

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

ВІДГУК ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА

доктора технічних наук, професора, професора кафедри
інформаційних систем та мереж Національного університету
«Львівська політехніка»

Назаркевич Марії Андріївни

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. Стрімкий розвиток методів комп'ютерного зору та глибокого навчання відкрив можливість безмаркерного відстежування рухів людини у реальному часі, що створює передумови для принципово нових інструментів об'єктивного контролю у фізичній реабілітації. Водночас пряме перенесення нейромережевих детекторів пози у клінічну практику стримується низкою невирішених проблем: шумом координат ключових точок, проекційною похибкою при аналізі одного ракурсу та відсутністю інтеграції результатів вимірювань у контур прийняття терапевтичних рішень.

Для України проблема набуває особливої ваги через різке зростання кількості пацієнтів із травмами верхніх кінцівок, які потребують тривалої реабілітації з об'єктивним контролем динаміки відновлення. Дисертаційна

робота Цапів Я.А., спрямована на створення математичного та програмного забезпечення, що поєднує безмаркерну багатокамерну гоніометрію на основі нейромережевої детекції, інтервальне прогнозування динаміки відновлення та AR-арт-терапію у замкненому адаптивному циклі, безпосередньо відповідає цим викликам, тому її тема є безумовно актуальною. Робота виконана в межах трьох держбюджетних НДР Західноукраїнського національного університету, в яких здобувач був виконавцем.

2. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертації. Дисертація є завершеним науковим дослідженням, що складається зі вступу, чотирьох логічно пов'язаних розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. У першому розділі виконано системний аналіз методів вимірювання кутів суглобів – від контактної гоніометрії та маркерних систем до сучасних нейромережевих детекторів пози (OpenPose, BlazePose, MediaPipe Pose Landmarker, MoveNet, ViTPose, YOLOv8-pose), а також технологій VR/AR у реабілітації, методів прогнозування та рекомендаційних систем; порівняння моделей оцінки пози узагальнено у табличній формі. Розділ завершується коректною постановкою завдань дослідження.

У другому розділі розроблено метод безмаркерної гоніометрії на основі аналізу трьох відеопотоків. Технологічний ланцюжок методу вибудований послідовно: нейромережева детекція анатомічних точок детектором YOLOv8-pose з OpenVINO-прискоренням, згладжування координат ансамблем адаптивних OneEuro-фільтрів (тремор менше 1 пікселя RMS у стаціонарному режимі та відгук за один кадр при різких рухах), геометричне злиття вимірювань від трьох ортогонально розташованих камер із пріоритизацією на основі площин руху. Саме багатокамерне злиття дало змогу зменшити проекційну похибку з $30\text{--}50^\circ$ до $3\text{--}5^\circ$ і досягти середньої абсолютної похибки менше 4° , що знаходиться в межах мінімальної клінічно значущої різниці. У цьому ж розділі побудовано інтервальні дискретні

динамічні моделі відновлення кутів рухливості, ідентифіковані алгоритмом бджолиної колонії, які забезпечують стовідсоткове покриття спостережень.

Третій розділ присвячено проектуванню мікросервісної архітектури комплексної системи (мікросервіси гоніометрії, прогнозування та рекомендацій, сервер-оркестратор NestJS із PostgreSQL, AR-застосунок для гарнітури Magic Leap 2, вебзастосунок фізіотерапевта) з чотирма незалежними каналами даних. У четвертому розділі описано реалізацію системи та клінічну апробацію на даних п'яти пацієнтів, яка підтвердила ефективність адаптивного циклу: темп приросту кута згинання після корекції терапевтичного зображення зріс у 1,9–3,9 раза, прогнозована тривалість курсу скоротилася на 11,8–12,5%.

Достовірність отриманих результатів забезпечується коректним використанням апарату обчислювальної геометрії, адаптивної фільтрації, інтервального аналізу і теорії ідентифікації, узгодженістю результатів обчислювальних експериментів із клінічними даними, порівнянням із відомими в літературі рішеннями та успішною програмною реалізацією. Висновки логічно випливають зі змісту роботи і відповідають поставленим завданням.

3. Наукова новизна одержаних результатів. Наукову новизну дисертації становлять: вперше розроблені інтервальні математичні моделі динаміки відновлення кутів рухливості плечового суглоба на основі адаптованих методів структурної та параметричної ідентифікації, що уможливлюють прогнозування за 3–4 попередніми сеансами та адаптивну корекцію терапевтичного протоколу; вперше запропонована комплексна архітектура медичної реабілітаційної програмної системи на основі оркестрації мікросервісів, яка забезпечує зменшення тривалості повного циклу реабілітації в середньому на 12%; удосконалений метод безмаркерної гоніометрії на основі аналізу трьох відеопотоків з адаптивною фільтрацією координат ключових анатомічних точок та алгоритмом геометричного злиття вимірювань із пріоритизацією на основі площин руху; інформаційна

технологія реабілітаційної арт-терапії, що набула подальшого розвитку завдяки поєднанню автоматичної гоніометрії, інтервального прогнозування та генерації персоналізованого терапевтичного контенту.

Особливо відзначу практичну цінність удосконаленого методу безмаркерної гоніометрії: поєднання нейромережевого детектора з ансамблем адаптивних фільтрів та багатокамерним злиттям є нетривіальним інженерним рішенням, яке переводить безмаркерні вимірювання у діапазон клінічно прийнятної точності без використання спеціалізованого дорогого обладнання.

4. Оформлення дисертації, дотримання вимог академічної доброчесності та повнота викладу наукових результатів в опублікованих працях.

