

ХЕРСОНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ТА ДИЗАЙНУ
КАФЕДРА ІНФОРМАТИКИ І КОМП'ЮТЕРНИХ НАУК

Пояснювальна записка
кваліфікаційна робота бакалавра
на тему:

**Застосування алгоритму ортогонального пошуку відповідності для аналізу
періодичних рухів верхньої кінцівки людини**

Виконав: студент 4 курсу, групи 4КН
спеціальності 122 «Комп'ютерні науки»
Яценко Р. О.

Керівник: к.т.н., доцент Лур'є І.А.

Рецензент: к.т.н., доцент Козел В.М.

Факультет	Інформаційних технологій та дизайну
Кафедра	Інформатики і комп'ютерних наук
Рівень вищої освіти	другий (магістерський) рівень
Галузь підготовки	12 «Інформаційні технології»
Освітньо - професійна програма	Комп'ютерні науки
Спеціальність	122 «Комп'ютерні науки»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ІКН,
професор

_____ В.І. Литвиненко

«_____» _____ 2025 року

З А В Д А Н Н Я НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТА

Яценко Ростислава Олеговича

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Застосування алгоритму ортогонального пошуку відповідності для аналізу періодичних рухів верхньої кінцівки людини

Керівник роботи Лур'є Ірина Анатоліївна, кандидат технічних наук, доцент,

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом ХНТУ від «15» січня 2025 року №39-с.

2. Строк подання студентом роботи 10.06.2025р.

3. Вихідні дані до роботи Матеріали та результати, отримані під час проходження переддипломної практики, методичні вказівки, технічна література

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): Вступ; 1. Інсульт і способи його клінічного та функціонального вимірювання; 2. Теоретичні основи та інструментарій для аналізу кінематичних моделей руху пацієнтів після інсульту; 3. Методологія збору та обробки кінематичних даних про рухи верхніх кінцівок у здорових людей та пацієнтів після інсульту; 4. Побудова кінематичної моделі; Висновок

5 Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

В роботі наведено:

Рисунки - 26

Таблиці - 5

Формул - 14

7. Дата видачі завдання 10.02.2025

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Збір та попередня обробка даних з обраних джерел	10.02.2025-23.02.2025	Виконано
2	Оцінка потенційного впливу технологій на реабілітаційні програми після інсульту.	23.02.2025-25.03.2025	Виконано
3	Огляд та порівняння існуючих методів аналізу медичних інформаційних ресурсів.	26.03.2025-28.04.2025	Виконано
4	Обробка та аналіз отриманих даних. Документування результатів	28.04.2025-02.05.2025	Виконано
5	Оцінка застосування методів машинного навчання у контексті дослідження.	22.05.2025-30.05.2025	Виконано
6	Узагальнення всіх отриманих результатів дослідження. Написання звіту.	30.05.2025-05.06.2025	Виконано

Студент _____ Яценко Р. О.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____ Лур'є І.А.
(підпис) (прізвище та ініціали)

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК ПРИЙНЯТИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ	7
Анотація.....	9
ВСТУП.....	13
РОЗДІЛ 1. Інсульт і способи його клінічного та функціонального вимірювання	15
1.1. Інсульт та спастичність	15
1.2. Типи інсультів	16
1.2.1. Геморагічний інсульт.....	17
1.2.2. Емболічний інсульт.....	17
1.2.3. Лакунарний інсульт	18
1.2.4. Тромботичний інсульт	18
1.2.5. Субарахноїдальний крововилив	19
1.2.6. Транзиторна ішемічна атака (TIA)	19
1.3. Поширеність інсульту в Україні.....	19
1.4. Фактори ризику розвитку інсульту	20
1.5. Спастичність	22
Висновки до розділу	23
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТА ІНСТРУМЕНТАРІЙ ДЛЯ АНАЛІЗУ КІНЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ РУХУ ПАЦІЄНТІВ ПІСЛЯ ІНСУЛЬТУ	24
2.1. Алгоритм ортогонального пошуку відповідності (OMP)	24
2.2 Історія виникнення алгоритму OMP	31
2.3. Сім ступенів свободи (7DoF).....	32
2.3.1. Анатомічне обґрунтування.....	33
2.3.2. Сім ступенів свободи в робототехніці	35

