4 Мета та задачі дослідження	19
2 ОБГРУНТУВАННЯ ТА МЕТОДОЛОГІЧНЕ ПІДГРУНТЯ ДОСЛІДЖЕННЯ	21
2.1 Огляд методів захоплення руху антропометричних об'єктів	21
2.1.1 Маркерні методи захоплення руху.....	24
2.1.2 Безмаркерні методи захоплення руху	28
2.1.3 Використання акселерометрів для аналізу ходи в реабілітаційній ортопедії.....	31
2.2 Аналіз фреймворків, бібліотек та апаратного забезпечення	32
2.3 Структура ключових точок тіла – COCO (Common Objects in Context) topology.....	37
3 МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ	39
3.1 Моделювання процесу дослідження	39
3.2 Ключові показники дослідження.....	41
3.3 Використані методи досліджень та програмне забезпечення.	43
3.4 Етапи проведення дослідження	47
4 РЕЗУЛЬТАТИ ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДІВ.....	50
4.1 Використання безмаркерного методу	50
4.2 Використання акселерометрів	57

4.3 Аналіз методу комбінованої обробки даних про стан суглобів пацієнтів	61
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	66
ДОДАТОК А Графічний матеріал кваліфікаційної роботи.....	68
ДОДАТОК Б Код програми для виявлення кіфозу	77
ДОДАТОК В Код програми для виявлення сколіозу.....	81

ВСТУП

Реабілітаційна ортопедія є важливим напрямом сучасної медицини, який займається лікуванням і відновленням функцій опорно-рухового апарату у пацієнтів, що зазнали травм чи мають вроджені або набуті ортопедичні проблеми. У сучасних умовах реабілітаційна ортопедія стикається з викликами, що пов'язані з точністю діагностики, моніторингом прогресу лікування та забезпеченням безпеки пацієнта під час проведення терапії. Одним із перспективних напрямів, що може сприяти вирішенню цих проблем, є впровадження систем комп'ютерного зору. Завдяки технологіям комп'ютерного зору можливо забезпечити точний моніторинг рухів пацієнта, аналіз його біомеханіки та надавати зворотний зв'язок у реальному часі, що є важливим для реабілітаційних процесів.

Завдяки використанню методів комп'ютерного зору, реабілітаційна ортопедія стає точнішою, ефективнішою і менш залежною від фізичної присутності лікаря. Такі методи дозволяють підвищити якість реабілітаційних послуг, забезпечити контроль за виконанням вправ і підтримувати зворотний зв'язок для досягнення оптимальних результатів у відновленні пацієнтів.

Методи комп'ютерного зору в реабілітаційній ортопедії займають важливе місце у процесах моніторингу, оцінки та корекції рухів пацієнтів. Вони дозволяють створювати системи, які автоматично аналізують біомеханіку рухів, дають зворотний зв'язок у реальному часі та допомагають оптимізувати індивідуальні програми реабілітації.

1 ОГЛЯД ПРОБЛЕМНОЇ ОБЛАСТІ

1.1 Визначення проблемної області

В Україні існує потреба в доступних та ефективних засобах реабілітації, особливо для ветеранів бойових дій та людей, які отримали травми внаслідок військових конфліктів або нещасних випадків [1]. Системи комп'ютерного зору дозволяють проводити моніторинг пацієнтів віддалено, що є важливим у умовах, коли багато людей не мають доступу до спеціалізованих реабілітаційних центрів. Тому розробка та впровадження таких технологій є не лише актуальним, але й вкрай затребуваним завданням для медичної галузі України.

Дослідження у сфері комп'ютерного зору для реабілітаційної ортопедії є надзвичайно актуальним і перспективним напрямом, особливо для України [2-4]. Впровадження таких систем може суттєво покращити якість реабілітації, знизити навантаження на лікарів і полегшити процес відновлення для пацієнтів.

Реабілітаційна ортопедія – це галузь медицини, що займається відновленням і покращенням функцій опорно-рухового апарату після травм, операцій або захворювань. Основна мета реабілітаційної ортопедії – допомогти пацієнту повернутися до нормального способу життя, зменшити обмеження в рухливості та покращити якість життя.

Аналізуючи таблицю 1.1, можна стверджувати, що реабілітаційна ортопедія спрямована на вирішення широкого спектра проблем опорно-рухового апарату. Кожен із цих станів потребує індивідуального підходу та застосування різних методів для досягнення оптимального результату.

Таблиця 1.1 – Основні стани, якими займається реабілітаційна ортопедія

Клас травми	Приклад травми	Напрямок реабілітації
1	2	3
Травми кісток і суглобів	Переломи, вивихи та розтягнення зв'язок	зміцнення м'язів, що підтримують суглоб.
Дегенеративні захворювання суглобів	Остеоартрит (артроз) Остеопороз	покращення рухливості та сили м'язів навколо ураженого суглоба, фізіотерапію та зниження навантаження на суглоб; поліпшення балансу та координації для зменшення ризику падінь і травм.
Травми хребта та порушення постави	Пошкодження міжхребцевих дисків (грижі, протрузії) Сколіоз, кіфоз, лордоз	зменшення больового синдрому, відновлення рухливості та зміцнення м'язів спини; корекції постави, зміцнення м'язового корсету та покращення координації.
Ампутації кінцівок	Реабілітація після ампутації Запобігання контрактурам	фізична терапія і психологічна підтримка; допомагає зберегти рухливість суглобів і підтримувати функціональність кінцівок.
Травми та захворювання м'язів і сухожиль	М'язові розриви та пошкодження сухожиль Тендиніт та бурсит	відновлення сили, гнучкості та витривалості м'язів, що зменшує ризик повторних травм; вправи на розтягнення та зміцнення уражених зон, а також фізіотерапевтичні процедури.
Постопераційна реабілітація	Реабілітація після ендопротезування Реабілітація після остеосинтезу	відновити функції кінцівки, адаптуватися до нових умов руху і повернутися до активного життя; збереження рухливості в зоні операції та зміцнення навколишніх м'язів.
Неврологічні стани з порушенням функції опорно-рухового апарату	Інсульти та паралічі ДЦП (дитячий церебральний параліч)	тренування координації, відновлення балансу і рухливості, зміцнення м'язів та навчання нових навичок руху; реабілітація дітей з ДЦП включає спеціальні вправи для покращення контролю рухів та розвитку моторики.

Основними методами реабілітаційної ортопедії є:

- фізична терапія;
- вправи на зміцнення та розтягнення м'язів;
- фізіотерапевтичні процедури;
- заняття з адаптації до нових умов життя (особливо після ампутацій);
- психологічна підтримка.

Реабілітаційна ортопедія також активно впроваджує новітні технології, такі як комп'ютерний зір, робототехніка, віртуальна реальність і системи зворотного зв'язку, які дозволяють підвищити точність і ефективність лікування, адаптуючи процес під індивідуальні потреби пацієнта.

Реабілітаційна ортопедія є важливим елементом сучасної медицини, який дозволяє людям із серйозними порушеннями опорно-рухової системи повернутися до активного способу життя. Розвиток цієї галузі та впровадження сучасних технологій мають великий потенціал для покращення якості життя пацієнтів і забезпечення їм необхідного рівня фізичної та соціальної адаптації.

1.2 Актуальність дослідження

На сьогоднішній день технології комп'ютерного зору активно розвиваються в усьому світі та знаходять своє застосування в багатьох галузях: від промислового виробництва до медицини та безпеки [5-6]. В Україні ця тема також набуває популярності, проте застосування комп'ютерного зору у сфері реабілітаційної ортопедії досі залишається недостатньо дослідженим і впровадженим.

Ідея розроблення технології медичної допомоги, які можуть бути застосовані на етапі реабілітації військовослужбовців та цивільних, які отримали хірургічні патології в результаті воєнних дій на території нашої країни, обґрунтовується прикрою статистикою, яка говорить що кількість ортопротезованих пацієнтів та тих, що потребують протезування та

подальшої фізичної та психологічної реабілітації, значно зросла за цей час (по допоміжні засоби реабілітації станом на червень 2023 року звернулися 58 852 людини, з них протезували 20737 осіб).

Вибухові травми, осколкові та вогнепальні поранення є причинами хірургічних патологій, які включають патології суглобів та кісток, що потребують оперативного втручання (наприклад, ендопротезування суглобів, ортопротезування уражених кінцівок) для того, щоб відновити функцію ураженої кінцівки та повернути людині рухову активність, покращити якість життя, психоемоційний стан, стати більш незалежним у повсякденному житті.

Обов'язковим етапом після таких операцій є реабілітація та адаптація до нової «кінцівки». Реабілітація є тривалим, безперервним, багатоетапним процесом.

Поширеним алгоритмом реабілітації є:

- первинний огляд та оцінка стану, ознайомлення з історією хвороби;
- узгодження стратегії лікування, прогнозу та очікувань клієнта;
- складання та впровадження індивідуального плану реабілітації (ІПР);
- моніторинг результатів та корекція ІПР за необхідності;
- після досягнення максимального результату – супровід та підтримка

в післяреабілітаційний період, який передбачає психологічну та фізичну адаптацію, повернення пацієнта до звичайного та якісного життя.

На сьогодні існує ряд рішень для реабілітації, орієнтованих на відновлення рухових функцій та покращення якості життя пацієнтів після ортопедичних та неврологічних травм. Приклади наведено у таблиці нижче (Таблиця 1.2).

В таблиці наведено лише деякі із існуючих систем, призначених для реабілітації людей із травмами кінцівок. Серед них є великі комплекси, призначені для проведення реабілітаційних процедур під наглядом спеціаліста у медичних закладах, а також є індивідуальні більш доступні системи, які травмовані пацієнти можуть використовувати вдома для реабілітації та моніторингу прогресу.

Таблиця 1.2 – Рішення для реабілітації, орієнтованих на відновлення рухових функцій та покращення якості життя пацієнтів після ортопедичних та неврологічних травм

Система реабілітації	Опис	Ціна	Країна виробник
1	2	3	4
<p>Ekso Bionics</p> 	екзоскелетні системи, які допомагають пацієнтам з проблемами руху відновлювати мобільність, використовуються для реабілітації після інсультів, травм спинного мозку або інших неврологічних станів.	від \$70,000 до \$150,000	США
<p>ReWalk</p> 	роботизовані екзоскелети, які допомагають людям з паралічем нижніх кінцівок відновити можливість ходити. Це рішення застосовується в реабілітаційних центрах для навчання пацієнтів основам мобільності	\$85,000 для персонального використання	Ізраїль
<p>Носома Lokomat</p> 	роботизована система для реабілітації ходи, що використовує екзоскелет і бігову доріжку для допомоги пацієнтам у відновленні природного патерну ходьби	від \$300,000 до \$500,000	Швейцарія
<p>AlterG Anti-Gravity Treadmill</p> 	бігова доріжка з технологією, що зменшує навантаження на суглоби, дозволяючи пацієнтам безболісно відновлювати ходьбу і біг після травм чи операцій	від \$35,000 до \$75,000	США
<p>Bioness L300 Go</p> 	система стимуляції нервово-м'язових імпульсів для підвищення функціональності нижніх кінцівок. Використовується для відновлення ходьби та рухів стопи. Підтримує пацієнтів у реабілітації після протезування, знижуючи ризик падінь.	від \$6,000 до \$8,000	США

Продовження таблиці 1.2

1	2	3	4
<p>C-Brace (Ottobock)</p> 	<p>мікропроцесорний ортез для нижніх кінцівок, який допомагає пацієнтам з обмеженою функцією ніг контролювати рухи в реальному часі. Допомагає покращити ходьбу і баланс у пацієнтів після протезування.</p>	<p>від \$75,000 до \$100,000</p>	<p>Німеччина</p>
<p>OptiTrack Motion Capture</p> 	<p>Фотограмметрична технологія, яка надає точну тривимірну інформацію про рухи пацієнта, допомагає реабілітологам визначити області, що потребують корекції. Використовується для налаштування протезів, аналізу ходи та контролю за прогресом реабілітації.</p>	<p>від \$20,000 до \$100,000 (залежно від кількості камер, типу сенсорів, програмного забезпечення)</p>	<p>США</p>
<p>Zebris FDM-T</p> 	<p>Баропододинамометрична платформа з інтегрованими датчиками для вимірювання тиску і аналізу ходи. Вона дозволяє реабілітологам отримати докладну картину навантажень, що діють на стопу, і відповідно налаштувати протези.</p>	<p>від \$15,000 до \$50,000</p>	<p>Німеччина</p>
<p>FitMi by Flint Rehab</p> 	<p>Інтерактивна система реабілітації, яка використовує сенсори для проведення вправ вдома. Допомагає пацієнтам з травмами нижніх кінцівок відновлювати координацію та силу м'язів.</p>	<p>\$400</p>	<p>США</p>
<p>RSscan Footscan System</p> 	<p>Баропододинамометрична система для динамічного аналізу тиску стопи під час ходьби або бігу. Використовується для виявлення асиметрій та аномалій в розподілі навантаження, що є критично важливим для пацієнтів з протезами нижніх кінцівок.</p>	<p>від \$10,000 до \$40,000</p>	<p>Бельгія</p>
<p>Novel Pedar System</p> 	<p>Система індивідуального вимірювання тиску в взутті з використанням тонких датчиків, які дозволяють оцінити розподіл тиску на стопу під час ходьби. Це допомагає виявити неправильні навантаження і адаптувати протез для покращення ходьби.</p>	<p>від \$20,000 до \$50,000</p>	<p>Німеччина</p>

Загалом всі наведені комплекси та системи можна поділити на наступні класи на основі їх функціональних можливостей та цілей застосування:

- комплексні технологічні рішення, включаючи роботизовані реабілітаційні системи;
- електростимуляційні технології;
- сенсорні технології;
- баропододинамометричні технології;
- фотограмметричні технології;
- інтерактивні системи реабілітації.

