

Голові разової спеціалізованої
вченої ради
Західноукраїнського національного
університету
доктору технічних наук
Манжулі Володимирі Івановичу

ВІДГУК

**офіційного опонента – доктора технічних наук, професора,
завідувача кафедри програмного забезпечення Вінницького
національного технічного університету
Романюка Олександра Никифоровича
на дисертаційну роботу Цапів Ярослава Андрійовича
на тему «Математичне та програмне забезпечення реабілітаційної
арт-терапії верхніх кінцівок пацієнтів на основі AR-технологій», подану
на здобуття ступеня доктора філософії
в галузі знань 12 Інформаційні технології
за спеціальністю 121 Інженерія програмного забезпечення**

Актуальність теми дисертаційного дослідження.

Тема дисертаційної роботи Цапів Ярослава Андрійовича «Математичне та програмне забезпечення реабілітаційної арт-терапії верхніх кінцівок пацієнтів на основі AR-технологій» є актуальною, оскільки спрямована на розв'язання важливого науково-прикладного завдання – підвищення об'єктивності, персоналізації та результативності фізичної реабілітації засобами сучасних інформаційних технологій.

Особливої гостроти ця проблема набула в Україні в умовах повномасштабної війни. Значна кількість військовослужбовців і цивільних осіб зазнає мінно-вибухових, вогнепальних, уламкових та інших травм, наслідками яких є порушення функцій опорно-рухового апарату, обмеження

рухливості суглобів, ураження периферичних нервів, ампутації та потреба у тривалому відновленні. Всесвітня організація охорони здоров'я констатує постійне зростання в Україні попиту на лікування травм і реабілітаційну допомогу та характеризує навантаження на систему охорони здоров'я як безпрецедентне.

Масштаб задачі підтверджується державними планами розвитку реабілітаційної мережі. В Україні передбачено створення реабілітаційних відділень, у яких має функціонувати понад 5250 реабілітаційних ліжок. Розрахункова спроможність цієї мережі становить щонайменше 126 тисяч пацієнтів на рік. Навіть такі значні заплановані потужності свідчать про надзвичайно високий і довготривалий попит на реабілітацію.

Важливою задачею фізичної реабілітації залишається об'єктивне визначення діапазону рухливості суглобів. Традиційне вимірювання механічним гоніометром є трудомістким, залежить від досвіду фізичного терапевта та може супроводжуватися похибками. Високоточні маркерні системи захоплення рухів, своєю чергою, є дорогими, потребують спеціально обладнаного приміщення та складної підготовки пацієнта. Тому розроблення доступної безмаркерної системи автоматичного визначення кутів суглобів за звичайними відеопотоками є актуальним як з наукової, так і з практичної точки зору.

У дисертації запропоновано поєднати трикамерний відеоаналіз, нейромережеве визначення анатомічних точок, адаптивну фільтрацію, інтервальне прогнозування динаміки відновлення та AR-арт-терапію. Такий підхід дає змогу перейти від суб'єктивного періодичного оцінювання до автоматизованого цифрового супроводу реабілітації. Система не лише вимірює кути рухливості, а й накопичує дані, прогнозує подальшу динаміку та підтримує корекцію терапевтичного протоколу. Саме інтеграція відповідних складових у замкнений цикл «виконання вправи – вимірювання – прогнозування – рекомендація – адаптація терапевтичного завдання» становить одну з найбільш актуальних рис дослідження.

Важливим є використання арт-терапії та доповненої реальності. Тривала реабілітація часто супроводжується зниженням мотивації пацієнтів, монотонністю вправ і передчасним припиненням занять. Перетворення терапевтичних рухів на творчу діяльність у середовищі доповненої реальності потенційно підвищує залученість пацієнта, водночас зберігаючи можливість спостерігати реальне оточення, власні кінцівки та фізичного терапевта. Це має особливе значення для безпечного проведення занять із пацієнтами, які мають обмеження рухливості.

Отже, актуальність дисертаційної роботи визначається:

- масштабним зростанням потреб населення України у фізичній реабілітації внаслідок війни;
- недостатнім фактичним охопленням пацієнтів післягострою та довготривалою реабілітаційною допомогою;
- дефіцитом фахівців і значним навантаженням на реабілітаційні заклади;
- необхідністю об'єктивного автоматизованого вимірювання рухливості суглобів;
- потребою у персоналізованому прогнозуванні перебігу відновлення;
- необхідністю підвищення мотивації пацієнтів до систематичного виконання вправ;
- доцільністю створення доступних програмних засобів для клінічної та потенційно дистанційної реабілітації.