2.4.	Засоби та інструменти для розробки програмного забезпечення.....	37
2.4.1.	Мова R	37
2.4.2.	RStudio — інтегроване середовище розробки	38
	Висновки до розділу	40
РОЗДІЛ 3. Методологія збору та обробки кінематичних даних.....		41
3.1.	Мета збору кінематичних даних	41
3.2	Технічні засоби фіксації рухів	42
3.3	Характеристика вибірки	43
3.4.	Стандартизовані завдання для аналізу	44
3.5	Повторюваність рухів та фіксація параметрів	45
3.6	Обробка та аналіз рухів	47
3.7	Протокол SoftPro	48
	Висновки до розділу	50
РОЗДІЛ 4. РЕАЛІЗАЦІЯ АЛГОРИТМУ OMP ДЛЯ АНАЛІЗУ		
ПЕРІОДИЧНИХ РУХІВ.....		52
4.1	Джерела та структура вихідних даних	52
4.2	Архітектура програмної системи	53
4.3	Реалізація словника Фур'є.....	54
4.4	Алгоритм ортогонального пошуку відповідності	55
4.5	Попередня обробка кінематичних сигналів.....	57
4.6	Метрики якості реконструкції	58
4.7	Аналіз частотного вмісту та класифікація рухів	58
4.8	Багатовимірний аналіз кінцівки	59
4.9	Порівняльний аналіз груп	60
4.10	Візуалізація та інтерпретація результатів	61

4.11 Автоматична генерація звітів	62
4.12 Валідація та тестування системи	64
Висновки до розділу	65
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	67
<i>ДОДАТОК 1</i>	<i>72</i>
Лістинг 1.1. import_motion_data та validate_motion_data	72
Лістинг 1.2. preprocess_motion_data	75
Лістинг 1.3. create_motion_dictionary	77
Лістинг 1.4. omp_algorithm	78
Лістинг 1.5. analyze_motion_with_omp	79
Лістинг 1.6. evaluate_motion_characteristics та classify_motion_type	80
Лістинг 1.7. multivariate_limb_analysis	82
Лістинг 1.8. analyze_limb_motion	85
Лістинг 1.9. plot_correlation_heatmap та plot_boxplots_metrics	86

ПЕРЕЛІК ПРИЙНЯТИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ

Скорочення, термін, позначення	Пояснення
OMP	Orthogonal Matching Pursuit – Ортогональний пошук відповідності
7-DOF	Seven Degree`s Of Freedom – Сім Ступеней Свободи
PDF	Probability Density Function - Функція (Оцінки) Щільності Ймовірності
ASA	American Stroke Association - Американська Асоціація Інсульту
TI	Тромботичний Інсульт
EI	Емболічний Інсульт
EM	Expectation Maximization - Математичне Сподівання
BIC	Байєсівський інформаційний критерій
AIC	Інформаційний Критерій Акаїке (Akaike)
ВООЗ	Всесвітня Організація Охорони Здоров'я
ВД	Вегетативна Дисрефлексія
FMA	Fugl-Meyer Assessment - Оцінка Фугль-Мейєра

IMU	INERTIAL MEASUREMENT UNIT - Інерційний вимірювальний пристрій
RF	Random Forest (Method) – Метод Випадкового Лісу
UZH	University of Zurich – Цюрихський Університет
VPIT	Virtual Peg Insertion Test – Програма для Віртуального Переміщення Палички
EMG	Electromyography (EMG) – Електроміографія
SNR	Signal-To-Noise Ratio – Співвідношення Сигналу До Шуму

АНОТАЦІЯ

У роботі розглядається застосування алгоритму ортогонального пошуку відповідності (OMP) для кількісного аналізу періодичних рухів верхньої кінцівки людини в контексті післяінсультної реабілітації. Актуальність дослідження обумовлена високою частотою розвитку моторних порушень після інсульту, які вимагають об'єктивних методів оцінювання динаміки відновлення рухових функцій. Метою роботи є розробка та реалізація процедур аналізу рухових сигналів на основі OMP із подальшою верифікацією отриманих параметрів за клінічними шкалами.