Незважаючи на ряд переваг, у існуючих рішень все ж таки можна виділити такі недоліки, як висока вартість, складність в установці та використанні, орієнтованість на клінічні умови, обмежена інтеграція даних.

В умовах зростання кількості пацієнтів з травмами, спричиненими різними факторами, включаючи бойові дії, автомобільні аварії та виробничі травми, існує значний попит на високоточні, ефективні та доступні технології реабілітації.

Застосування систем комп'ютерного зору у реабілітаційній ортопедії може суттєво підвищити ефективність процесу лікування, забезпечуючи:

- точне визначення відхилень у русі;
- моніторинг виконання вправ пацієнтом;
- автоматичне створення рекомендацій для лікаря.

Такі системи можуть значно полегшити роботу медичних працівників, підвищуючи точність діагностичних та реабілітаційних процедур, а також зменшити затрати часу та коштів на лікування пацієнтів.

Поєднання різних методів аналізу та моніторингу ходи та постави у єдиній системі дозволяє забезпечити високу діагностичну та прогностичну цінність роботи.

1.3 Завдання, які вирішують методи комп'ютерного зору в медицині

Методи комп'ютерного зору (КЗ) стають невід'ємною частиною сучасної медицини. Вони широко застосовуються для автоматизації діагностики, моніторингу пацієнтів, хірургічної навігації та інших завдань, допомагаючи покращити точність, швидкість та ефективність медичних процедур [6-7]. Наведена класифікація охоплює основні напрями використання комп'ютерного зору в медицині.

Напрямами застосування методів КЗ в медицині є (таблиця 1.3):

- дерматологія (діагностика меланому);
- радіологія (виявлення пухлин);
- офтальмологія (ретинопатія);
- кардіологія (аналіз ЕКГ);
- хірургія (навігація);
- патологія (гістопатологія);
- реабілітація (моніторинг рухів);
- онкологія (виявлення метастазів);
- гастроентерологія (ендоскопія);
- стоматологія (діагностика стану зубів).

Таблиця 1.3 – Класифікація методів комп'ютерного зору в медицині

Напрямок медицини	Задача	Отримуваний результат	Методи або моделі нейронних мереж	Максимальна точність
1	2	3	4	5
Дерматологія	Класифікація шкірних уражень	Діагностика раку шкіри, меланому	ResNet, MobileNet, Inception	89-94%
Радіологія	Виявлення пухлин на рентгенограмах, КТ, МРТ	Рання діагностика раку, моніторинг прогресу лікування	CNN, ResNet, U-Net	До 95% точності

Продовження таблиці 1.3

Офтальмологія	Аналіз зображень очного дна	Виявлення діабетичної ретинопатії	CNN, VGG, EfficientNet	93%
Кардіологія	Аналіз ехокардіограм, ЕКГ	Діагностика захворювань серця	LSTM, CNN	До 92%
Хірургічна навігація	Виявлення та сегментація органів	Підтримка хірургічних втручань	R-CNN, Mask R-CNN, Faster R-CNN	До 90%
Патологія	Аналіз гістопатологічних зразків	Виявлення аномалій тканин	DenseNet, EfficientNet, Transformer	88-96%
Реабілітація	Моніторинг рухів пацієнтів	Відновлення функцій після травм	PoseNet, OpenPose	85-90%
Онкологія	Виявлення метастазів	Рання діагностика та моніторинг лікування	VGG, AlexNet, ResNet	92-95%
Гастроентерологія	Аналіз зображень ендоскопії	Виявлення поліпів, виразок	YOLO, Faster R-CNN	90-95%
Стоматологія	Аналіз панорамних рентгенограм	Виявлення карієсу, аномалій зубів	U-Net, Faster R-CNN	До 88%

Ця класифікація та аналіз дозволяють зрозуміти перспективи та важливість комп'ютерного зору в медичних дослідженнях і практиці, а також розробити напрямки для майбутніх досліджень і покращень, спираючись на методи штучного інтелекту [8-9].

1.3.1 Завдання, які вирішують методи комп'ютерного зору в реабілітаційній ортопедії

На сьогоднішній день у світі існує декілька підходів до використання інноваційних технологій та методів штучного інтелекту у реабілітаційній ортопедії. Серед найбільш поширених можна виділити:

- системи на базі камер – цей підхід передбачає використання камер для зчитування рухів пацієнта. Спеціалізоване програмне забезпечення

аналізує відео та визначає параметри руху. Відомими прикладами є технології, що використовують камери Kinect від Microsoft або системи захоплення руху, які часто застосовуються у спортивній реабілітації;

- системи з використанням сенсорів та акселерометрів – такий підхід передбачає застосування спеціальних сенсорів, що кріпляться на тіло пацієнта і відстежують його рухи. Цей метод є менш чутливим до зовнішніх перешкод, але вимагає спеціалізованого обладнання;

- інтегровані системи з використанням штучного інтелекту (ШІ) – у таких системах застосовуються алгоритми машинного навчання для аналізу та прогнозування рухів пацієнта, що дозволяє забезпечити індивідуальний підхід до реабілітації. ШІ може швидко обробляти великі обсяги даних і робити висновки, що сприяють покращенню якості терапії;

- реабілітаційні тренажери з системою зворотного зв'язку – у деяких випадках використовуються спеціальні тренажери з вбудованими камерами або сенсорами, що забезпечують зворотний зв'язок пацієнту про правильність виконання вправ. Це дозволяє коригувати рухи пацієнта в реальному часі.

Кожен із цих підходів має свої переваги та недоліки, але всі вони спрямовані на покращення процесу реабілітації, підвищення точності діагностики та створення індивідуальних програм для кожного пацієнта.

Основні завдання, які вирішують методи комп'ютерного зору в реабілітаційній ортопедії:

- моніторинг рухової активності – за допомогою камер та спеціального програмного забезпечення відстежується положення тіла пацієнта, амплітуда рухів, швидкість і точність виконання вправ. Це дозволяє контролювати процес реабілітації та швидко коригувати його в разі потреби;

- аналіз біомеханіки рухів – методи комп'ютерного зору дають можливість точно оцінювати кути згину суглобів, положення кінцівок і положення тіла, що допомагає виявити відхилення від норми та підібрати ефективну стратегію для виправлення рухів;

- створення зворотного зв'язку – комп'ютерне зображення або аудіосигнал можуть повідомляти пацієнту про правильність виконання вправ у реальному часі. Це особливо корисно для пацієнтів, які виконують вправи самостійно, адже допомагає уникнути помилок;

- підтримка дистанційної реабілітації – за допомогою комп'ютерного зору пацієнти можуть виконувати вправи вдома під наглядом лікаря, який відстежує їхні рухи через онлайн-систему. Це особливо актуально для пацієнтів, які не можуть часто відвідувати реабілітаційні центри;

- збір і обробка даних для вдосконалення терапії – комп'ютерний зір дозволяє збирати великі обсяги даних про рухи пацієнтів, їхні досягнення та прогрес у реабілітації. Ці дані використовуються для персоналізації програм реабілітації та вдосконалення методик лікування.

1.4 Мета та задачі дослідження

Метою кваліфікаційної роботи є дослідження ефективності застосування системи комп'ютерного зору у поєднанні із електронними датчиками у реабілітаційній ортопедії, розробка оптимальної методики для моніторингу рухів пацієнтів та забезпечення зворотного зв'язку для лікаря і пацієнта в реальному часі.

Для досягнення поставленої мети мають бути вирішені наступні задачі:

- провести аналіз сучасних технологій комп'ютерного зору та їхнього використання у реабілітаційній ортопедії;

- розробити прототип системи, яка зможе відслідковувати та аналізувати рухи пацієнта;

- оцінити ефективність застосування методів комп'ютерного зору при різних навколишніх умовах для визначення стану суглобів при ходьбі;

- оцінити ефективність застосування електронних датчиків для визначення стану суглобів при ходьбі;

- розробити метод комбінованого аналізу даних про стан суглобів пацієнтів.

Методи комп'ютерного зору в реабілітаційній ортопедії мають широкий спектр застосувань і сприяють підвищенню ефективності діагностики та лікування. Однак, для подальшого розвитку потрібне вдосконалення алгоритмів і моделей нейронних мереж, що дозволить підвищити точність, зменшити затрати обчислювальних ресурсів та забезпечити кращу інтерпретованість результатів.

Серед шляхів подальших досліджень та вдосконалень можна розглянути покращення точності та чутливості завдяки роботі над більш точними моделями, що зменшать кількість хибнопозитивних і хибнонегативних результатів; використання мультимодальних даних завдяки інтеграції різних типів медичних зображень і даних (КТ, МРТ, рентген, УЗД) для побудови комплексних моделей діагностики; розробка інтерпретованих моделей, що дозволяють лікарям зрозуміти та інтерпретувати процес ухвалення рішень нейронними мережами; мініатюризація та оптимізація моделей для забезпечення можливості використання на портативних пристроях, що особливо важливо для телемедицини та віддаленої діагностики; розвиток у сфері персоналізованої медицини, де використання комп'ютерного зору необхідне для створення індивідуальних планів лікування з урахуванням особливостей кожного пацієнта.

2 ОБҐРУНТУВАННЯ ТА МЕТОДОЛОГІЧНЕ ПІДҐРУНТЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Огляд методів захоплення руху антропометричних об'єктів

Технології захоплення руху антропометричних об'єктів стрімко розвиваються, забезпечуючи нові можливості для аналізу, моделювання та відтворення рухів людини. Використання цих методів дозволяє отримати точні дані про кінематику та динаміку рухів, що відкриває перспективи для широкого спектра застосувань. До таких методів належать:

- оптичні (ці методи базуються на використанні камер та інших оптичних сенсорів для відстеження руху об'єктів) [10];

- інерційні (інерційні методи засновані на використанні інерційних вимірювальних пристроїв (IMU), які включають акселерометри, гіроскопи та інколи магнітометри) [13];

- магнітні (магнітні методи використовують магнітні поля для визначення положення та руху об'єкта. На тіло встановлюються магнітні сенсори, а також створюється стабільне магнітне поле, що дозволяє відслідковувати рухи);

- ультразвукові (ці методи використовують ультразвукові сенсори для визначення положення об'єкта. Система складається з передавачів та приймачів ультразвукових хвиль);

- механічні системи захоплення руху (ці методи передбачають використання екзоскелетів або спеціальних механічних пристроїв, які прикріплюються до тіла людини і фізично відслідковують рухи).

Кожен з методів має свої переваги та обмеження, що визначають її ефективність у конкретних умовах (таблиця 2.1).

У кінематографі та геймдеві ці технології допомагають створювати реалістичні спецефекти та анімацію персонажів. У спортивній аналітиці вони забезпечують детальний аналіз техніки спортсменів, що дозволяє

оптимізувати тренувальний процес і знижувати ризики травм. У реабілітаційній медицині захоплення руху є важливим інструментом для моніторингу відновлення пацієнтів після травм, дозволяючи медикам та фізіотерапевтам детально оцінювати процес відновлення рухових функцій. Також ці методи знаходять своє застосування в робототехніці, де використовуються для точного відтворення людських рухів у роботах та екзоскелетах.

Таблиця 2.1 – Таблиця переваг і недоліків методів

Метод	Переваги	Недоліки
Оптичні методи	Висока точність у маркерних системах, безконтактний збір даних у безмаркерних	Залежність від освітлення, обмеження простору
Інерційні методи (IMU)	Компактні, не залежать від освітлення, ефективні у великих просторах	Похибка накопичується з часом, особливо при тривалому відстеженні
Магнітні методи	Не залежать від видимості, підходять для закритих середовищ	Може виникати перешкоди від навколишнього середовища
Ультразвукові методи	Висока точність у малих просторах, відсутність потреби в камерах	Залежність від акустичних умов, обмеження у великих приміщеннях
Механічні методи	Точність відстеження рухів суглобів, підходять для медичних і промислових застосувань	Незручні для тривалого використання, обмежують природність рухів

Першим класом є оптичні методи. Серед них можна виділити маркерні та безмаркерні методи. Маркерні оптичні методи використовують

світловідбиваючі або активні маркери, розміщені на тілі об'єкта. Камери фіксують положення маркерів і передають ці дані для подальшої обробки. Безмаркерні оптичні методи використовують алгоритми комп'ютерного зору для розпізнавання характерних точок на тілі без маркерів, зокрема в тривимірному просторі [12]. Застосовують у реабілітації, віртуальній реальності та спорті.