З огляду на наведене, розроблення математичного та програмного забезпечення AR-системи реабілітаційної арт-терапії верхніх кінцівок є своєчасним і суспільно значущим завданням. Робота відповідає актуальним потребам системи охорони здоров'я України та сучасним тенденціям розвитку інженерії програмного забезпечення, цифрової медицини, комп'ютерного зору й інтелектуальних систем підтримки рішень.

Аналіз змісту дисертації

Дисертаційна робота має логічно завершену структуру, зумовлену метою, поставленими завданнями, об'єктом і предметом дослідження. Робота складається зі вступу, чотирьох взаємопов'язаних розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Послідовність викладення матеріалу забезпечує поступовий перехід від теоретичного осмислення досліджуваної задачі до обґрунтування методичних положень, аналізу отриманих результатів та розроблення практичних рекомендацій.

У першому розділі проведено детальний аналіз методів і програмних засобів автоматичного вимірювання кутів суглобів та прогнозування динаміки реабілітації. Розглянуто контактні методи гоніометрії (механічні гоніометри з точністю 5–10°, цифрові інклінометри, IMU-системи), маркерні системи захоплення руху (Vicon, OptiTrack), які вважаються основним стандартом, але є надто дорогими для широкого клінічного використання, та безмаркерні системи оцінки пози на основі глибокого навчання (OpenPose, BlazePose, MediaPipe Pose Landmarker, MoveNet, ViTPose, YOLOv8-pose), основними проблемами яких залишаються шум координат, проекційна похибка та потреба у багатокамерній тріангуляції. Проаналізовано мета-аналізи ефективності VR/AR-технологій у реабілітації верхніх кінцівок, методи прогнозування динаміки відновлення (регресійний аналіз, ARIMA, нейронні мережі) з їх обмеженнями на коротких клінічних вибірках з 10–20 сеансів, а також системи рекомендацій у фізичній терапії.

Порівняльний аналіз існуючих VR/AR-платформ реабілітації (Vidnova, RAPAEEL Smart Glove, Tyromotion, MindMotion GO), узагальнений у табличній формі, виявив критичний розрив: жодна з систем не інтегрує одночасно безмаркерну багатокамерну гоніометрію, інтервальне прогнозування, AR-арт-терапію та рекомендаційну систему у замкненому адаптивному циклі. На цій основі здійснено постановку науково-технічного завдання, сформульовано завдання дослідження та обґрунтовано доцільність

застосування інтервального підходу з ідентифікацією на основі алгоритму бджолиної колонії.

У другому розділі розроблено математичне забезпечення системи. Запропоновано метод безмаркерної гоніометрії на основі аналізу трьох відеопотоків, який поєднує нейромережевий детектор анатомічних точок YOLOv8-pose з OpenVINO-прискоренням, ансамбль адаптивних OneEuro-фільтрів для згладжування координат (тремор менше одного пікселя у стаціонарному режимі та відгук за один кадр при різких рухах) та алгоритм геометричного злиття вимірювань від трьох ортогонально розташованих камер із пріоритизацією на основі площин руху. Запропонований метод зменшує проекційну похибку вимірювання кутів із $30\text{--}50^\circ$ до $3\text{--}5^\circ$ і забезпечує середню абсолютну похибку менше 4° , що знаходиться в межах мінімальної клінічно значущої різниці.

У цьому ж розділі на основі адаптованих методів структурної та параметричної ідентифікації з використанням алгоритму бджолиної колонії побудовано інтервальні дискретні динамічні моделі динаміки відновлення кутів рухливості плечового суглоба у вигляді різницевих рівнянь: модель згинання третього порядку та моделі розгинання і відведення четвертого порядку. Побудовані моделі забезпечують стовідсоткове покриття експериментальних спостережень і клінічно прийнятну точність прогнозування за 3–4 попередніми сеансами. Завершує розділ опис адаптивного циклу «виконання – вимірювання – прогноз – рекомендація – корекція зображення – адаптація рухів», що реалізує замкнений контур керування реабілітаційним процесом.

