

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

РЕЦЕНЗІЯ

кандидата технічних наук, доцента, доцента кафедри
комп'ютерних наук Західноукраїнського національного університету

Співак Ірини Ярославівни

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

1. Актуальність теми дисертаційної роботи. За даними Всесвітньої організації охорони здоров'я, понад 1 мільярд людей у світі потребують реабілітаційних послуг, а нейром'язово-скелетні порушення залишаються провідною причиною інвалідності в усіх регіонах світу. Для України ця проблема набула особливої гостроти в умовах збройної агресії, що спричинила стрімке зростання кількості осіб із порушеннями опорно-рухового апарату, зокрема верхніх кінцівок, які потребують тривалої та систематичної фізичної реабілітації.

Ключовим показником ефективності реабілітаційних програм є об'єктивне вимірювання кутів рухливості суглобів. Традиційні контактні методи гоніометрії забезпечують точність лише 5–10°, маркерні системи захоплення руху є надто дорогими для широкого клінічного застосування, а безмаркерні системи оцінки пози на основі глибокого навчання потребують

спеціальних засобів фільтрації шуму координат та компенсації проекційної похибки. Відтак завдання автоматизації об'єктивного контролю динаміки відновлення рухливості суглобів залишається невирішеним на рівні доступних клінічних інструментів.

Не менш важливою складовою ефективної реабілітації є прогнозування динаміки відновлення. Класичні стохастичні методи прогнозування — регресійний аналіз, моделі ARIMA, нейронні мережі — потребують значних обсягів навчальних даних, тоді як реальні клінічні вибірки обмежені 10–20 сеансами. За таких умов методологічно виправданим є застосування апарату аналізу інтервальних даних та методів структурної і параметричної ідентифікації інтервальних дискретних моделей, які природно враховують обмежену невизначеність вимірювань і працюють із короткими вибірками. Саме такий підхід, у поєднанні з метаевристичним алгоритмом на основі поведінкової моделі бджолиної колонії, покладено автором в основу математичного забезпечення системи.

Проведений здобувачем аналіз існуючих VR/AR-реабілітаційних платформ (Vidnova, RAPAE Smart Glove, Tyromotion, MindMotion GO) засвідчив, що жодна з них не поєднує водночас безмаркерну гоніометрію, інтервальне прогнозування динаміки відновлення, AR-арт-терапію та рекомендаційну систему у замкненому адаптивному циклі керування реабілітаційним процесом. Тому тема дисертаційної роботи, що спрямована на усунення цього розриву, є безумовно актуальною та практично значущою.

Дисертаційне дослідження виконувалось у Західноукраїнському національному університеті в межах науково-дослідних робіт «Математичне та програмне забезпечення прототипу біогазової установки з підвищеною ефективністю функціонування» (державний реєстраційний номер 0124U000076), «Інформаційна технологія забезпечення ефективної акумуляції електроенергії гібридною електростанцією» (державний реєстраційний номер 0126U002209) та «Математичне та програмне забезпечення функціонування

високоєфективної гібридної когенераційної установки» (державний реєстраційний номер 0126U002213), у яких здобувач був виконавцем.

2. Аналіз змісту дисертації. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертації. Дисертація є завершеною кваліфікаційною науковою працею, що складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел із 132 найменувань та восьми додатків.

У вступі обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету, завдання, об'єкт, предмет та методи дослідження, наведено положення наукової новизни і практичного значення, відомості про особистий внесок здобувача, апробацію та публікації.

У першому розділі виконано ґрунтовний аналітичний огляд методів і програмних засобів автоматичного вимірювання кутів суглобів (контактна гоніометрія, маркерні системи Vicon і OptiTrack, безмаркерні нейромережеві детектори пози OpenPose, BlazePose, MediaPipe, MoveNet, ViTPose, YOLOv8-pose), технологій VR/AR у фізичній реабілітації, методів прогнозування динаміки відновлення та систем рекомендацій у фізичній терапії. Розділ завершується коректною постановкою науково-технічного завдання та обґрунтуванням доцільності інтервального підходу до моделювання на коротких клінічних вибірках.

Другий розділ містить основні теоретичні результати роботи. Розроблено метод безмаркерної гоніометрії на основі аналізу трьох відеопотоків, у якому нейромережева детекція ключових анатомічних точок поєднана з ансамблем адаптивних OneEuro-фільтрів та алгоритмом геометричного злиття вимірювань від трьох ортогонально розташованих камер із пріоритизацією на основі площин руху. Такий підхід дав змогу зменшити проекційну похибку вимірювання кутів із 30–50° до 3–5° і забезпечити середню абсолютну похибку менше 4°, що знаходиться в межах мінімальної клінічно значущої різниці.