Інерційні методи засновані на використанні інерційних вимірювальних пристроїв (IMU), які включають акселерометри, гіроскопи та інколи магнітометри. Акселерометри вимірюють прискорення, допомагають відстежувати зміну швидкості та напрямку. Гіроскопи вимірюють кутову швидкість і надають дані про повороти і нахили об'єкта. Комбінація акселерометрів і гіроскопів підвищує точність моніторингу руху та стабільність у змінних умовах середовища. Використовуються в медичних дослідженнях, мобільних додатках, робототехніці.

Магнітні методи використовують магнітні поля для визначення положення та руху об'єкта. На тіло встановлюються магнітні сенсори, а також створюється стабільне магнітне поле, що дозволяє відслідковувати рухи. Принцип роботи є наступним - сенсори вимірюють силу і напрямок магнітного поля та розраховують положення об'єкта. Даний клас методів знаходить своє застосування у віртуальній реальності, реабілітації, де необхідно точно відслідковувати рухи в реальному часі. Перевагами є те, що рішення задачі не залежить від видимості, але може бути нестабільним через магнітні перешкоди від навколишнього середовища.

Ультразвукові методи використовують ультразвукові сенсори для визначення положення об'єкта. Системи захоплення рухів антропоморфних об'єктів на основі ультразвукових методів складаються з передавачів та приймачів ультразвукових хвиль. Передавач випромінює ультразвукові сигнали, які відбиваються від об'єкта та фіксуються приймачем. Час проходження сигналу використовується для розрахунку відстані та побудови моделі руху. Часто подібні системи використовуються в медичних цілях, у

реабілітаційній ортопедії та спортивних тренуваннях. Даний клас методів є досить точним, але можуть бути схильні до інтерференції від інших джерел звуку та неефективні у великих просторах.

Механічні методи передбачають використання екзоскелетів або спеціальних механічних пристроїв, які прикріплюються до тіла людини і фізично відслідковують рухи. При цьому механічний пристрій з сенсорами зчитує рухи суглобів і кінцівок, передаючи інформацію на комп'ютер. Частим використанням є сфера реабілітації, аналіз рухів у промисловості, спортивні тренування. Такий підхід є точним у визначенні рухів суглобів, але незручним для тривалого використання, бо обмежує природність руху.

Комбінація різних методів дозволяє досягти кращої точності та надійності при захопленні руху. Наприклад, поєднання інерційних та оптичних методів забезпечує як стабільне відстеження, так і детальну інформацію про просторові координати, мінімізуючи похибки від інерційних датчиків. У реабілітації комбінація акселерометрів з оптичними методами надає інформацію як про кутові відхилення, так і про положення суглобів, що полегшує оцінку процесу відновлення пацієнта.

Таке поєднання збільшує надійність і робить систему менш залежною від одного типу сенсорів, що дозволяє застосовувати її у складних або мінливих умовах, забезпечуючи комплексний підхід до аналізу руху.

2.1.1 Маркерні методи захоплення руху

Маркерні методи захоплення руху (Marker-based Motion Capture) передбачають використання спеціальних маркерів (світловідбиваючі або активні, які самі випромінюють світло), які розташовуються на тілах об'єктів (рисунки 2.1). Камери або інфрачервоні сенсори фіксують рух маркерів та відстежують їхнє переміщення. Програмне забезпечення обробляє ці дані, аналізує траєкторії та створює тривимірну модель руху об'єкта. Даний метод

вимагає точного налаштування маркерів для високої точності визначення траєкторії.



Рисунок 2.1 – Захоплення руху з маркерами

Серед існуючих безмаркерних рішень у цій галузі можна виділити:

- Vicon Motion Capture. Vicon – одна з провідних компаній у галузі захоплення руху (рисунок 2.2). Камери Vicon фіксують світловідбиваючі маркери на тілі, а програмне забезпечення аналізує дані для побудови тривимірної моделі руху. Їхні системи використовуються у спорті, кінематографі, медичних дослідженнях та наукових проєктах.

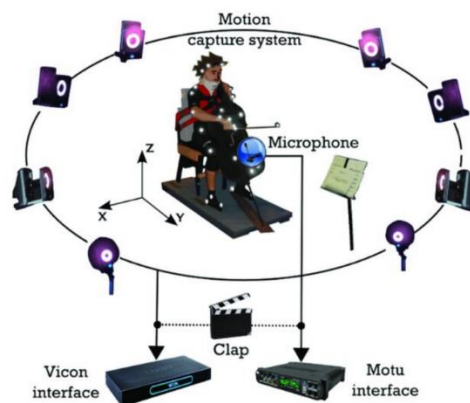


Рисунок 2.2 – Система захоплення руху (VICON 8) і мікрофон (DPA 4096)

Для синхронізації потоків руху та аудіо використовується ручний хлопок [11] Vicon використовує інфрачервоні камери для відстеження світловідбиваючих маркерів на тілі об'єкта. Недоліками є висока вартість обладнання та налаштування. Використання даного рішення потребує спеціального приміщення з оптимальним освітленням для точності;

- OptiTrack Motion Capture широко використовується в ігровій індустрії, віртуальній реальності, кінематографі, а також для медичних та спортивних досліджень (рисунок 2.3).



Рисунок 2.3 – OptiTrack камера

Система дозволяє працювати з великою кількістю маркерів для детального захоплення рухів у реальному часі. Недоліками є жорсткі вимоги налаштування простору і стабільного освітлення;

- Motion Analysis Corporation (MAC) спеціалізується на захопленні руху для клінічних досліджень, кінематографа та спортивних аналітичних проєктів. Їх системи мають можливість точно фіксувати рухи людини для аналізу в медичних або дослідницьких цілях.



Рисунок 2.4 – Камери від Motion Analysis Corporation

Особливостями системи є підтримка багатьох типів датчиків та камер, підходить для досліджень у медичних закладах. Недоліком є вартість обладнання, що підходить для клінічного використання, необхідність наявності спеціаліста для коректного налаштування та інтерпретації даних;

- Xsens MVN (система з інерційними сенсорами, поєднана з маркерами) поєднує інерційні сенсори з маркерами для отримання детальної інформації про рухи.

MVN Awinda starter	MVN Awinda	MVN Link
		
Range ~20m Update rate 60hz Battery life 6h Comms Radio protocol (Awinda) Receiver Awinda dongle Hardware 17 wireless sensors T-shirt + straps Charging USB cable	Range ~50m Update rate 60hz Battery life 6h Comms Radio protocol (Awinda) Receiver Awinda station Hardware 17(+1) wireless sensors T-shirt + straps Charging Charging station	Range ~150m Update rate 240hz Battery life 8 - 10h Comms Wi-Fi GNSS X r(OBR) X Receiver Wi-Fi router Hardware 17 wireless sensors Full body lycra suit Charging USB cable

Рисунок 2.5 – Бездротова система датчиків (Xsens Awinda) і дротова система датчиків (Xsens Link)

Комбінація інерційних сенсорів і маркерів фіксує прискорення, кутові зміщення і позиції кінцівок, передаючи їх на комп'ютер для побудови точної моделі руху. Це дозволяє використовувати систему як у приміщеннях, так і на відкритому просторі без обмежень. Перевагами є незалежність від спеціального освітлення та приміщень, можливість використання в реальному часі на відкритих просторах, підтримка точного захоплення навіть складних рухів тіла. Недоліками є вища вартість, ніж у звичайних маркерних системах.

Наведені системи мають велике значення в таких сферах, як анімація, спорт, медицина та віртуальна реальність, де необхідна висока точність захоплення рухів для створення реалістичних моделей і точного аналізу.

2.1.2 Безмаркерні методи захоплення руху

Безмаркерні методи (Markerless Motion Capture) використовують технології комп'ютерного зору для визначення руху об'єктів без потреби в маркерах (рисунок 2.6). Камери записують відео, а програмне забезпечення з комп'ютерного зору та алгоритми машинного навчання розпізнають та відслідковують характерні точки на тілі без використання маркерів. Дослідження показують, що безмаркерні методи є менш точними у порівнянні з маркерними методами.



Рисунок 2.6 – Захоплення руху без маркерів

Серед існуючих безмаркерних рішень у цій галузі можна виділити:

- Microsoft Kinect – сенсор, який використовує інфрачервоне випромінювання та камери для відстеження рухів людини в реальному часі. Широко застосовується в ігровій індустрії та для розробки інтерактивних додатків;

- iPi Motion Capture – програмне забезпечення, що використовує звичайні RGB-камери або глибокі сенсори для захоплення руху без маркерів. Підходить для створення анімації та аналізу рухів;

- Vicon Shogun – система, яка поєднує оптичні камери високої

роздільної здатності та алгоритми комп'ютерного зору для безмаркерного захоплення руху, особливо в кінематографі та ігровій індустрії;

- Perception Neuron Studio – система, що використовує інерційні сенсори та алгоритми для безмаркерного захоплення руху, забезпечуючи високу точність та гнучкість у різних умовах;

- OptiTrack Motive – програмне забезпечення, яке підтримує безмаркерне захоплення руху за допомогою високошвидкісних камер та передових алгоритмів обробки зображень.

Популярні Markerless Motion Capture рішення наведені у таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Порівняльна таблиця деяких популярних Markerless Motion Capture рішень

Система	Принцип роботи	Переваги	Недоліки	Сфери застосування
1	2	3	4	5
Microsoft Kinect	Використовує інфрачервоне випромінювання та камери для відстеження рухів людини в реальному часі	Доступність та простота використання. Інтеграція з Windows і Xbox.	Обмежена точність. Залежність від умов освітлення. Обмежена область дії	Ігрова індустрія, інтерактивні програми
iPi Motion Capture	Використовує RGB-камери або глибокі сенсори для захоплення руху без маркерів	Доступність використання стандартних камер. Підтримка багатокamerних конфігурацій для підвищення точності.	Потребує постобробки. Залежність від освітлення. Не підтримує реальний час	Анімація, аналіз рухів, віртуальна реальність

Продовження таблиці 2.2

1	2	3	4	5
Vicon Shōgun	Оптичні камери високої роздільної здатності з алгоритмами комп'ютерного зору для захоплення руху	Висока точність. Інтеграція з інструментами Vicon для постобробки.	Висока вартість. Потребує спеціального налаштування та приміщення.	Кінематограф, анімація, наукові дослідження
Perception Neuron Studio	Використовує інерційні сенсори з алгоритмами для безмаркерного захоплення руху	Незалежність від умов освітлення. Можливість використання на відкритому просторі.	Менша точність порівняно з оптичними системами. Похибка може накопичуватися	Спорт, віртуальна реальність, реабілітація
OptiTrack Motive	Оптичні камери з передовими алгоритмами обробки зображень	Висока точність і частота кадрів. Підтримка складних рухів у реальному часі.	Висока вартість. Потребує налаштування простору	Спорт, анімація, медичні дослідження


2.1.3 Використання акселерометрів для аналізу ходи в реабілітаційній ортопедії

Акселерометри використовуються для вимірювання прискорення в трьох вимірах. Вони часто є частиною інерційних систем (IMU), що забезпечують інформацію про рух без потреби в камерах. Акселерометри, гіроскопи та магнітометри встановлюються на різних ділянках тіла. Вони відслідковують положення та прискорення тіла і передають дані в комп'ютер для побудови моделі руху. Часто використовуються в реабілітації, аналізі руху в спорті, віртуальній реальності. Перевагами даного підходу є те, що вони надають незалежність від камер, працюють у різних умовах середовища, але можуть бути менш точними на великих відстанях через накопичення похибок.

Для захоплення руху на основі акселерометрів існує багато систем, деякі з них наведено нижче:

- GaitUp;
- APDM Opal;
- Noraxon MyoMotion;
- Xsens MVN Analyze;
- Delsys Trigno.

Таблиця 2.3 – Порівняльна таблиця існуючих рішень для захоплення руху на основі акселерометрів

Система	Принцип роботи	Переваги	Недоліки	Сфери застосування
1	2	3	4	5
 <p>GaitUp Gait Analysis Desktop Package</p>	Інерційні сенсори для аналізу параметрів ходи	Легкий та портативний, зручний для використання у реальних умовах	Висока вартість, потребує спеціального навчання для інтерпретації даних	Клінічна реабілітація, спортивна медицина

Продовження таблиці 2.3

1	2	3	4	5
 <p>APDM Opal</p>	Безпроводні інерційні сенсори з акселерометрами, гіроскопами та магнітометрами	Тривалий час роботи, висока точність, підтримка програмного аналізу	Висока вартість, потребує калібрування перед використанням	Неврологія, ортопедія, реабілітація
 <p>Noraxon MyoMotion</p>	Тривимірний аналіз руху за допомогою інерційних сенсорів	Підтримка синхронізації з іншими біомеханічними системами, дані в реальному часі	Дороге обладнання, потребує специфічного програмного забезпечення	Клінічна реабілітація, спортивна наука
 <p>Xsens MVN Analyze</p>	Повна інерційна система для тривимірного аналізу руху	Висока точність, зручність роботи в реальних умовах	Висока вартість, складність у використанні, потребує спеціального навчання	Спортивна наука, реабілітація
 <p>Delsys Trigno</p>	Безпроводні сенсори з акселерометрами та можливістю збору даних EMG для аналізу рухів і м'язової активності	Компактний дизайн, висока частота вибірки, інтеграція EMG та рухових даних	Обмежений час роботи від батареї, вартість	Спортивна наука, клінічна реабілітація

Кожне з цих рішень забезпечує специфічні потреби, такі як мобільність, точність або можливість працювати в реальному часі, що робить їх корисними у клінічній реабілітації, спортивній науці та дослідженнях рухової активності.

