УДК 004.942
DOI:10.62717/3083-7057-2026-1-060

Лукашук Д.К.,
Національний університет «Одеська політехніка»
ORCID 0009-0003-3149-3741
E-mail:user111228322@gmail.com

Павленко В.Д.,
Національний університет «Одеська політехніка»
ORCID 0000-0002-5655-4171
E-mail:pavlenko_vitalij@ukr.net

РОЗПІЗНАВАННЯ ПСИХОФІЗІОЛОГІЧНОГО СТАНУ НА ОСНОВІ 2D ЗОБРАЖЕНЬ ПЕРЕХІДНИХ ФУНКЦІЙ ПЕРШОГО ТА ДРУГОГО ПОРЯДКУ ОКУЛО-РУХОВОЇ СИСТЕМИ

Анотація. Запропоновано метод побудови класифікатора нейрофізіологічного стану людини на основі непараметричних моделей око-рухової системи (ОРС) у вигляді поліномів Вольтерри другого порядку. Сформовано новий простір діагностичних ознак на основі 2D зображень моделей у вигляді перехідних характеристик першого та другого порядку ОРС. Ефективність класифікації визначаються за допомогою методу опорних векторів (SVM) із використанням *Stratified k-fold cross-validation* (8-fold), що дозволило отримати високі значення показника імовірності правильного розпізнавання нейрофізіологічного стану.
Ключові слова: око-рухова система, моделювання, моделі Вольтерри, технологія айтрекінгу, нейрофізіологічний стан, метод опорних векторів.

D. Lukashuk,
Odesa Polytechnic National University
ORCID 0009-0003-3149-3741
E-mail:user111228322@gmail.com

V. Pavlenko,
Odesa Polytechnic National University
ORCID 0000-0002-5655-4171
E-mail:pavlenko_vitalij@ukr.net

RECOGNITION OF PSYCHOPHYSIOLOGICAL STATE BASED ON 2D IMAGES OF TRANSIENT FUNCTIONS OF THE FIRST AND SECOND ORDER OF THE OCULOMOTOR SYSTEM

Annotation. A method for constructing a classifier of human neurophysiological state based on nonparametric models of the eye movement system (EMS) in the form

of second-order Volterra polynomials is proposed. A new diagnostic feature space has been formed based on a two-dimensional representation of the models' transient characteristics, reflecting integral and geometric properties of the signals. Classification performance was evaluated using the support vector machine (SVM) method with Stratified k-fold cross-validation (8-fold), which enabled achieving high accuracy in identifying the neurophysiological state.
Keywords: eye movement system, modeling, Volterra models, eye-tracking technology, neurophysiological state condition, support vector machine method.

Одним з перспективних напрямів є використання даних руху очей, які відображають особливості функціонування ОРС та можуть слугувати інформативним джерелом для оцінювання психофізіологічного стану людини. Розвиток технології айтрекінгу дозволяє отримувати високоточні експериментальні дані про динаміку рухів очей, що відкриває можливості для побудови математичних моделей ОРС та їх використання у задачах аналізу нейрофізіологічного стану людини [1, 2].

Мета роботи полягає в розробці алгоритмічних і програмних засобів побудови класифікатора нейрофізіологічного стану людини на основі непараметричної динамічної моделі ОРС у вигляді поліномів Вольтерри другого порядку, побудованої за експериментальними даними «вхід-вихід» із застосуванням технології айтрекінгу, а також у підвищенні ефективності класифікації шляхом формування нового простору діагностичних ознак.

Для побудови моделей застосовуються набори відгуків ОРС на тестові візуальні стимули, що відображаються на екрані монітора комп'ютера на різних відстанях x_j ($j = 1, 2, 3$) від стартової позиції у напрямку "по горизонталі": $x_1=(1/3)X$, $x_2=(2/3)X$, $x_3=X$ (X – ширина екрана у пікселях). Такі тестові сигнали еквівалентні вхідним ступінчатим сигналам $a_j\theta(t)$ ($\theta(t)$ – функція Ґевісайда) з амплітудами a_j, які визначаються значеннями відстані x_j. Емпіричні дані отримано за допомогою айтрекера Tobii Pro TX300 у різний час: "Вранці" (до занять) і "Ввечері" (після занять), а також у різні дні [1]. Повний цикл дослідження ОРС для одного респондента складається з трьох експериментів при різних амплітудах тестових сигналів $a_1<a_{2yt}<a_3$.