Об'єктом дослідження є періодичні рухи верхньої кінцівки пацієнтів, які перенесли інсульт, а також контрольної групи здорових осіб. Предметом дослідження виступають спектральні характеристики рухових сигналів (середня частота, показники тремору та плавності), отримані шляхом розкладання сигналу за допомогою OMP. У роботі застосовано інструментарій R Studio для обробки вихідних кінематичних даних: сегментації рухів на окремі цикли, побудови словника гармонічних атомів, виконання жадібного відбору компонентів з урахуванням ортогоналізації та розрахунку енергетичних показників тремору (> 4 Гц) і плавності (1–3 Гц).

Методика включає такі етапи: збір і валідація даних за допомогою апаратних засобів реєстрації рухів; попередню обробку сигналів; застосування OMP для виділення домінантних частотних складових; обчислення числових характеристик кожного рухового циклу; класифікацію типів руху та кореляційний аналіз із клінічними показниками (зокрема з оцінкою за шкалою FMA-UE). Виконано порівняння показників між контрольною групою та групою після інсульту, що дало змогу оцінити ступінь порушення моторної функції та ефективність реабілітаційних заходів.

Наукова новизна роботи полягає в інтеграції алгоритму OMP із клінічно орієнтованою методикою оцінки рухів після інсульту, що дозволяє отримати об'єктивні цифрові біомаркери тремору й плавності. Практичне значення полягає в тому, що розроблений підхід може бути використаний для моніторингу прогресу

реабілітації й персоналізації терапевтичних програм. Результати дослідження можуть бути впроваджені в якості базису для створення програмного забезпечення наступного покоління, яке автоматизує процес оцінювання рухових розладів у пацієнтів після інсульту.

Abstract

The study investigates the application of the Orthogonal Matching Pursuit (OMP) algorithm for quantitative analysis of periodic upper-limb movements in the context of post-stroke rehabilitation. Its relevance is determined by the prevalence of motor impairments following stroke, which necessitates objective methods for evaluating the dynamics of motor-function recovery. The primary objective is to develop and implement procedures for analyzing kinematic signals using OMP and to validate the obtained parameters against established clinical scales.

The objects of investigation are the periodic movements of the upper limb in post-stroke patients and in a control group of healthy subjects. The subject of the study comprises the spectral characteristics of movement signals—specifically mean frequency, tremor indicators, and smoothness measures—extracted by decomposing each signal with OMP. Processing was performed in R Studio and included segmentation of movement into individual cycles, construction of a dictionary of harmonic atoms, execution of greedy component selection with orthogonalization, and computation of energy-based indices for tremor (> 4 Hz) and smoothness (1–3 Hz).

The methodology consists of the following stages: collection and validation of kinematic data using motion-capture hardware; signal preprocessing; application of OMP for isolating dominant frequency components; calculation of numerical characteristics for each movement cycle; classification of movement types; and correlation analysis with clinical metrics (notably the Fugl–Meyer Assessment for Upper Extremity, FMA-UE). Comparative analysis between the control group and post-stroke cohort enabled quantification of motor-function impairment and assessment of rehabilitation effectiveness.

The scientific novelty lies in integrating the OMP algorithm with a clinically oriented evaluation framework for post-stroke movement analysis, thereby deriving objective digital biomarkers of tremor and smoothness. Practical significance stems from the potential to employ the developed approach for monitoring rehabilitation progress and personalizing therapeutic interventions. The study's results can serve as a foundation for

next-generation software that automates evaluation of motor disorders in patients recovering from stroke.