2.2 Аналіз фреймворків, бібліотек та апаратного забезпечення

Для аналізу технологій комп'ютерного зору було обрано бібліотеки OpenCV, MediaPipe та Tensor-Flow. OpenCV є гнучкою бібліотекою для

аналізу зображень та відео, але для конкретних задач вона потребує достатньо великої вибірки даних для точних результатів. MediaPipe є простою у використанні бібліотекою, яка надає багато готових рішень і забезпечує швидку обробку відео в реальному часі. Бібліотека TensorFlow дозволяє складати більш складні моделі розпізнавання відхилень від норми опорно-рухового апарату.

OpenCV, скорочення від Open Source Computer Vision Library, – це бібліотека комп'ютерного зору та машинного навчання з відкритим кодом. OpenCV – це величезна бібліотека з відкритим кодом для комп'ютерного зору, машинного навчання та обробки зображень. Бібліотека відіграє важливу роль у роботі в режимі реального часу, що дуже важливо в сучасних системах. Використовуючи її, можна обробляти зображення та відео, щоб ідентифікувати предмети, обличчя або навіть почерк людини.

OpenCV випускається за ліцензією BSD, тому є безкоштовною як для академічного, так і для комерційного використання. Підтримує інтерфейси C++, C, Python і Java та ОС Windows, Linux, Mac OS, iOS і Android. Під час розробки OpenCV основна увага приділялася програмам реального часу для підвищення ефективності обчислень. Бібліотека оптимізована для використання можливостей багатоядерної обробки.

OpenCV дозволяє виконувати різні операції з зображеннями, задіюючи обчислювальний ресурс графічного процесору (рисунок 2.7).

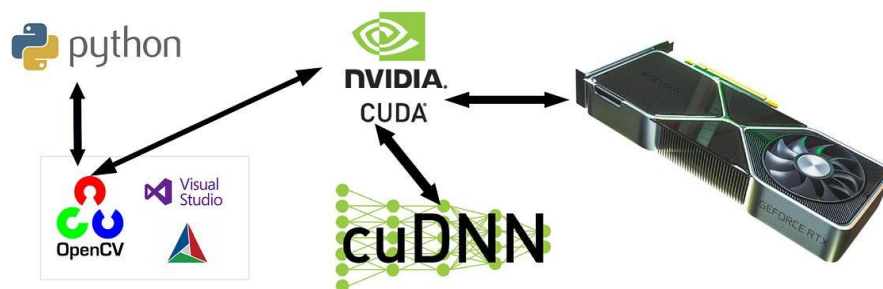


Рисунок 2.7 – Екосистема рішення задач на графічному процесорі

Існує багато застосувань, які можна реалізувати за допомогою OpenCV. Деякі з них наведені нижче: розпізнавання облич, автоматизований огляд і спостереження, підрахунок кількості людей (потік відвідувачів у торговому центрі тощо), підрахунок транспортних засобів на шосе та визначення їхньої швидкості, інтерактивні художні інсталяції, виявлення аномалій (дефектів) у виробничому процесі (визначення дефектних продуктів), складання панорамних зображень (наприклад, для вулиць), пошук і витягування відео/зображень, навігація і керування роботами та безпілотними автомобілями, розпізнавання об'єктів, аналіз медичних зображень, кінематограф – 3D структура на основі руху, розпізнавання реклами на телеканалах.

MediaPipe Solutions надає набір бібліотек і інструментів, які дозволяють швидко застосувати техніки штучного інтелекту (AI) і машинного навчання (ML) у додатках. Є доступна можливість інтегрувати ці рішення в додатки відразу, налаштовувати їх під свої потреби і використовувати на різних платформах розробки.

Нижче наведені інструменти, які забезпечують основний функціонал для кожного рішення MediaPipe:

- MediaPipe Tasks – мультиплатформені API та бібліотеки для впровадження рішень;
- MediaPipe models – попередньо навчені, готові до використання моделі для кожного рішення;
- MediaPipe Model Maker – налаштування моделей для рішень за допомогою ваших даних;
- MediaPipe Studio – візуалізація, оцінка та тестування рішень у браузері;
- MediaPipe Holistic – комплексне рішення, що забезпечує одночасне визначення ключових точок тіла, рук та обличчя. Використовується в додатках для жестової взаємодії, анімації персонажів, спортивної аналітики, а також для розпізнавання жестової мови. Може застосовуватись для

управління на основі рухів, дистанційних інтерфейсів та розпізнавання мови тіла;



Рисунок 2.8 – Результати MediaPipe Holistic у випадках використання для спорту та танців. Внизу жести «Тиша» та «Привіт»

- MediaPipe Face Mesh – модель для визначення 3D-сітки обличчя з понад 450 точками. Є важливим інструментом для додатків з фільтрами, AR-масками, трекінгу обличчя у віртуальній реальності та віртуальних дзеркалах. Використовується для анімації обличчя, відстеження виразів та аналізу мимічних змін;

- MediaPipe Hands – інструмент для розпізнавання ключових точок на руці. Застосовується для інтерфейсів на основі жестів, контролю за допомогою рухів рук, відстеження жестової мови та інтерактивних додатків. Може використовуватись для ігрових контролерів і жестового управління;

- MediaPipe Pose – модель для визначення положення тіла з виділенням ключових точок, що дозволяє відстежувати рухи людини (рисунок 2.9). Використовується для спортивної аналітики, фітнес-додатків, медичних досліджень, реабілітації, де потрібен точний аналіз рухів тіла;

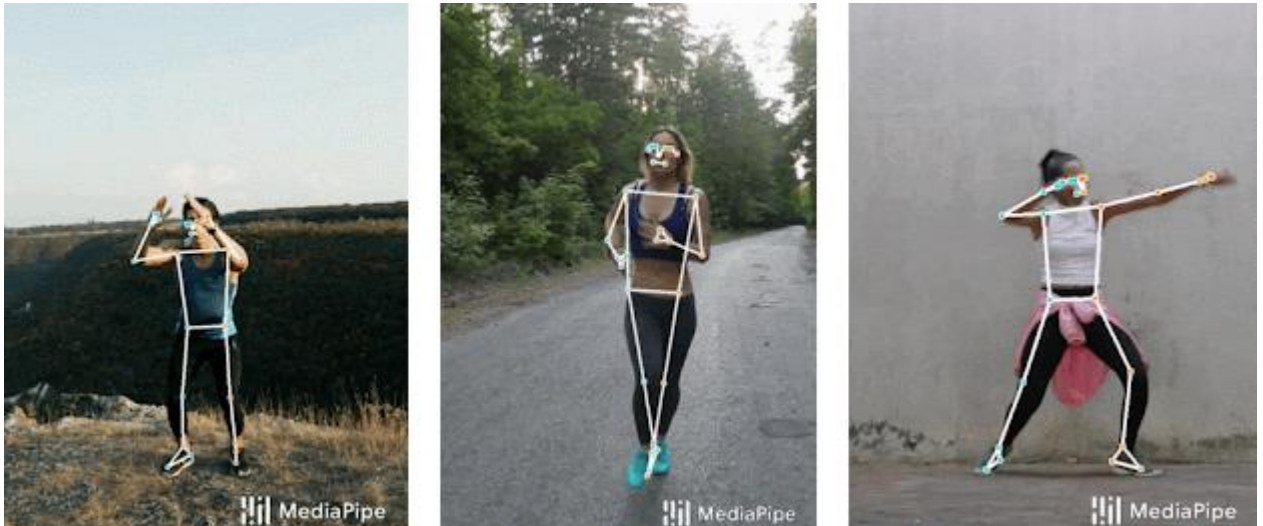


Рисунок 2.9 – Результати роботи BlazePose у випадку фітнесу та танців

- MediaPipe Objectron – інструмент для тривимірного розпізнавання та відстеження невеликих об'єктів. Підходить для додатків доповненої реальності, де потрібно визначити форму, положення та кут об'єктів. Може бути корисним для візуальної інвентаризації, аналізу інвентарних запасів;

- MediaPipe Solutions Framework – основний фреймворк MediaPipe, що дозволяє створювати ефективні пайплайни для роботи з ML на пристрої.

На прикладі (рисунок 2.4) видно, що рішення стабільно розпізнає руку як праву (синій колір) або ліву (помаранчевий колір).

В контексті мети та завдання, які були поставлені в Розділі 1.4, найбільшу зацікавленість для створення методів та застосунку моніторингу процесу реабілітації в ортопедичній практиці представляє MediaPipe Holistic із понад 540 ключовими точками. Це дозволяє забезпечити цілісне, одночасне сприйняття мови тіла, жестів та виразів обличчя. Завдяки комплексному підходу наведене рішення відкриває можливості для дистанційних інтерфейсів жестів, повнотілесної AR, спортивної аналітики та розпізнавання жестової мови.

2.3 Структура ключових точок тіла – COCO (Common Objects in Context) topology

COCO (Common Objects in Context) topology – це структура ключових точок тіла, яка визначає певну кількість вузлів (ключових точок) і зв'язків між ними для завдань відстеження та аналізу людського тіла, особливо при розпізнаванні поз або скелетів у комп'ютерному зорі. COCO topology широко використовується у відкритих наборах даних для тренування моделей, зокрема в наборі COCO (який включає зображення з мітками ключових точок для об'єктів і людей у різних положеннях).

Основні особливості COCO topology – кількість ключових точок, взаємозв'язки, застосування.

Стандартна структура COCO визначає 17 ключових точок для аналізу людського тіла, таких як голова, плечі, лікті, зап'ястя, стегна, коліна, щиколотки тощо. Точки з'єднані між собою зв'язками, що утворюють скелетну модель, яка дозволяє моделі розуміти та відтворювати положення тіла на основі цих точок. COCO topology активно використовується для задач розпізнавання поз (pose estimation), анімації, спортивної аналітики, систем реабілітації, інтерактивних інтерфейсів та в багатьох інших випадках, де необхідне точне визначення людських рухів.

Додавання більшої кількості ключових точок є необхідним для подальшого використання моделей оцінки поз, орієнтованих на конкретні області, як-от руки, обличчя чи ноги. Тому сьогодні на основі існуючих інструментів, як то BlazePose, створюються нові топології зі збільшеною кількістю ключових точок на тілі людини, яка є надмножиною топологій COCO (рисунки 2.10). Це дозволяє визначати семантику тіла на основі передбачення поз, яке узгоджується з моделями для обличчя та рук.

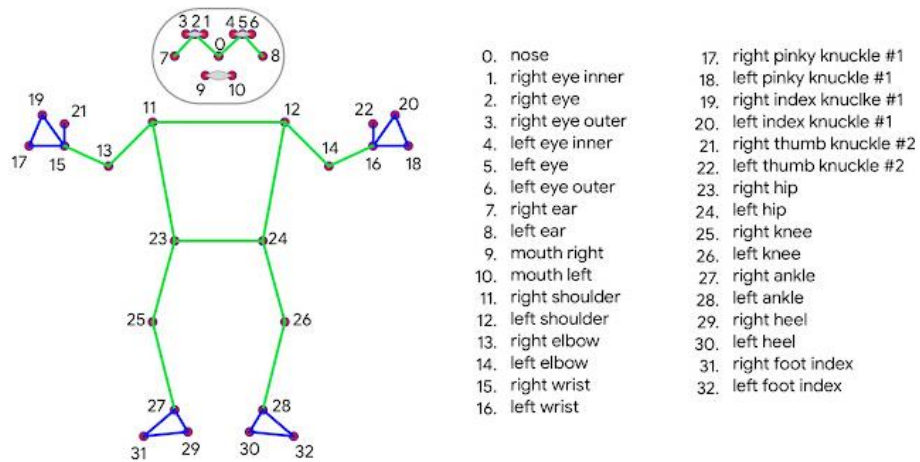


Рисунок 2.10 – Топологія з 33 ключових точок BlazePose як надмножина COCO (позначена зеленим кольором)

Завдяки COCO topology можна створювати точні моделі для розпізнавання та аналізу руху людей, що сприяє розширенню можливостей у різних галузях комп'ютерного зору.

3 МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1 Моделювання процесу дослідження

Для забезпечення чіткого розуміння процесу дослідження треба описати модель на базовому та детальному рівні, що дозволить структурувати та розділити весь процес на різні етапи для більш детального аналізу. Опис моделі за нотацією IDEF0 допоможе описати результуючий процес у вигляді “чорного ящика” та детальну послідовність підпроцесів.

Розглянемо базовий рівень процесу дослідження аналізу рухів пацієнта (рисунок 3.1). Дана модель враховує аспекти вхідних даних, обмежень та керуючих впливів, виконавців або учасника, вихідні дані.