Для реалізації алгоритму непараметричної ідентифікації ОРС виконано попередню обробку відгуків системи на тестові візуальні стимули: нормалізацію, синхронізацію сигналів та виділення переднього фронту у вихідних сигналах айтрекера [3]. На основі оброблених експериментальних даних побудовано квадратичні моделі ОРС типу M2.2/2 та M2.2/3 у вигляді поліномів Вольтерри другого порядку із застосуванням методу найменших квадратів [4] та визначено перехідні характеристики першого $h_1(t)$ та другого порядків $h_2(t,t)$, що описують нелінійні та динамічні властивості системи.

Сформовано новий простір діагностичних ознак на основі 2D зображень моделей у вигляді перехідних характеристик першого та другого порядку ОРС. Ознаки визначають інтегральні та геометричні характеристики цих сигналів у часовій області, зокрема розташування характерних точок перехідного

процесу. Для підвищення інформативності ознак аналіз екстремальних значень різниці сигналів виконувався на інтервалі масивів даних перехідного процесу $t_{15} \leq t_{30}$.

Для оцінки діагностичної цінності геометричних ознак, що визначаються на основі 2D зображень моделей ОРС використовується класифікація нейрофізіологічного стану людини із застосуванням методу опорних векторів (SVM). При цьому використовувалася процедура *Stratified k-fold cross-validation* (8-fold). В результаті проведення обчислювальних експериментів встановлено максимальну імовірність правильного розпізнавання (ІПР), яка досягається для моделі М2.2/3, побудованої з використанням трьох тестових сигналів. Значення ІПР=87.5% було отримано для пари ознак:

$$q_1 = \int_0^T \left| h_1(t) - h_2(t,t) \right| dt \ \& \ q_5 = \arg \min_{t \in [t_{15}, t_{30}]} \left| h_1(t) - h_2(t,t) \right| \quad (1)$$

Відповідну матрицю помилок класифікації наведено на рис. 1, а ROC-криву класифікатора для пари ознак (1) – на рис. 2.

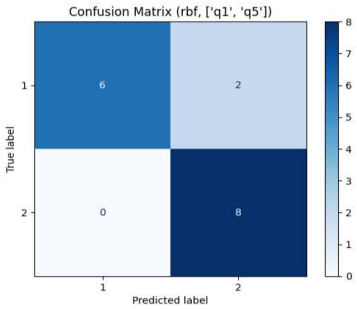

Рисунок 1 – Матриця помилок класифікації для набору q1&q5

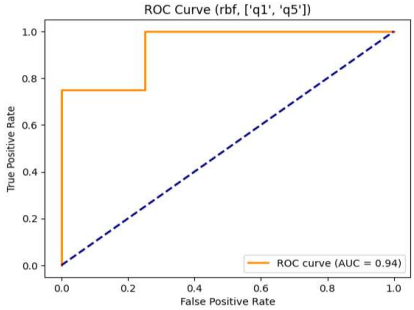

Рисунок 2 – ROC крива для набору q_1&q_5 моделі М2.2/3

Висновок. Запропонований підхід до формування простору діагностичних ознак на основі 2D зображень моделей у вигляді перехідних характеристик першого та другого порядку ОРС може ефективно використовуватися для розпізнавання нейрофізіологічного стану людини.

Бібліографічні посилання

1. V. Pavlenko, M. Milosz, and M. Dzienkowski, "Identification of the oculo-motor system based on the Volterra model using eye tracking technology," J. Phys.: Conf. Ser.2020. Vol. 1603, pp. 1–8. DOI:10.1088/1742-6596/1603/1/012011.

2. V. Bro and A. Medvedev, "Continuous and discrete Volterra-Laguerre models with delay for modeling of smooth pursuit eye movements," IEEE Trans. Biomed. Eng.2023.Vol. 70, No. 1, pp. 97–104. DOI:10.1109/TBME.2022.3185669
3. V. Pavlenko, T. Shamanina, and V. Chori, "Eye-tracking technology and its application in neuroscience," in Proc. 12th IEEE Int. Conf. on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS), Dortmund, Germany, Sept. 2023, Vol. 1, pp. 187–193. DOI:10.1109/IDAACS58523.2023.10348754.
4. V. Pavlenko and D. Lukashuk, "Analysis of the accuracy of simulating the human eye movement system based on Volterra models," CEUR WS Proc. of the 11th Int. Conf. “Information Technology and Implementation” (IT&I), Nov. 20-21, 2024, Kyiv, Ukraine, pp. 455-465. https://ceur-ws.org/Vol-3909/Paper_36.pdf