У третьому розділі спроектовано мікросервісну архітектуру комплексної програмної системи: мікросервіс аналізу трьох відеопотоків на Python, мікросервіс інтервального прогнозування на C++ та мікросервіс рекомендацій на основі генеративного штучного інтелекту, оркестровані центральним сервером на NestJS із базою даних PostgreSQL, а також AR-застосунок арт-терапії для гарнітури Magic Leap 2 на Unity та вебзастосунок

фізіотерапевта на React. Взаємодію компонентів організовано через чотири незалежні канали даних (REST API, WebSocket, WebRTC P2P та канал прогнозування); основні компоненти функціонують у локальній мережі реабілітаційного кабінету, а зовнішнє інтернет-з'єднання використовується лише рекомендаційним модулем для генерації терапевтичних зображень.

Архітектурні рішення підкріплено UML-діаграмами структури та взаємодії компонентів; передбачено можливості розширення системи — додавання нових типів сенсорів, заміну AR-гарнітури завдяки підтримці відкритого стандарту OpenXR та інтеграцію з електронними медичними записами через HL7 FHIR. У AR-застосунку реалізовано механізми просторового позиціонування робочої зони, тактильної компенсації при взаємодії з віртуальним полотном та рендерингу текстур малювання.

У четвертому розділі наведено результати програмної реалізації та клінічної апробації системи на даних п'яти пацієнтів КНП «Тернопільська обласна клінічна лікарня» Тернопільської обласної ради. На навчальній групі з трьох пацієнтів ідентифіковано інтервальні моделі для трьох ключових рухів плечового суглоба; на прогнозній групі з двох пацієнтів апробовано адаптивний цикл прогнозування та корекції терапевтичного протоколу. Інтервальна модель виявила неоптимальну динаміку відновлення вже після трьох сеансів і сформувала негативний прогноз досягнення нормативного діапазону, після чого рекомендаційна система запропонувала зміну терапевтичного зображення. Після корекції середній темп приросту кута згинання зріс у 1,9–3,9 рази, прогнозована кількість сеансів до нормативного діапазону скоротилася на 11,8–12,5%, а прогнозоване значення кута після стандартних десяти сеансів покращилося на 6,8–10,3°. Описано також реалізацію багатоступеневого AI-контуру генерації персоналізованого арт-терапевтичного контенту, в якому велика мовна модель перетворює семантичну рекомендацію на запит до генеративної моделі для створення нового контурного зображення.

У загальних висновках узагальнено основні наукові та практичні результати дисертаційної роботи. Висновки структуровано відповідно до поставлених завдань, що дає змогу простежити повноту їх виконання та ступінь досягнення мети дослідження; підтверджено функціональну завершеність комплексної системи AR-реабілітації та практичну реалізацію замкненого контуру керування реабілітаційним процесом.

Оцінка обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій дисертаційної роботи є достатнім. Сформульовані положення спираються на ґрунтовний аналіз сучасних методів автоматичної гоніометрії, комп'ютерного зору, інтервального моделювання, технологій доповненої реальності та програмної інженерії. Достовірність отриманих результатів забезпечується коректним використанням математичних і програмних методів, експериментальною перевіркою точності безмаркерного вимірювання кутів, побудовою інтервальних моделей на реальних даних та реалізацією всіх складових у вигляді функціонально завершеної програмної системи. Загальні висновки відповідають поставленим завданням і змісту розділів дисертації.

При вирішенні поставлених у дисертаційній роботі задач, створенні наукових положень, висновків та рекомендацій здобувачем застосовані дані, які одержані з літературних джерел, а саме використана теорія цифрової обробки інформації, методи технічного зору, математичної статистики та дискретної математики; методи математичного та імітаційного моделювання.

Висновки дисертації закономірно витікають з основних наукових положень, що захищаються автором, сформульовані коротко, мають безперечне наукове і практичне значення.

Достовірність наукових положень, висновків, сформульованих у дисертаційній роботі, підтверджуються збігом результатів, отриманих

запропонованими методами, з результатами експериментальних досліджень і підтверджуються успішним впровадженням результатів у промисловість та в навчальний процес.

Дотримання вимог академічної доброчесності та повнота викладу наукових результатів в опублікованих працях

Аналіз дисертаційної роботи та переліку публікацій здобувача дає підстави вважати, що основні вимоги академічної доброчесності дотримано. Запозичені положення та результати інших дослідників супроводжуються бібліографічними посиланнями, особистий внесок здобувача в роботах, опублікованих у співавторстві, конкретизовано.