Рисунок 3.1 – Базовий рівень (А-0) процесу аналізу рухів пацієнтів у реабілітаційній ортопедії

Як вхідні дані використовуються відеозаписи рухів тіла пацієнтів та дані акселерометрів на тілі пацієнта під час руху. Керуючими впливами та

обмеженнями є правила оцінки для визначення відхилень від норми та зовнішні умови експерименту (освітлення, фон, швидкість руху пацієнта). Виконавцем або учасником процесу є пацієнт, вихідними даними або результатом є отримання пацієнтом рекомендації щодо виправлення відхилення опорно-рухової системи пацієнта.

Зробивши декомпозицію моделі базового рівня можна отримати детальний рівень моделі (рисунок 3.2), в якій можна побачити, що основний процес було розділено на чотири підпроцеси, які будуть розглядатися більш детально.

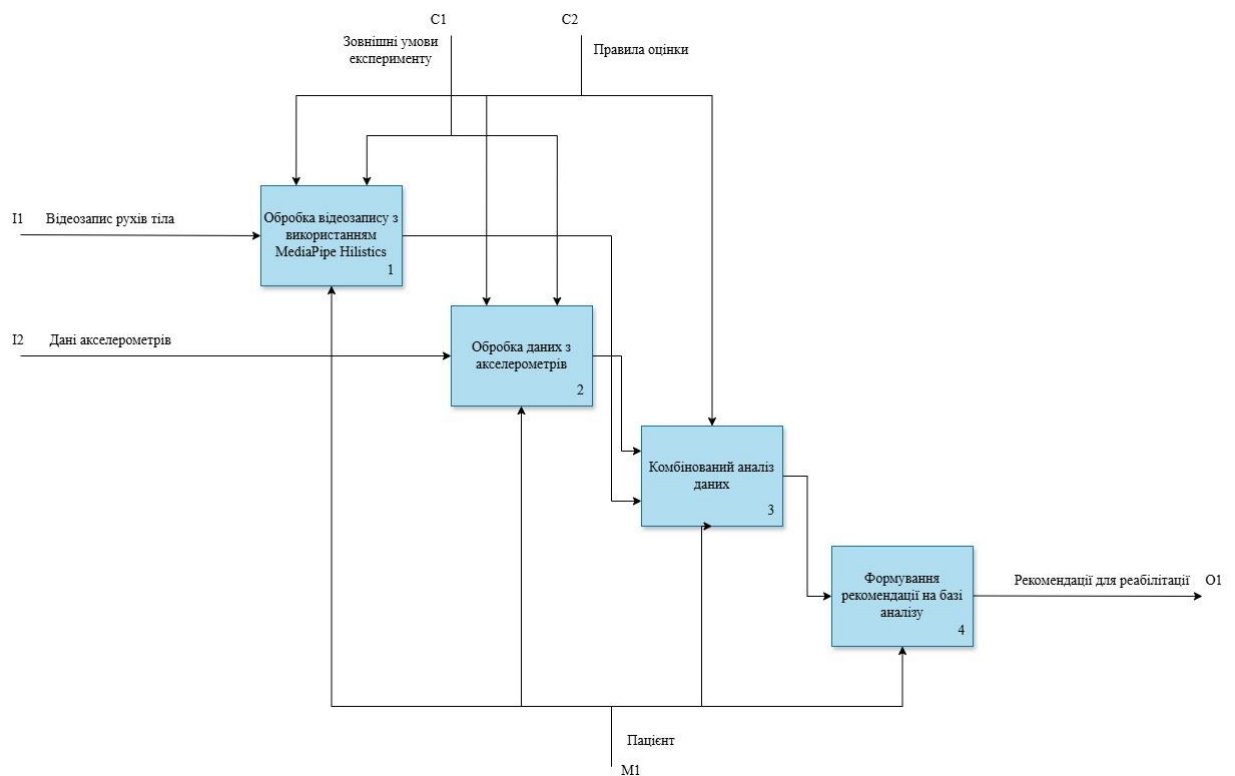


Рисунок 3.2 – Детальний рівень (А-1) процесу аналізу рухів пацієнтів у реабілітаційній ортопедії

Згідно з моделі, є наступні підпроцеси:

- обробка відеозапису з використанням MediaPipe Holistics, для якого пацієнт є учасником, керуючими впливами та обмеженнями є зовнішні умови (освітлення, фон, швидкість ходи) та чисельні значення для визначення

відхилень між ключовими точками, вихідними даними є оброблений відеозапис з виявленими відхиленнями або їхніми відсутностями;

- обробка даних з акселерометрів, де пацієнт є учасником, керуючими впливами та обмеженнями є зовнішні умови (швидкість ходи та розташування акселерометрів) та чисельні значення для вимірювання відхилень від норми за рахунок різниці показників прискорень з акселерометрів, вихідними даними є вибірка даних з переміщення точок на тілі пацієнта під час руху з висновком чи є відхилення, чи вони відсутні;

- комбінований аналіз даних використовує оброблені дані з відеозапису та акселерометрів для підвищення точності даних експерименту, учасником якого є пацієнт, керуючими впливами та обмеженнями є чисельні значення для комбінованого порівняння даних для виявлення відхилень від норми, вихідними даними є фінальний висновок, чи пацієнт має відхилення опорно-рухової системи;

- формування рекомендації на базі отриманого висновку виявлених відхилень від норми пацієнта, якщо такі були виявлені, вихідними даними є експертний висновок з рекомендаціями подальших дій.

Використання нотації IDEF0 для формування моделі дозволить систематизувати процес дослідження та виділити ключові етапи. Базовий рівень надає загальний огляд процесу, тоді як детальний рівень розкриває взаємодію підпроцесів, що є важливим для оптимізації роботи системи. Важливо зазначити, що в рамках дослідження системи виявлення відхилень, експертний висновок та подальші рекомендації може надати тільки спеціаліст, тому основною метою буде описати та дослідити перші три підпроцеси моделі.

3.2 Ключові показники дослідження

Для виявлення відхилень від норми опорно-рухового апарату людини за допомогою методів комп'ютерного зору та акселерометрів, треба

визначити ключові показники, за якими можна відрізнити відхилення від здорового стану. Як ключові показники можна використовувати:

- зміщення центру мас тіла від вертикалі (визначається на основі ключових точок тіла та дозволяє оцінити стабільність пацієнта під час руху);
- кут нахилу корпусу, лопаток та тазостегнових суглобів (оцінка куту нахилу відносно горизонталі для кожної групи суглобів дозволяє виявити асиметрії та неправильну поставу);
- симетрія та плавність рухів кінцівок (вимірюється через порівняння амплітуд рухів правої та лівої кінцівок, визначається за допомогою аналізу траєкторій руху ключових точок).

При роботі з методами комп'ютерного зору важливими факторами є зовнішні умови, які можуть вплинути на точність оцінки опорно-рухового апарату людини. В рамках дослідження звернено увагу на наступні зовнішні фактори для визначення їхнього впливу оцінку стану опорно-рухового апарату: освітлення, тип фону та швидкість ходи. Для освітлення порівнюються гарне та тускле:

- гарним освітлення є від 300 люксів або 300 люменів на м²;
- тусклим освітлення є до 100 люксів або 100 люменів на м².

Фон порівнюється за однотонністю:

- однотонний фон є ідеальною умовою для роботи з методами комп'ютерного зору;
- зашумлений фон або різнокольоровий фон з високим контрастом може створювати перешкоди при визначенні ключових точок тіла.

Швидкість ходи – змінна умова, яка може по-різному впливати на результат, було обрано наступні приблизні показники:

- повільна, до 50 кроків на хвилину;
- швидка, від 100 кроків на хвилину.

Також важливо визначити метрики оцінки успішності та ефективності роботи програми, які допоможуть зважувати вірні рішення з реалізації програмного забезпечення та вдалих умов:

- похибка виявлення кутів нахилу відносно виявлених ключових точок тіла;
- часова затримка обробки даних одного кадру в мілісекундах.

За допомогою обраних показників можна не тільки якісно представити результати, а й обґрунтувати покращення до програми або процесу виявлення відхилень від норми опорно-рухової системи людини.

3.3 Використані методи досліджень та програмне забезпечення.

Для якісного виявлення вдалої комбінації зовнішніх умов та реалізації програмного забезпечення, було обрано наступні методи виявлення відхилень від норми опорно-рухового апарату людини:

- використання безмаркерного методу (MediaPipe): аналіз рухів за допомогою комп'ютерного зору;
- використання акселерометрів: моніторинг прискорення та нахилу тіла під час руху;
- комбінація методів: поєднання даних з MediaPipe та акселерометрів для підвищення точності.

Основними інструментами були ПЗ створене з використанням мови програмування Python та бібліотеки MediaPipe для безмаркерного аналізу рухів та акселерометри WitMotion WT9011DCL-BT50 разом з ПЗ від виробників для збору інерційних даних.

У дослідженні використовувалася модель MediaPipe Holistic, яка дозволяє відслідковувати ключові точки тіла, рук та обличчя в реальному часі. Перевагами даної моделі є:

- готові рішення для відстеження ключових точок у 2D і 3D форматах;
- можливість інтеграції з іншими фреймворками, такими як TensorFlow, для прискорення обробки даних;
- підтримка роботи на різних платформах: Windows, Linux, iOS, Android;
- можливість обробки даних в реальному часі.

При роботі з MediaPipe можна використовувати або попередньо зроблений відеозапис або працювати в реальному часі, власна програма використовує MediaPipe Holistics для визначення ключових точок таких як: плечі, лікті, коліна тощо (рисунок 3.3). Після обробки відеоданих можна провести аналіз нахилу корпусу, зміщення центру мас та симетрії рухів кінцівок.



Рисунок 3.3 – Зображення з визначеними ключовими точками людини за допомогою MediaPipe Holistics

Для збору даних про прискорення, кутові швидкості та орієнтацію тіла використовувались два акселерометри WitMotion WT9011DCL-BT50 (рисунок 3.4) та ПЗ від WitMotion (рисунок 3.5), за допомогою якого можна переглядати необроблені дані в реальному часі. Перевагами саме цих датчиків є:

- висока чутливість вимірювання прискорення по осях X, Y, Z;
- підтримка Bluetooth для бездротової передачі даних;
- висока частота відправки даних для якісної вибірки.

Акселерометри треба прикріпити до лопаток спини пацієнта для моніторингу рухів (рисунок 3.6), далі для первинного запису даних використовується ПЗ від WitMotion у вигляді CSV файлу. Останнім етапом є аналіз отриманих даних в розробленій програмі на Python.

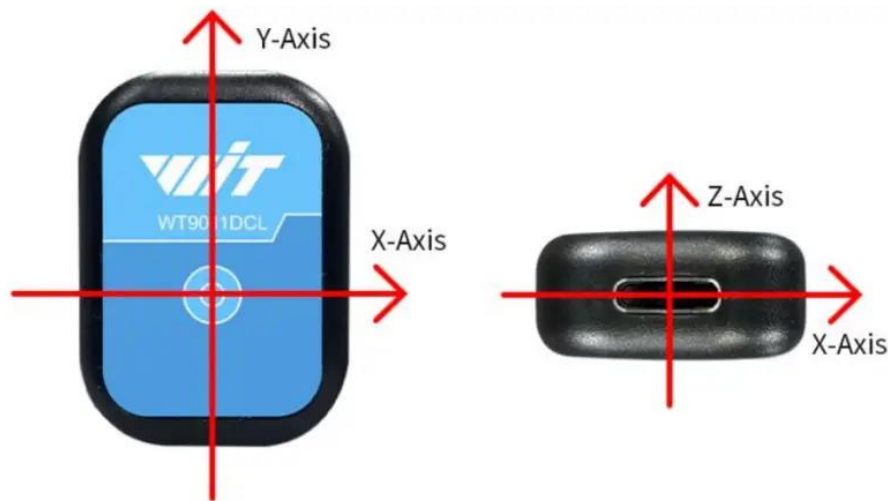


Рисунок 3.4 – Датчики WitMotion WT9011DCL-BT50

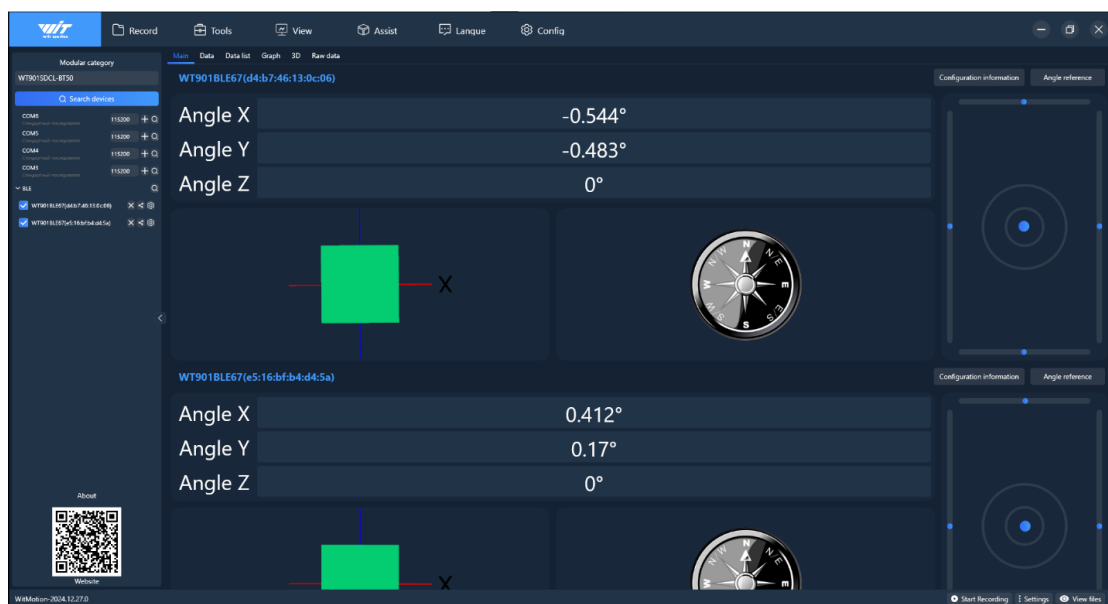


Рисунок 3.5 – ПЗ від WitMotion



Рисунок 3.6 – Зафіксовані датчики WitMotion WT9011DCL-BT50 на пацієнті

Комбінація використання MediaPipe Holistics та акселерометрів допоможе досягти більшої точності та надійності аналізу, але для коректної інтерпретації даних треба синхронізувати. В залежності від запису в реальному часі або вже готовим відеозаписом та вибіркою даних з акселерометрів, потрібен інструмент синхронізації, який буде працювати в обох випадках. Можна використовувати уніфіковану систему часових міток для узгодження даних як попередньо створених, так і при роботі в реальному часі.