Особливої уваги заслуговує підхід до математичного моделювання динаміки відновлення. Моделі побудовано у вигляді інтервальних дискретних динамічних моделей (різницевих рівнянь), а їх ідентифікацію здійснено адаптованими методами структурної та параметричної ідентифікації з використанням алгоритму бджолиної колонії: структурна ідентифікація забезпечує вибір оптимального набору базисних функцій із множини лінійних елементів, їх добутків, відношень та комбінацій, а параметрична — знаходження інтервальних оцінок коефіцієнтів моделі. Застосування цього алгоритму є цілком виправданим, оскільки цільова функція задачі є недиференційовною і не допускає використання градієнтних процедур. Ідентифіковані моделі згинання (порядку $d = 3$) та розгинання і відведення (порядку $d = 4$) забезпечують стовідсоткове покриття експериментальних спостережень і середню абсолютну похибку прогнозу менше 5° . Завершує розділ опис адаптивного циклу «виконання — вимірювання — прогноз — рекомендація — корекція зображення — адаптація рухів».

У третьому розділі спроектовано мікросервісну архітектуру комплексної програмної системи: мікросервіс аналізу трьох відеопотоків на Python, мікросервіс інтервального прогнозування на C++, мікросервіс рекомендацій на основі генеративного штучного інтелекту, центральний сервер-оркестратор на NestJS із базою даних PostgreSQL, 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), а функціонування основних компонентів передбачено в локальній мережі реабілітаційного кабінету.

У четвертому розділі описано програмну реалізацію системи та її клінічну апробацію на даних п'яти пацієнтів КНП «Тернопільська обласна клінічна лікарня» ТОО. На навчальній групі з трьох пацієнтів ідентифіковано інтервальні моделі для трьох ключових рухів плечового суглоба, а на прогнозній групі з двох пацієнтів апробовано адаптивний цикл: після корекції

терапевтичного зображення середній темп приросту кута згинання зріс у 1,9–3,9 рази, а прогнозована кількість сеансів до нормативного діапазону скоротилася на 11,8–12,5%.

Висновки до розділів та загальні висновки логічно узагальнюють отримані результати і відповідають поставленим завданням. Додатки містять програмні реалізації, результати ідентифікації інтервальних моделей, список публікацій та акти впровадження.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків та рекомендацій забезпечується коректним застосуванням методів інтервального аналізу і теорії ідентифікації, обчислювальної геометрії та адаптивної фільтрації сигналів, узгодженістю результатів обчислювальних експериментів із даними клінічної апробації, порівнянням запропонованих рішень із відомими з літератури, а також успішною програмною реалізацією та впровадженням розроблених засобів.

3. Наукова новизна одержаних результатів. У дисертаційній роботі здобувачем самостійно одержано такі нові наукові результати:

1) вперше розроблено інтервальні математичні моделі динаміки відновлення кутів рухливості плечового суглоба з використанням адаптованих методів структурної та параметричної ідентифікації дискретних динамічних моделей, які дають змогу прогнозувати значення кутів на основі 3–4 попередніх сеансів терапії та забезпечити адаптивну корекцію терапевтичного протоколу, підвищуючи ефективність реабілітації шляхом раннього виявлення неоптимальної динаміки відновлення;

2) вперше запропоновано комплексну архітектуру медичної реабілітаційної програмної системи, яка, на відміну від існуючих, базується на оркестрації мікросервісів аналізу трьох відеопотоків з пріоритизацією, прогнозування та рекомендацій на основі генеративного штучного інтелекту, а також застосунку арт-терапії для гарнітури Magic Leap 2 і вебзастосунку фізіотерапевта, що забезпечує зменшення тривалості повного циклу реабілітації в середньому на 12%;

3) удосконалено метод безмаркерної гоніометрії на основі аналізу трьох відеопотоків, який базується на адаптивній фільтрації координат ключових анатомічних точок та алгоритмі геометричного злиття вимірювань від трьох ортогонально розташованих камер із пріоритизацією на основі площин руху, що забезпечує зменшення проекційної похибки вимірювання кутів суглобів до клінічно прийнятного рівня;

4) набула подальшого розвитку інформаційна технологія реабілітаційної арт-терапії, яка, на відміну від існуючих рішень, побудована на основі програмно-апаратних засобів із функціями автоматичної безмаркерної гоніометрії, інтервального прогнозування динаміки відновлення рухливості суглобів та генерації персоналізованого терапевтичного контенту, що забезпечує реалізацію повного циклу від автоматичного вимірювання до адаптивної корекції протоколу реабілітації.

Наведені положення наукової новизни є достатньо обґрунтованими, підтверджені результатами обчислювальних експериментів та клінічної апробації і відображені в опублікованих працях здобувача.

4. Оформлення дисертації, дотримання вимог академічної доброчесності та повнота викладу наукових результатів в опублікованих працях. Повний обсяг дисертації становить 236 сторінок, з них 164 сторінки основного тексту. Робота містить 25 рисунків, 16 таблиць, список використаних джерел із 132 найменувань та 8 додатків. Дисертацію написано українською мовою грамотно, науковий стиль викладення є чітким і послідовним, застосована термінологія — загальноновживаною; оформлення роботи відповідає чинним вимогам до дисертацій на здобуття ступеня доктора філософії.

Ознак порушення академічної доброчесності — текстових запозичень без посилань на джерела, фабрикації чи фальсифікації результатів — у роботі не виявлено; по всьому тексту простежується авторський стиль. Заслуговує на схвалення наведена у вступі декларація про використання інструментів

штучного інтелекту з чітким окресленням меж їх застосування та прийняттям автором повної відповідальності за зміст роботи.