ВСТУП

Об'єктом дослідження є процеси реабілітації пацієнтів після перенесеного інсульту з акцентом на періодичні рухи верхньої кінцівки. Предметом дослідження виступають спектральні характеристики цих рухових сигналів — рівень тремору (коливання понад 4 Гц), показники плавності руху (1–3 Гц) та середня частота, отримані шляхом розрідженого апроксимування сигналів алгоритмом ортогонального пошуку відповідності (ОМР).

Реабілітація пацієнтів після інсульту залишається однією з найнагальніших проблем сучасної медицини та нейрореабілітації. Ураження центральної нервової системи призводить до стійких порушень моторної функції, зокрема верхніх кінцівок, серед яких спастичність спричиняє зниження контролю над рухами, втрату їхньої плавності та виникнення больових відчуттів. Для коригування терапевтичних програм потрібні об'єктивні кількісні критерії оцінювання динаміки відновлення моторики, що дозволяють адаптувати реабілітаційний процес до індивідуальних потреб пацієнта.

У сучасних дослідженнях аналізу рухів пацієнтів після інсульту застосовують методи кінематики та біомеханіки, які базуються на даних інерційних датчиків (IMU), оптичних систем стеження та електроміографії (ЕМГ). Серед алгоритмічних підходів усе більшого поширення набувають методи розрідженого апроксимування сигналів. Зокрема, ОМР дає змогу подати складний руховий сигнал як лінійну комбінацію обмеженої кількості базових компонент (атомів) із заздалегідь сформованого словника. Відтак виділяються ключові частотні складові руху, що забезпечує високу роздільну здатність між гармонічними компонентами та шумом, навіть за наявності фонових коливань.

Метою даної роботи є розробка та реалізація методики аналізу періодичних рухів верхньої кінцівки пацієнтів після інсульту із застосуванням алгоритму ОМР та верифікація отриманих спектральних параметрів за допомогою клінічних шкал оцінки моторної функції. Для досягнення цієї мети вирішуються такі завдання:

1. Проаналізувати наукові джерела та клінічні методи оцінки рухових порушень після інсульту, зокрема механізми спастичності та існуючі

- інструменти функціонального вимірювання (FMA-UE, MAS) (розділ 1).
2. Вивчити теоретичні основи алгоритму ОМР, принципи формування гармонічного словника та суміжні математичні методи (розділ 2).
 3. Розробити методологію збору та попередньої обробки кінематичних сигналів за допомогою інерційних сенсорів і оптичних систем стеження, описати характеристики вибірки пацієнтів та протоколи стандартизованих рухових завдань (розділ 3).
 4. Реалізувати алгоритм ОМР для аналізу циклічних рухів: створити словник атомів, виконати жадібний відбір, обчислити числові характеристики руху та провести кореляційний аналіз із клінічними шкалами (розділ 4).
 5. Оцінити результати експерименту, порівняти цифрові біомаркери між контрольною та післяінсультною групами й визначити практичну значущість розробленої методики.

Наукова новизна роботи полягає в інтеграції алгоритму ОМР із клінічно орієнтованою моделлю оцінки рухових розладів — уперше адаптовано словник гармонічних атомів до спектральних особливостей руху верхньої кінцівки пацієнтів під час реабілітації. Практичне значення полягає в можливості впровадження розробленої методики у програмне забезпечення для автоматизованого моніторингу прогресу реабілітації та індивідуалізації терапевтичних програм.

Апробація: Ростислав Яценко, Ірина Лур'є, ЗАСТОСУВАННЯ АЛГОРИТМУ ОРТОГОНАЛЬНОГО ПОШУКУ ВІДПОВІДНОСТІ (ОМР) ДЛЯ АНАЛІЗУ ПЕРІОДИЧНИХ РУХІВ ВЕРХНЬОЇ КІНЦІВКИ ЛЮДИНИ, Матеріали Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції «ТЕНДЕНЦІЇ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ НАУКИ І ОСВІТИ В УМОВАХ ГЛОБАЛІЗАЦІЇ» 30 квітня 2025 року Вип. 116. – Переяслав : Ун-т Григорія Сковороди, 2025. – С. 131–135. – 250 с.