3.4 Етапи проведення дослідження

Загальний алгоритм визначення відхилень від норми опорно-рухового апарату людини можна зобразити у вигляді блок-схеми (рисунок 3.7). Задача дослідження провести тестування щодо впливу технічних рішень з ПЗ та зовнішніх умов, тому процес формування рекомендацій не потребує поточної уваги.

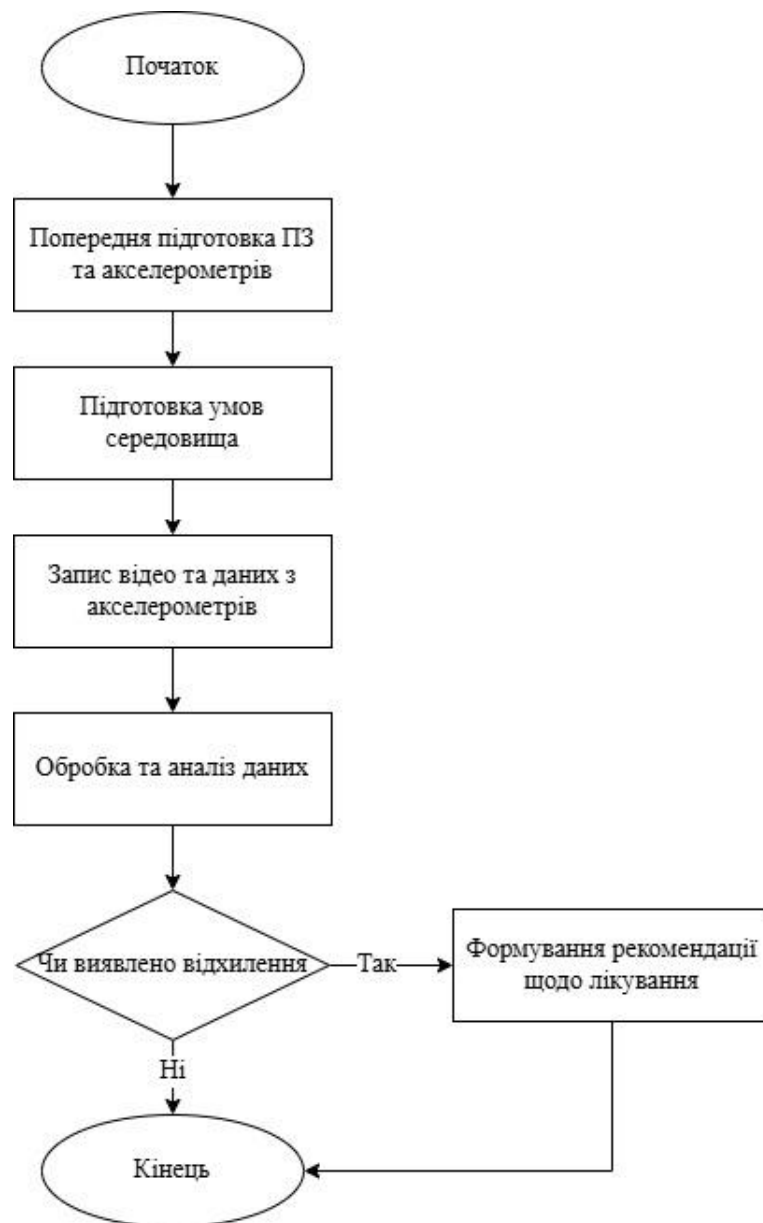


Рисунок 3.7 – Блок-схема алгоритму визначення відхилень опорно-рухового апарату

Першим етапом є підготовка програмного забезпечення та налаштування обладнання (камера, акселерометри) для збору даних. Для аналізу рухів було створено власну програму на мові Python з використанням бібліотеки MediaPipe для визначення ключових точок тіла та використано два акселерометри WitMotion WT9011DCL-BT50 прикріплені до лопаток спини. Перед початком проведення експериментів було проведено тестування системи на коректність визначення ключових точок (рисунок 3.7) та проведено калібрування акселерометрів для отримання коректних даних (рисунок 3.8).



Рисунок 3.8 – Тестування на коректність розпізнавання ключових точок

Зовнішні умови було налаштовано з метою оцінки точності методів у різних сценаріях:

- організовано два режими освітлення: природне денне світло та штучне з різною інтенсивністю;
- забезпечено однотонний фон за допомогою полотна та зашумлений фон з меблями, елементами декору та рухомих об'єктів;
- вимірювання швидкості проводилось за допомогою метронома та секундоміра для дотримання стабільного темпу пацієнтів.

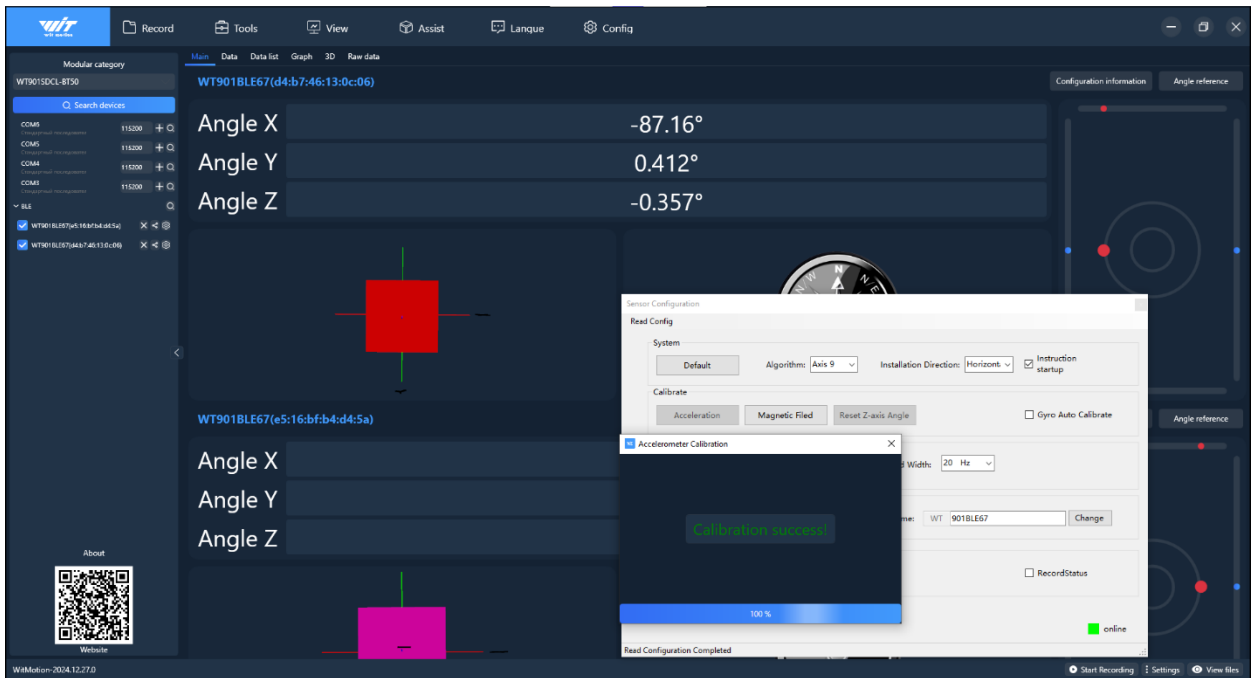


Рисунок 3.9 – Калібрування акселерометрів WitMotion WT9011DCL-BT50

Для аналізу потрібно провести дві групи експериментів: контрольний, з еталонними показниками рухів, та з відхиленнями опорно-рухового апарату від здорового.

Після проведення експериментів потрібно обробити отримані результати для визначення ефективності роботи створеної програми та часової оцінки роботи методів визначення відхилення від норми.

4 РЕЗУЛЬТАТИ ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДІВ

4.1 Використання безмаркерного методу

В рамках проведення дослідження з використання безмаркерного методу основну увагу було зосереджено на точність виявлення відхилення від норми та час обробки даних при різних умовах зовнішнього середовища. Аналіз рухів пацієнта проводився для виявлення наявності кифозу або сколіозу, для кожного відхилення проводилися окремі групи дослідів з різними вхідними умовами зовнішнього середовища. Для виявлення кифозу в пацієнта, йому потрібно рухатись зі сторони в сторону нормальною ходою, щоб спину було видно збоку (рисунок 4.1). Результати роботи розробленої програми з виявлення кифозу представлено в таблицях 4.1 - 4.4.



Рисунок 4.1 – Положення спини, при якому визначається кифоз

Таблиця 4.1 – Результати використання безмаркерних методів для виявлення кіфозу при гарному освітленні та невеликій швидкості руху (>300 Люксів, до 50 кроків на хвилину)

Кут нахилу корпусу відносно вертикалі під час ходьби (еталонне значення, визначене фізично становить 2-3 градусів)						
	Однотонний фон			Зашумлений фон		
	Час обробки одного кадру, мс	Кількість правильно визначених кадрів	Похибка	Час обробки одного кадру, мс	Кількість правильно визначених кадрів	Похибка
Контрольний експеримент	31	127	15%	33	117	22%
Експеримент з відхиленням	33	135	10%	37	126	16%

З результатів видно зашумлений фон призводить до збільшення похибки та часу обробки одного кадру, але час обробки залишається в задовільних межах для обробки в реальному часі.

Таблиця 4.2 – Результати використання безмаркерних методів для виявлення кіфозу при гарному освітленні та високій швидкості руху (>300 Люксів, до 100 кроків на хвилину)

Кут нахилу корпусу відносно вертикалі під час ходьби (еталонне значення, визначене фізично становить 4-6 градусів)						
	Однотонний фон			Зашумлений фон		
	Час обробки одного кадру, мс	Кількість правильно визначених кадрів	Похибка	Час обробки одного кадру, мс	Кількість правильно визначених кадрів	Похибка
Контрольний експеримент	32	133	11%	33	126	16%
Експеримент з відхиленням	33	136	9%	36	132	12%

З результатів видно, що при збільшенні швидкості руху похибка зменшилась для гарних та поганих умов, це свідчить про те, що більш інтенсивний рух сприяє стабільнішому визначенню нахилу корпусу.

Таблиця 4.3 – Результати використання безмаркерних методів для виявлення кіфозу при поганому освітленні та невеликій швидкості руху (<100 Люксів, до 50 кроків на хвилину)

Кут нахилу корпусу відносно вертикалі під час ходьби (еталонне значення, визначене фізично становить 2-3 градусів)						
	Однотонний фон			Зашумлений фон		
	Час обробки одного кадру, мс	Кількість правильно визначених кадрів	Похибка	Час обробки одного кадру, мс	Кількість правильно визначених кадрів	Похибка
Контрольний експеримент	31	118	21%	33	109	27%
Експеримент з відхиленням	33	126	16%	37	115	23%

Таблиця 4.4 – Результати використання безмаркерних методів для виявлення кіфозу при поганому освітленні та високій швидкості руху (<100 Люксів, до 100 кроків на хвилину)

Кут нахилу корпусу відносно вертикалі під час ходьби (еталонне значення, визначене фізично становить 4-6 градусів)						
	Однотонний фон			Зашумлений фон		
	Час обробки одного кадру, мс	Кількість правильно визначених кадрів	Похибка	Час обробки одного кадру, мс	Кількість правильно визначених кадрів	Похибка
Контрольний експеримент	32	123	18%	33	117	22%
Експеримент з відхиленням	33	126	16%	36	121	19%

Результати даного експерименту свідчать про те, що погані умови освітлення дійсно негативно впливають на точність виявлення відхилень опорно-рухового апарату від норми.

Результати досліджень з виявлення кіфозу показали велику похибку поганому освітленні та зашумленому фоні (рисунок 4.2). При збільшенні швидкості руху пацієнта похибка знизилася, але є великою для надання точного результату. Також можна зазначити, що погані умови зовнішнього середовища збільшують час на обробку одного кадру відео, з чого можна зробити висновок, що для задовільного результату аналізу та швидкодії програми рекомендовано створити умови, які не будуть заважати обробці даних та зменшать загальну похибку при виявленні відхилень від норми.