Основні результати дисертації викладено у дев'яти наукових працях, серед яких чотири статті, що висвітлюють основні наукові результати, і п'ять праць апробаційного характеру. Тематика публікацій охоплює автоматичну гоніометрію, трикамерний відеоаналіз, AR-арт-терапію, архітектуру програмної системи, рекомендаційну підтримку та адаптивний цикл реабілітації. Отже, опубліковані праці загалом достатньо повно відображають основні положення і результати дисертації.

Наукова новизна отриманих результатів

У дисертації вперше розроблено інтервальні математичні моделі динаміки відновлення кутів рухливості плечового суглоба на основі адаптованих методів структурної та параметричної ідентифікації, що дають змогу прогнозувати перебіг реабілітації за 3–4 сеансами; вперше запропоновано комплексну архітектуру медичної реабілітаційної програмної системи на основі оркестрації мікросервісів, застосування арт-терапії для AR-гарнітури та вебзастосування фізіотерапевта, що забезпечує зменшення тривалості повного циклу реабілітації в середньому на 12%; удосконалено метод безмаркерної гоніометрії з адаптивною фільтрацією та геометричним злиттям вимірювань трьох камер; набула подальшого розвитку інформаційна

технологія реабілітаційної арт-терапії з генерацією персоналізованого терапевтичного контенту. Положення новизни сформульовано коректно, їх зміст підтверджений матеріалами роботи та публікаціями здобувача.

Практична цінність дисертаційної роботи

Практична цінність дисертаційної роботи полягає у розробці та апробації алгоритмів і програмних засобів в складі комплексної програмної системи реабілітаційної арт-терапії верхніх кінцівок на основі технологій доповненої реальності, яка забезпечує автоматизоване вимірювання кутів рухливості суглобів, прогнозування динаміки відновлення та підтримку корекції терапевтичного протоколу. Розроблена система забезпечує об'єктивний контроль рухливості суглобів, накопичення та візуалізацію результатів реабілітації, раннє виявлення неоптимальної динаміки та підтримку корекції терапевтичного протоколу. Реалізований AR-застосунок арт-терапії для гарнітури Magic Leap 2 забезпечує виконання пацієнтом терапевтичних рухів у формі творчих завдань у середовищі доповненої реальності. Це сприяє підвищенню мотивації та залученості пацієнта до тривалого реабілітаційного процесу, а також дає змогу адаптувати просторове розташування, масштаб і складність терапевтичних зображень відповідно до поточних рухових можливостей.

Практична цінність підтверджується впровадженням результатів роботи:

- у процес проведення реабілітаційних сеансів КНП «Тернопільська обласна клінічна лікарня» Тернопільської обласної ради;
- у науково-дослідну роботу кафедри фізичної терапії, ерготерапії та фізичного виховання Тернопільського національного медичного університету імені І. Я. Горбачевського;
- у виробничий процес Тернопільської філії ТОВ «ЕЛЕКС» під час розроблення рішень у сфері AR/VR-застосунків;

- в освітній процес кафедри комп'ютерних наук Західноукраїнського національного університету під час викладання дисциплін, пов'язаних з архітектурою програмного забезпечення, інтелектуальним аналізом даних та інтервальними обчисленнями.

Відповідність теми спеціальності F2 «Інженерія програмного забезпечення»

Чинний стандарт третього освітньо-наукового рівня для спеціальності 121 визначає підготовку докторів філософії, здатних розв'язувати комплексні проблеми у сфері інженерії програмного забезпечення, розробляти нові методи, моделі, архітектури та технології створення програмних систем.

Відповідність роботи спеціальності F2 проявляється в таких основних аспектах.

По-перше, центральним об'єктом дослідження фактично є процеси створення, інтеграції та функціонування складної програмної системи, а не суто медичний процес реабілітації. Медична реабілітація виступає предметною галуззю апробації програмно-інженерних рішень.

По-друге, у роботі розв'язано типові для інженерії програмного забезпечення завдання: сформовано вимоги до розподіленої медичної системи, спроектовано мікросервісну архітектуру та інтерфейси взаємодії, інтегровано різноманітні технології, реалізовано оброблення відеопотоків у реальному часі, AR- і вебінтерфейси, математичні моделі та генеративний штучний інтелект, а також проведено експериментальну перевірку програмного комплексу.

По-третє, складовою дослідження є програмна реалізація математичних методів. Зокрема, методи фільтрації координат, геометричного злиття вимірювань, інтервальної ідентифікації та прогнозування не залишаються лише теоретичними конструкціями, а інкапсулюються у

відповідних програмних модулях і використовуються в наскрізному робочому процесі.