Основні результати дослідження опубліковано у 9 наукових працях, серед яких 4 статті у фахових періодичних виданнях (1 стаття у закордонному виданні, що індексується наукометричною базою Scopus та віднесене до квартиля Q2, і 3 статті у виданнях України категорії «Б») та 5 публікацій у матеріалах наукових конференцій, 2 з яких індексуються базою Scopus. Результати роботи апробовано на міжнародних конференціях АСІТ-2024 (Чехія) та АСІТ-2025 (Хорватія), а також на школах-семінарах СІТ (ЗУНУ, 2023–2026 рр.). Опубліковані праці повністю відображають зміст дисертації.

5. Практичне значення результатів дисертації. Практичне значення отриманих результатів полягає у створенні комплексної програмної системи реабілітаційної арт-терапії на основі AR-технологій, яка забезпечує автоматичне об'єктивне вимірювання кутів рухливості суглобів, побудову інтервальних прогнозних моделей динаміки відновлення, формування рекомендацій фізіотерапевту та генерацію персоналізованого арт-терапевтичного контенту.

Результати дисертаційної роботи впроваджено у процес проведення реабілітаційних сеансів КНП «Тернопільська обласна клінічна лікарня» ТОР (скорочення курсу реабілітації в середньому на 12%), 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» та в освітній процес кафедри комп'ютерних наук ЗУНУ, що підтверджено відповідними актами і довідками про впровадження.

6. Зауваження та дискусійні положення щодо змісту дисертації. Позитивно оцінюючи дисертаційну роботу загалом, її науковий рівень та практичну спрямованість, вважаю за необхідне висловити такі зауваження та дискусійні положення:

1. Для структурної та параметричної ідентифікації інтервальних моделей динаміки відновлення застосовано метаевристичний алгоритм на основі поведінкової моделі бджолоїної колонії. Його вибір обґрунтовано переважно посиланнями на літературні джерела, водночас у другому розділі бракує кількісного порівняння ефективності цього алгоритму з іншими метаевристиками (генетичним алгоритмом, методом рою часток, диференціальною еволюцією) безпосередньо на задачі ідентифікації моделей динаміки відновлення кутів рухливості суглобів.

2. Потребує детальнішого висвітлення процедура вибору порядку різницевих рівнянь інтервальних моделей: для моделі згинання отримано порядок $d = 3$, для моделей розгинання та відведення — $d = 4$. З тексту роботи не повністю зрозуміло, чи розглядалися структури нижчих порядків та за яким критерієм здійснювалося відсіювання альтернативних структур моделей.

3. Ефективність алгоритму бджолоїної колонії суттєво залежить від значень його керуючих параметрів (кількості моделей-претендентів S , показника вичерпності джерела LIMIT, загальної кількості ітерацій MCN). У роботі не наведено дослідження чутливості результатів структурної та параметричної ідентифікації до вибору цих параметрів.

4. Прогнозування динаміки відновлення здійснюється на основі 3–4 попередніх сеансів за неявного припущення регулярності їх проведення. У роботі не розглянуто питання стійкості прогнозу в разі пропуску пацієнтом сеансів або нерегулярних часових інтервалів між ними, що є типовою ситуацією у клінічній практиці.

5. Як цільові межі відновлення рухливості використано нормативні діапазони Американської академії хірургів-ортопедів (AAOS). Варто було б детальніше обґрунтувати застосовність цих узагальнених норм для пацієнтів різних вікових груп та з різними діагнозами.

Втім, зазначені зауваження та дискусійні положення не знижують загальної високої оцінки дисертаційної роботи, не ставлять під сумнів основні

наукові результати здобувача і значною мірою окреслюють перспективи подальших досліджень.

7. Висновки. Дисертаційна робота Цапів Ярослава Андрійовича на тему «Математичне та програмне забезпечення реабілітаційної арт-терапії верхніх кінцівок пацієнтів на основі AR-технологій» є самостійною, завершеною кваліфікаційною науковою працею, у якій розв'язано актуальне науково-прикладне завдання підвищення ефективності реабілітації верхніх кінцівок пацієнтів шляхом розроблення математичного та програмного забезпечення системи реабілітаційної арт-терапії на основі AR-технологій, автоматичної безмаркерної гоніометрії та інтервальних математичних моделей динаміки відновлення рухливості суглобів.

З урахуванням актуальності теми дослідження, ступеня наукової новизни одержаних результатів, рівня їх теоретичної та практичної обґрунтованості, повноти відображення у наукових публікаціях, а також дотримання вимог академічної доброчесності, дисертаційна робота відповідає вимогам наказу МОН України № 40 від 12.01.2017 року «Про затвердження вимог до оформлення дисертацій» та «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.

Рецензент:

доцент кафедри комп'ютерних наук

Західноукраїнського національного

університету,

кандидат технічних наук, доцент



Триша СПІВАК

Ірина І. ЕЦІК

Ірина СПІВАК