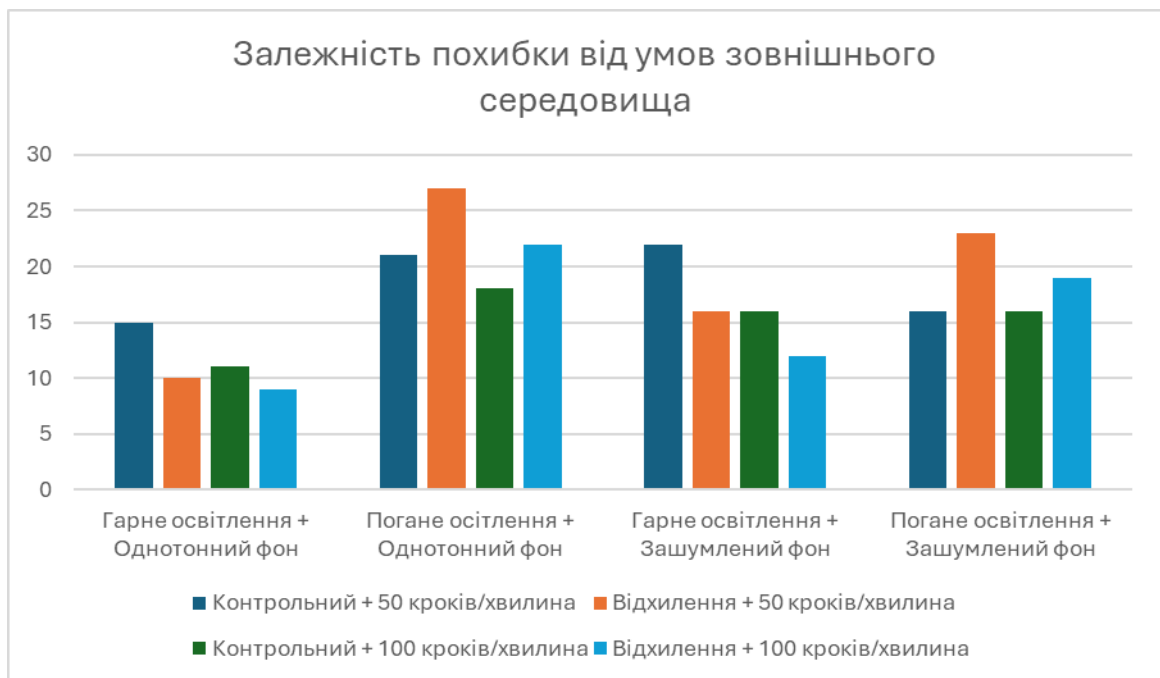


Рисунок 4.2 – Графік залежності похибки визначення кіфозу від зовнішніх умов

Для проведення дослідів з виявлення сколіозу вхідні дані не змінилися за винятком напрямку руху пацієнта, для виявлення сколіозу пацієнту потрібно рухатись в напрямок або від камери, щоб спина була в повній

видимості. Результати роботи розробленої програми з виявлення сколіозу (рисунок 4.3) представлено в таблицях 4.5 - 4.8.

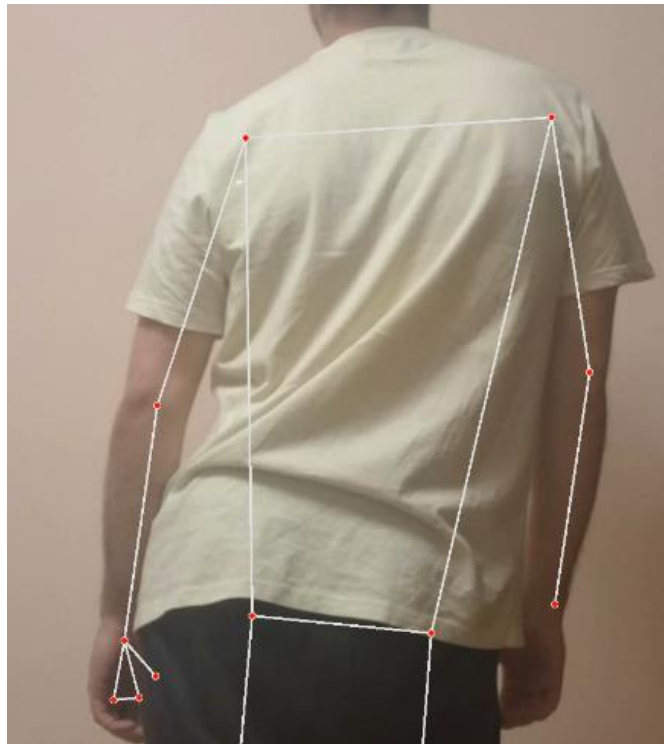


Рисунок 4.3 – Положення спини, при якому визначається сколіоз

Таблиця 4.5 – Результати використання безмаркерних методів для виявлення сколіозу при гарному освітленні та невеликій швидкості руху (>300 Люксів, до 50 кроків на хвилину)

Різниця кутів нахилу між правою та лівою сторонами під час ходьби (еталонне значення, визначене фізично становить 1-2 градусів)						
	Однотонний фон			Зашумлений фон		
	Час обробки одного кадру, мс	Кількість правильно визначених кадрів	Похибка	Час обробки одного кадру, мс	Кількість правильно визначених кадрів	Похибка
Контрольний експеримент	31	127	15%	33	117	22%
Експеримент з відхиленням	33	135	10%	37	126	16%

Результати, представлені в таблиці 4.5, демонструють позитивний вплив гарних умов освітлення та фону на точність виявлення сколіозу.

Таблиця 4.6 – Результати використання безмаркерних методів для виявлення сколіозу при гарному освітленні та високій швидкості руху (>300 Люксів, до 100 кроків на хвилину)

Різниця кутів нахилу між правою та лівою сторонами під час ходьби (еталонне значення, визначене фізично становить 2-3 градусів)						
	Однотонний фон			Зашумлений фон		
	Час обробки одного кадру, мс	Кількість правильно визначених кадрів	Похибка	Час обробки одного кадру, мс	Кількість правильно визначених кадрів	Похибка
Контрольний експеримент	32	133	11%	33	126	16%
Експеримент з відхиленням	33	136	9%	36	132	12%

Таблиця 4.7 – Результати використання безмаркерних методів для виявлення сколіозу при поганому освітленні та невеликій швидкості руху (<100 Люксів, до 50 кроків на хвилину)

Різниця кутів нахилу між правою та лівою сторонами під час ходьби (еталонне значення, визначене фізично становить 1-2 градусів)						
	Однотонний фон			Зашумлений фон		
	Час обробки одного кадру, мс	Кількість правильно визначених кадрів	Похибка	Час обробки одного кадру, мс	Кількість правильно визначених кадрів	Похибка
Контрольний експеримент	31	118	21%	33	109	27%
Експеримент з відхиленням	33	126	16%	37	115	23%

Результати, представлені в таблиці 4.6, демонструють позитивний вплив високої швидкості руху на точність виявлення сколіозу, час обробки кадру залишився на рівні попередніх експериментів, що свідчить про стабільність алгоритму незалежно від швидкості руху.

Результати, наведені в таблиці 4.7, підтвердили негативний вплив поганого освітлення на точність виявлення сколіозу, час обробки кадру залишився стабільним, але збільшення похибки вказує на обмеженість алгоритму в складних умовах.

Таблиця 4.8 – Результати використання безмаркерних методів для виявлення сколіозу при поганому освітленні та високій швидкості руху (<100 Люксів, до 100 кроків на хвилину)

Різниця кутів нахилу між правою та лівою сторонами під час ходьби (еталонне значення, визначене фізично становить 2-3 градусів)						
	Однотонний фон			Зашумлений фон		
	Час обробки одного кадру, мс	Кількість правильно визначених кадрів	Похибка	Час обробки одного кадру, мс	Кількість правильно визначених кадрів	Похибка
Контрольний експеримент	32	123	18%	33	117	22%
Експеримент з відхиленням	33	126	16%	36	121	19%

Результати, наведені в таблиці 4.8, демонструють вплив високої швидкості руху на точність виявлення сколіозу в умовах поганого освітлення, порівняно з низькою швидкістю руху, однак похибка все ще залишається вищою, ніж в умовах гарного освітлення. Гарне освітлення та однотонний фон найбільше впливають на зниження похибки при визначенні відхилення, що можна побачити на рисунку 4.4.

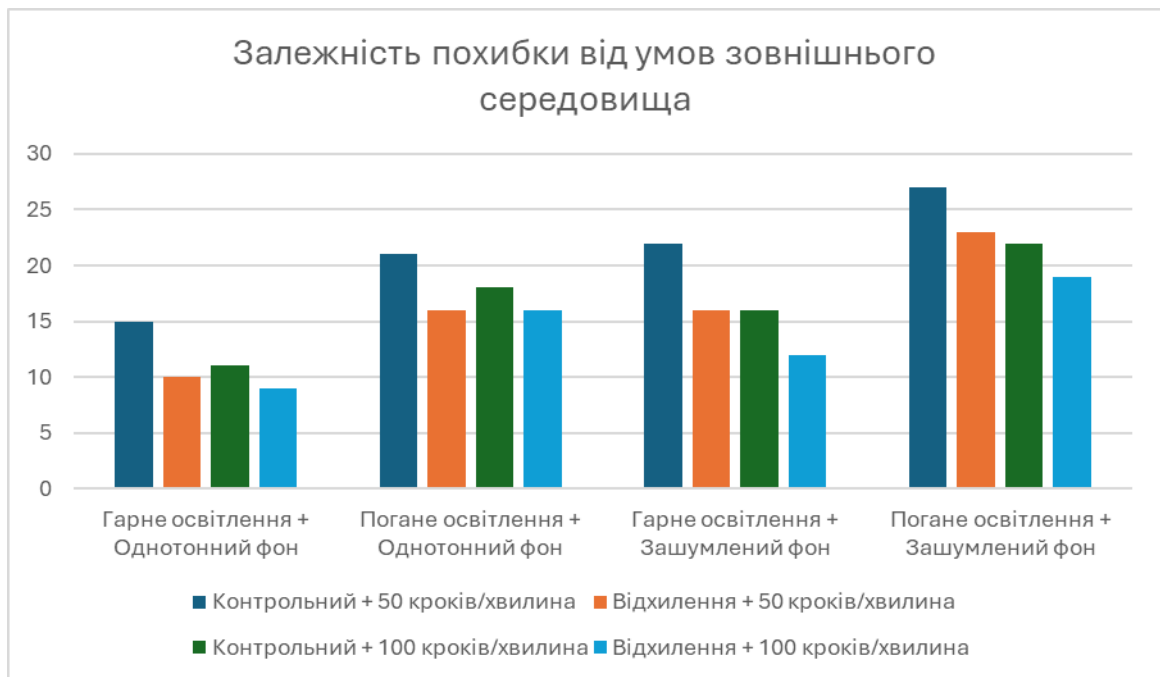


Рисунок 4.4 – Графік залежності похибки визначення сколіозу від зовнішніх умов

Результати проведення досліджень з використання безмаркерних методів показали, що їх легко використовувати та вони досить швидко можуть проаналізувати, але при поганому освітленні та неоднотонному фоні з наявністю об'єктів на фінальному кадрі збільшується час обробки кожного кадру та похибка визначення наявності відхилень від норми в пацієнта. Для зменшення похибки треба покращити методи обробки зображень та/або застосовувати безмаркерний метод разом з іншими.

4.2 Використання акселерометрів

В рамках дослідження виявлення відхилень опорно-рухового апарату від норми з використанням акселерометрів є два параметри, на які можна вплинути: розміщення акселерометрів на тілі та швидкість ходи пацієнта. Акселерометри будуть розміщені на початку та середині грудних хребців для визначення кіфозу (рисунок 4.5), та симетрично на лопатках спини для визначення сколіозу (рисунок 4.6).

Для визначення наявності кіфозу, треба знайти кут нахилу лопаток відносно вертикальної осі за формулою:

$$K_{\text{кіфоз}} = \arctan \left(\frac{Z}{Y} \right) \quad (4.1)$$

де Z – вертикальна компонента положення акселерометра;

Y – горизонтальна компонента положення акселерометра.

Нормальним кутом нахилу є від 15 до 30 градусів, якщо кут нахилу більше, то діагностують різні ступені кіфозу. Результати обробки даних з акселерометрів для визначення кіфозу наведено в таблиці 4.9.



Рисунок 4.5 – Розміщення акселерометрів для визначення кіфозу

Таблиця 4.9 – Результати використання акселерометрів методів для виявлення кіфозу

	Кут нахилу	
	Швидкість ходи до 50 кроків на хвилину	Швидкість ходи до 100 кроків на хвилину
Контрольний експеримент (нормальне положення корпусу)	20°	30°
Експеримент з відхиленням (при корпусі із нахилом)	41°	54°

Результатами досліджень з визначення кіфозу є те, що використання акселерометрів з високою точністю визначає чи присутнє відхилення у пацієнта чи ні, також з результатів видно залежність збільшення кута нахилу від швидкості, яку треба враховувати при аналізі даних.