По-четверте, дисертація демонструє міждисциплінарність, характерну для сучасної інженерії програмного забезпечення. Вона поєднує програмну архітектуру, комп'ютерний зір, доповнену реальність, інтервальні обчислення, штучний інтелект, оброблення поточкових даних та людино-комп'ютерну взаємодію. При цьому результатом є не медична методика як така, а програмно-інформаційна технологія її підтримки.

Отже, тема, поставлені завдання, застосовані методи та отримані результати відповідають предметній галузі спеціальності F2.

Дискусійні положення та зауваження.

Відзначаючи високий науково-технічний рівень виконаного дослідження, вважаю за доцільне звернути увагу на такі дискусійні положення та зауваження:

1. Апробацію системи проведено на даних п'яти пацієнтів, із яких три використано для побудови моделей, а два – для перевірки адаптивного циклу. Такий обсяг недостатній для формулювання узагальнених висновків щодо клінічної ефективності розробленої системи.

2. Вибір трьох ортогонально розташованих камер не отримав достатнього теоретичного та експериментального обґрунтування. Не встановлено, чи є саме така конфігурація оптимальною, яким є допустиме відхилення камер від ортогонального положення та як похибки монтажу впливають на точність.

3. Під час рухів плеча можливі компенсаторні рухи лопатки, тулуба і шийного відділу, які можуть збільшувати вимірний кут без реального покращення рухливості цільового суглоба. У дисертації не показано, як система розпізнає та виключає такі компенсації.

4. Показник частоти оброблення відео не дає цілісного уявлення про продуктивність комплексу. Доцільно було б навести наскрізну затримку від

отримання кадру до відображення результату, час відповіді кожного мікросервісу, використання процесора, пам'яті й мережі, пропускну здатність та стабільність роботи під тривалим навантаженням.

5. Для взаємодії пацієнта з віртуальним полотном застосовано механізм тактильної компенсації. Дискусійним є питання, чи розглядалися альтернативні канали зворотного зв'язку (звуковий, вібраційний) та їх можливий вплив на точність і природність рухів пацієнта під час арт-терапевтичної вправи.

6. Контурні зображення-розмальовки генеруються багатоступеневим AI-контуром на основі великої мовної та генеративної моделей. У роботі не описано формалізовану процедуру контролю якості та терапевтичної придатності згенерованого зображення до його використання у сеансі.

7. AR-застосунок арт-терапії реалізовано для гарнітури Magic Leap 2, яка є відносно дорогим пропрієтарним пристроєм. Не розглянуто можливість перенесення застосунку на масові AR/MR-гарнітури (Microsoft HoloLens 2, Meta Quest 3).

8. Не доведено перевагу інтервальних моделей над простішими методами прогнозування. Відсутнє порівняння з лінійною регресією, експоненціальним згладжуванням, авторегресійними моделями, гаусівськими процесами або навіть прогнозом за останнім спостереженням. Тому неможливо визначити, чи виправдана складність запропонованого математичного апарату та алгоритму бджолиної колонії.

Загальний висновок

Дисертаційна робота Цапів Ярослава Андрійовича «Математичне та програмне забезпечення реабілітаційної арт-терапії верхніх кінцівок пацієнтів на основі AR-технологій» є завершеною науковою працею, що вирішує актуальне науково-прикладне завдання підвищення ефективності реабілітації верхніх кінцівок пацієнтів шляхом розроблення математичного

та програмного забезпечення системи реабілітаційної арт-терапії на основі AR-технологій та автоматичної гоніометрії

За актуальністю обраної теми, обсягом та рівнем виконаних досліджень, новизною та ступенем обґрунтованості отриманих результатів, повнотою їх викладу в наукових публікаціях і відсутністю порушень академічної доброчесності дисертаційна робота відповідає вимогам чинного законодавства України, передбаченим пп. 6–9 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44, а її автор, Цапів Ярослав Андрійович, заслуговує присудження йому ступеня доктора філософії в галузі знань 12 Інформаційні технології за спеціальністю 121 Інженерія програмного забезпечення.

Офіційний опонент:

завідувач кафедри програмного забезпечення

Вінницького національного технічного університету,

доктор технічних наук, професор,

заслужений діяч науки і техніки України

Олександр РОМАНЮК



Вчений секретар
к.т.н., доцент

Олександр Романюк