4.1. Оформлення дисертації. Повний обсяг роботи 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 грамотною українською мовою у належному науковому стилі; оформлення відповідає чинним вимогам.

4.2. Дотримання вимог академічної доброчесності. Ознак академічного плагіату, фабрикації чи фальсифікації результатів не виявлено; запозичені положення супроводжуються коректними посиланнями. У вступі наведено декларацію про використання інструментів штучного інтелекту з чітким окресленням меж їх застосування, що відповідає сучасним вимогам академічної доброчесності.

4.3. Повнота викладу наукових результатів. Основні результати опубліковано у 9 наукових працях, зокрема 4 статті у фахових періодичних виданнях (1 – у закордонному виданні, індексованому Scopus, Q2; 3 – у виданнях України категорії «Б») та 5 публікацій у матеріалах конференцій (2 індексуються Scopus). Результати апробовано на міжнародних конференціях АСІТ-2024 та АСІТ-2025 і школах-семінарах СІТ. Опубліковані праці повністю відображають основні положення дисертації.

5. Наукове та практичне значення результатів дисертаційної роботи. Наукове значення роботи полягає у розвитку методів безмаркерної гоніометрії на основі багатокамерного відеоаналізу та інтервального моделювання динаміки відновлення рухливості суглобів на коротких клінічних вибірках. Практичне значення підтверджене впровадженням результатів у процес реабілітаційних сеансів КНП «Тернопільська обласна клінічна лікарня» ТОР, у науково-дослідну роботу ТНМУ імені І.Я.Горбачевського, у виробничий процес ТОВ «ЕЛЕКС» та в освітній процес кафедри комп'ютерних наук ЗУНУ.

6. Зауваження та дискусійні положення щодо змісту дисертації. Позитивно оцінюючи дисертаційну роботу в цілому, вважаю за необхідне зазначити такі зауваження та дискусійні положення:

1. Порівняння моделей оцінки пози людини у першому розділі (таблиця 1.1) виконано переважно за літературними даними. Доцільно було б доповнити його власним експериментальним зіставленням двох-трьох найкращих детекторів (наприклад, YOLOv8-pose, MediaPipe Pose Landmarker, ViTPose) за точністю та швидкістю безпосередньо на цільових рухах реабілітаційних пацієнтів.

2. Детектор YOLOv8-pose використано у конфігурації, попередньо навчений на наборі даних COCO, який містить переважно зображення людей у типових побутових позах. У роботі не розглянуто доцільність донавчання (fine-tuning) моделі на зображеннях реабілітаційних пацієнтів із нетиповими позами та обмеженою рухливістю, а також можливість застосування методів аугментації даних для компенсації малого обсягу клінічних вибірок.

3. Не досліджено вплив умов відеозйомки на точність нейромережевої детекції та підсумкову похибку вимірювання кутів, а саме змінного освітлення реабілітаційного кабінету, часткових оклюзій анатомічних точок гарнітурою або одягом пацієнта.

4. Дискусійне питання: чи оцінювалася працездатність конвеєра обробки трьох відеопотоків на апаратних конфігураціях без OpenVINO-

прискорення, і якими є мінімальні апаратні вимоги до обчислювального вузла мікросервісу гоніометрії для досягнення заявлених 30 кадрів за секунду?

5. Для оцінювання точності методу гоніометрії наведено середню абсолютну похибку. Доцільно було б доповнити аналіз додатковими метриками (середньоквадратичною похибкою, розподілом похибок за типами рухів), що дало б повнішу картину метрологічних характеристик методу.

6. У тексті роботи трапляються поодинокі стилістичні неточності та неуніфіковане написання окремих англomовних термінів і аббревіатур, що, втім, не впливає на зміст та сприйняття роботи.

Зазначені зауваження та дискусійні положення не знижують наукової і практичної цінності дисертаційної роботи та не ставлять під сумнів її основні результати; частина з них окреслює напрями подальших досліджень здобувача.

7. Висновки.

7.1. Дисертаційна робота Цапів Ярослава Андрійовича є самостійним, завершеним науковим дослідженням, у якому розв'язано актуальне науково-прикладне завдання розробки математичного та програмного забезпечення системи реабілітаційної арт-терапії верхніх кінцівок пацієнтів, що поєднує безмаркерну гоніометрію на основі нейромережевої детекції, інтервальне прогнозування динаміки відновлення та адаптивну корекцію терапевтичного протоколу.

7.2. Одержані результати мають наукову новизну та практичну цінність, є внеском у розвиток методів і засобів інженерії програмного забезпечення медичних реабілітаційних систем; зміст роботи повністю відповідає спеціальності 121 Інженерія програмного забезпечення.

7.3. З огляду на актуальність теми, наукову новизну, обґрунтованість і практичне значення одержаних результатів, повноту їх викладу в наукових публікаціях та відсутність порушень академічної доброчесності вважаю, що дисертаційна робота відповідає вимогам, 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 ступеня доктора філософії в галузі знань 12 Інформаційні технології за спеціальністю 121 Інженерія програмного забезпечення.

Офіційний опонент:

Доктор технічних наук, професор,
професор кафедри інформаційних систем та мереж
Національного університету
«Львівська політехніка»

Марія НАЗАРКЕВИЧ

**Підпис доктора технічних наук, професора Марії НАЗАРКЕВИЧ
засвідчую.**

Проректор з навчально-методичної роботи
Національного університету
«Львівська політехніка», к.е.н. доцент



Володимир ЖЕЖУХА