Для проведення дослідів з виявлення сколіозу будуть використовуватись ті самі дані з акселерометрів, а саме дані кутів, які можна застосувати для визначення ступеню сколіозу або коефіцієнту асиметрії:

$$K_{\text{асим}} = \frac{|L-R|}{\frac{L+R}{2}} \times 100\%, \quad (4.2)$$

де L – кут нахилу для лівої сторони;

R – кут нахилу для правої сторони.

Порахувавши коефіцієнт можна визначити ступіть сколіозу в пацієнта:

$K_{\text{асим}} \leq 5\%$ - нормальне значення, висока симетрія;

$5\% < K_{\text{асим}} \leq 15\%$ - помірна асиметрія, легка форма сколіозу;

$K_{\text{асим}} > 15\%$ - велика асиметрія, виражений сколіоз.

Результати обробки даних з акселерометрів для визначення сколіозу наведено в таблиці 4.10.



Рисунок 4.6 – Розміщення акселерометрів для визначення сколіозу

Таблиця 4.10 – Результати використання акселерометрів методів для виявлення сколіозу

	Коефіцієнт асиметрії	
	Швидкість ходи до 50 кроків на хвилину	Швидкість ходи до 100 кроків на хвилину
Контрольний експеримент (нормальне положення корпусу)	1.5%	3%
Експеримент з відхиленням (при корпусі із нахилом)	8.2%	13.5%

З наведених результатів досліджень з виявлення сколіозу видно, що використання акселерометрів з високою точністю визначає чи присутнє

відхилення, чи ні. Як і в експериментах з виявлення кіфозу видно залежність результуючих даних від швидкості руху пацієнта, тому при майбутньому аналізі треба також враховувати збільшення коефіцієнта асиметрії за рахунок швидкості переміщення пацієнта.

Використання акселерометрів показало, що їх використання дає достатньо точні дані при малій залежності від умов зовнішнього середовища, але для отримання такого аналізу потрібно ряд умов, а саме: наявність мінімум пари акселерометрів, точне їх встановлення на зазначених точках тіла пацієнта, попередній збір даних без можливості отримати результат одразу. Незважаючи на недоліки використання акселерометрів, висока точність отриманого аналізу дозволяє використовувати не тільки як самостійний метод для виявлення відхилень опорно-рухового апарату в пацієнта, так і для збільшення точності результатів візуальних методів отримання та аналізу даних.

4.3 Аналіз методу комбінованої обробки даних про стан суглобів пацієнтів

Кожен з досліджених методів має свої сильні та слабкі сторони, але ключовими особливостями є швидка обробка у безмаркерного методу та висока точність у акселерометрів при незалежності від таких умов, як інтенсивність освітлення та однотонність фону відеозапису. Якщо поєднати ці два методи, то це забезпечить підвищення точності вимірювання та аналізу, стійкість до зовнішніх факторів. Але при сумісному використанні фінальний аналіз можна отримати тільки після обробки даних з відеозапису та акселерометрів, що означає неможливість отримання результату в реальному часі.

Повернувшись до результатів дослідження безмаркерного методу можна побачити, що найменша похибка, яка була досягнена це 9% (таблиця 4.2 та 4.6). Так як фреймворк MediaPipe працює з кольоровими зображеннями, окрім покращення умов зйомки, можна використати методи

покращення контрасту (CLAHE) та фільтрації шумів (Gaussian Blur). Для перевірки, наскільки дані модифікації покращать точність аналізу, проведемо експеримент в найкращих умовах освітлення, однотонного фону, при швидкості пацієнта до 100 кроків на хвилину, результати виявлення кіфозу наведено в таблиці 4.11.

Таблиця 4.11 – Результати використання модифікованого безмаркерного методу для виявлення кіфозу

	Час обробки одного кадру, мс	Кількість правильно визначених кадрів	Похибка
Контрольний експеримент	48	141	6%
Експеримент з відхиленням	48	142	6%

Результати експериментів з визначення сколіозу за допомогою модифікованої програми наведено в таблиці 4.12.

Таблиця 4.12 – Результати використання модифікованого безмаркерного методу для виявлення сколіозу

	Час обробки одного кадру, мс	Кількість правильно визначених кадрів	Похибка
Контрольний експеримент	48	142	6%
Експеримент з відхиленням	48	140	6%

З результатів експериментів можна побачити, що похибка визначення відхилень опорно-рухового апарату від норми при використанні безмаркерних методів зменшилась до 6%, що є значним покращенням від попереднього кращого результату.

Для сумісного використання безмаркерного методу та акселерометрів, треба синхронізувати отриманні дані, що можна зробити за часовою

інформацією. В наборі даних, отриманих з акселерометрів, також присутні дані про час фіксації показників кожного з акселерометрів, відповідно можна з цих даних про час прив'язуватись до конкретного кадру зйомки. Тепер можна порахувати похибку при використанні комбінованого аналізу з використанням безмаркерного методу та акселерометру:

$$P_{\text{комб}} = \frac{\omega_a \times P_a + \omega_b \times P_b}{\omega_a + \omega_b}, \quad (4.3)$$

де ω_a – частота збору даних акселерометрів;

ω_b – частота зйомки відеозапису;

P_a – похибка роботи акселерометрів;

P_b – похибка визначення безмаркерного методу.

Відеозйомка велася з частотою в 30 кадрів на секунду, акселерометри збирають дані в середньому кожні 140 мілісекунд (7 вибірок на секунду). Акселерометри не можуть працювати зі 100% точністю, тому припустивши, що їхня похибка буде 1% можна провести розрахунок загальної похибки:

$$P_{\text{комб}} = \frac{7 \cdot 1 + 30 \cdot 6}{7 + 30} = \frac{187}{37} \approx 5.05\% \quad (4.4)$$

Результатом комбінування використання безмаркерного методу та акселерометрів дозволило зменшити похибку виявлення відхилення опорно-рухового апарату від норми до 5%, збільшити стійкість до зовнішніх факторів.

Таким чином, комбінований підхід демонструє високу ефективність для аналізу рухів у реабілітаційній ортопедії, що дозволяє розширити можливості як для діагностики, так і для моніторингу процесу лікування пацієнтів. Результати експериментів підтверджують доцільність його подальшого вдосконалення та впровадження у практику. Проте безмаркерний метод аналізу та використання акселерометрів можуть мати доцільне окреме використання за рахунок своїх переваг та недоліків (таблиця 4.13).

Таблиця 4.13 – Обґрунтування ефективності комбінованої обробки даних про стан суглобів пацієнтів

Метод	Переваги	Недоліки	Рекомендоване застосування
Безмаркерний метод	Не потребує спеціального обладнання; Швидкість аналізу; Мінімальні витрати на впровадження.	Висока залежність від освітлення та фону.	Для початкового аналізу в умовах гарного освітлення.
Використання акселерометрів	Висока точність вимірювань; Незалежність від освітлення та фону.	Не працює в реальному часі; Складність у встановленні та калібруванні.	Для моніторингу рухів у складних умовах (погане освітлення, зашумлений фон).
Комбінований метод	Висока точність вимірювань; Висока стійкість до зовнішніх факторів. Комплексний аналіз рухів.	Не працює в реальному часі; Складність синхронізації даних.	Для точного аналізу складних випадків та створення індивідуальних програм.

Повторне визначення переваг та недоліків методів аналізу відхилень опорно-рухового апарату дозволило визначити умови, при яких можна використовувати кожен з них. Комбіноване використання методів є найбільш ефективним для реабілітаційної ортопедії, що відкриває можливості для розробки комплексних систем аналізу рухів, які можуть забезпечувати високу точність діагностики, адаптацію до індивідуальних потреб пацієнтів та можливість дистанційного моніторингу. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на впровадження алгоритмів машинного навчання для автоматизації аналізу та адаптацію систем для роботи в реальному часі.

ВИСНОВКИ

У межах кваліфікаційної роботи було проведено дослідження систем комп'ютерного зору для їхнього застосування в реабілітаційній ортопедії. Основна увага зосереджувалася на аналізі методів захоплення рухів антропометричних об'єктів, оцінці ефективності безмаркерних методів у порівнянні з використанням акселерометрів, а також їхньому комбінуванні для підвищення точності результатів.

Аналіз безмаркерних методів та використання акселерометрів показав, що безмаркерні методи забезпечують швидкість обробки даних і підходять для широкого спектра застосувань, але їх точність залежить від зовнішніх факторів, та використання акселерометрів демонструє високу точність незалежно від умов, але вимагають правильного калібрування та більший час на обробку даних.

Було виявлено, що покращення освітлення, використання простого однотонного фону та впровадження додаткових алгоритмів обробки (фільтрація шумів, покращення контрасту) знижують похибку безмаркерного методу до 6%. Інтеграція даних акселерометрів із відеозйомкою дозволила досягти комбінованої похибки на рівні 5.05%, що свідчить про переваги сумісного використання методів.

Впровадження алгоритмів машинного навчання для покращення аналізу рухів може додатково оптимізувати точність і швидкість обробки. Запропонована методика може бути використана для:

- діагностики та моніторингу стану пацієнтів у реабілітаційних центрах;
- віддаленого спостереження за пацієнтами, що забезпечує доступ до якісної реабілітації в умовах обмеженої мобільності.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Kiro, L., Urbanovych, A., & Zak, M. (2024). Intervention impact on quality of life in Ukrainians with post-traumatic stress disorder. *BMC psychology*, 12(1), 601.
2. Ko, S., Pareek, A., Ro, D. H., Lu, Y., Camp, C. L., Martin, R. K., & Krych, A. J. (2022). Artificial intelligence in orthopedics: three strategies for deep learning with orthopedic specific imaging. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*, 1-4.
3. Prijs J, Liao Z, Ashkani-Esfahani S, et al. Artificial intelligence and computer vision in orthopaedic trauma. *Bone Joint J.* 2022;104-B(8):911-914. doi:10.1302/0301-620X.104B8.BJJ-2022-0119.R1.
4. Fan, X., Zhu, Q., Tu, P., Joskowicz, L., & Chen, X. (2023). A review of advances in image-guided orthopedic surgery. *Physics in Medicine & Biology*, 68(2), 02TR01. DOI 10.1088/1361-6560/acaae9.
5. Bakhtiyar Saidovich Rakhimov, ., Feroza Bakhtiyarovna Rakhimova, ., Sabokhat Kabulovna Sobirova, ., Furkat Odilbekovich Kuryazov , ., & Dilnoza Boltabaevna Abdirimova, . (2021). Review And Analysis Of Computer Vision Algorithms. *The American Journal of Applied Sciences*, 3(5), 245–250. <https://doi.org/10.37547/tajas/Volume03Issue05-39>.
6. Shapiro, L. G. (2020). Computer vision: the last 50 years. *International Journal of Parallel, Emergent and Distributed Systems*, 35(2), 112-117.
7. Voulodimos, A., Doulamis, N., Doulamis, A., & Protopapadakis, E. (2018). Deep learning for computer vision: A brief review. *Computational intelligence and neuroscience*, 2018(1), 7068349.
8. Esteva, A., Chou, K., Yeung, S. et al. Deep learning-enabled medical computer vision. *npj Digit. Med.* 4, 5 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41746-020-00376-2>.

9. Elyan E, Vuttipittayamongkol P, Johnston P, Martin K, McPherson K, Moreno-García CF, Jayne C, Mostafa Kamal Sarker M. Computer vision and machine learning for medical image analysis: recent advances, challenges, and way forward. *Art Int Surg*. 2022;2:24-45. <http://dx.doi.org/10.20517/ais.2021.15>.

10. Moro, M., Marchesi, G., Hesse, F., Odone, F., & Casadio, M. (2022). Markerless vs. marker-based gait analysis: A proof of concept study. *Sensors*, 22(5), 2011.

11. Rozé, J., Aramaki, M., Kronland-Martinet, R., & Ystad, S. (2018). Assessing the effects of a primary control impairment on the cellists' bowing gesture inducing harsh sounds. *IEEE Access*, 6, 43683-43695.

12. D'Antonio, E., Taborri, J., Palermo, E., Rossi, S., & Patanè, F. (2020, May). A markerless system for gait analysis based on OpenPose library. In *2020 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)* (pp. 1-6). IEEE.

13. Homes, R., Clark, D., Moridzadeh, S., Tosovic, D., Van den Hoorn, W., Tucker, K., & Midwinter, M. (2023). Comparison of a wearable accelerometer/gyroscopic, portable gait analysis system (LEGSYS+™) to the laboratory standard of static motion capture camera analysis. *Sensors*, 23(1), 537.

14. 1. Коробко В.Ю., Барковська О.Ю. Дослідження системи комп'ютерного зору для реалізації в реабілітаційній ортопедії. // Проблеми інформатизації : XII міжнародна науково-технічна конференція. - 21-22 листопада 2024. –с.72. doi: <https://doi.org/10.32620/PI.24.t2>

15. 2. Olesia Barkovska, Dmytro Oliinyk, Oleksandr Ruskikh, Volodymyr Korobko, Peter Sedlacek (2024). Study of methods for detecting optical markers in the system of human gait and posture analysis. *Advanced Information Systems*, 9(4).