

СУЧАСНІ ПІДХОДИ ДО КОМПЛЕКСНОГО ОЦІНЮВАННЯ ЗОРОВОЇ СИСТЕМИ ЗА ДОПОМОГОЮ ОПТИЧНИХ СЕНСОРІВ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У роботі проведено огляд сучасних методів та оптико-електронних систем для моніторингу функціонального стану зорової системи. Розглянуто два основні підходи: непрямий моніторинг через біомедичні показники та прямий моніторинг за допомогою відстеження рухів очей та аналізу сітківки. Проаналізовано використання фотоплетизмографії, оптичних сенсорів, МР- та ОСТ-зображень, а також алгоритмів машинного навчання та глибокого аналізу сигналів для оцінки стану зорової системи. Наведено приклади реалізації багатопараметричних систем, що дозволяють інтегрувати структурні та функціональні дані для точного моніторингу в реальному часі.

Ключові слова: зорова система, моніторинг, біомедичні показники.

Abstract

The paper reviews modern methods and optoelectronic systems for monitoring the functional state of the visual system. Two main approaches are considered: indirect monitoring through biomedical indicators and direct monitoring using eye movement tracking and retinal analysis. The use of photoplethysmography, optical sensors, MR and OCT images, as well as machine learning algorithms and deep signal analysis for assessing the state of the visual system is analyzed. Examples of the implementation of multiparameter systems that allow integrating structural and functional data for accurate real-time monitoring are given.

Keywords: visual system, monitoring, biomedical indicators.

Вступ

Функціональний стан зорової системи є важливим показником загального стану організму та ефективності сенсорного сприйняття. У сучасних дослідженнях велика увага приділяється розробці методів, що дозволяють оцінювати цей стан у реальному часі з високою точністю та мінімальним втручанням у діяльність користувача. Оптико-електронні системи забезпечують можливість непрямого моніторингу через біомедичні показники, такі як кровоток, оклюзія судин та метаболічні параметри, а також прямого моніторингу за допомогою камер і сенсорів для відстеження руху очей та аналізу сітківки. Сучасні дослідження демонструють ефективність інтеграції кількох методів та алгоритмів обробки сигналів для комплексної оцінки функціонального стану зорової системи, що відкриває нові перспективи для медичних, реабілітаційних та професійних застосувань.

Результати дослідження

Дослідження функціонального стану зорової системи з використанням оптико-електронних систем поділяють на два основні напрямки: непрямий моніторинг через біомедичні показники та прямий моніторинг за допомогою оцінки руху очей і сітківки. Непрямий моніторинг включає аналіз таких параметрів, як кровоток сітківки, оклюзія судин, зміни метаболічних показників та оптичну когерентну томографію [1, 2]. Ці методи дозволяють отримувати дані про стан зорової системи у спокої або під навантаженням та забезпечують сегментацію сигналів для подальшої обробки. Наприклад, автори [1] розробили оптико-електронну систему з комбінованими сенсорами, яка дозволяє оцінювати кілька біомедичних параметрів одночасно та формувати аналітичні показники функціонального стану.

Прямий моніторинг включає використання камер, сенсорів та алгоритмів для відстеження руху очей, аналізу фіксацій, саккад, пульсацій зорового поля або змін зображень сітківки [2, 4]. Автори

дослідження [2] застосували методи структурного та функціонального МР-зображення для оцінки порушень зорової системи, що дозволяє визначати локалізацію патологічних змін та аналізувати відновлення функцій після терапії. Аналогічно, автори роботи [4] систематизували методики eye-tracking у 3D середовищах, де поєднання оптичних сенсорів з алгоритмами аналізу дозволяє класифікувати типи погляду, оцінювати взаємодію користувача із середовищем і визначати когнітивні реакції на стимуляцію.

У носимих пристроях результати [3] показали, що оптичні сенсори, інтегровані з алгоритмами обробки сигналів у реальному часі, здатні здійснювати безперервний моніторинг стану зорової системи під час тривалого використання. Вони описують поєднання фотоплетизмографії, оптичних сенсорів для оцінки рухів очей та мікроконтролерів для обробки даних, що дозволяє формувати показники когнітивного навантаження та реакції на зміну освітлення.

У дослідженні [5] проаналізували зміни аккомодатії та суб'єктивні прояви порушень зорової системи у користувачів персональних комп'ютерів, застосували комплексне поєднання оптичних методів та комп'ютерного аналізу зображень. Це включає вимірювання відстані фокусування, аналіз фіксацій та трекінг рухів очей при виконанні завдань на екрані.

Методи обробки сигналів включають використання шаблонного розпізнавання, регресії та алгоритмів машинного навчання для класифікації станів зорової системи. Наприклад, у системах відстеження погляду [4] застосовують алгоритми кластеризації та аналізу фіксацій для визначення напрямку уваги та типу реакції користувача. Методи регресії та глибокого навчання дозволяють прогнозувати стан зорової системи на основі динаміки рухів очей, змін зображень сітківки та біомедичних показників [2, 3].

У різних дослідженнях [1–5] описані системи, що інтегрують кілька методів: фотоплетизмографію, оптичні сенсори для трекінгу очей, аналіз МР- та ОСТ-зображень, алгоритми глибокого навчання для класифікації сигналів та оцінки функціонального стану. Такий підхід дозволяє отримувати багатопараметричну оцінку зорової системи, враховуючи як структурні, так і функціональні показники.

Прямий моніторинг охоплює відстеження рухів очей, аналіз фіксацій та саккад, а також оцінку структурних змін сітківки за допомогою оптичної когерентної томографії. Автори [6] систематизували застосування eye-tracking для оцінки функціональних наслідків порушень зору, підкреслюючи можливість оцінювати когнітивне навантаження та реакції на візуальні стимули. Автори роботи [7] представили системний огляд технологій eye-tracking в оптометрії, що дозволяє порівнювати різні методи фіксацій та оцінки точності руху очей у лабораторних та польових умовах.

Оптичні сенсори та носимі пристрої активно застосовуються для безперервного моніторингу стану зорової системи. Автори дослідження [8] описують інтеграцію оптичних сенсорів, фотоплетизмографії та волоконно-оптичних датчиків у медичні носимі пристрої, що дозволяє оцінювати зміни кровотоку, стан судинної мережі та рух очей у реальному часі. Такі системи використовують алгоритми машинного навчання та глибокого аналізу сигналів для класифікації та прогнозування стану зорової системи.

Дослідження [9] показало, що веб-базовані eye-tracking системи здатні ефективно працювати у різних умовах освітлення, що важливо для реалістичного оцінювання функцій зору в реальних умовах. Автори [10] здійснили систематичний огляд безконтактних оптичних методів моніторингу життєвих показників, включаючи сенсорні системи для оцінки стану зорової системи, що демонструє потенціал інтеграції таких технологій у медичні та професійні застосування.

Методи обробки даних включають кластеризацію, регресію, алгоритми машинного та глибокого навчання для аналізу рухів очей, змін зображень сітківки та біомедичних показників [6–10]. Такі підходи дозволяють формувати багатопараметричну оцінку функціонального стану зорової системи, комбінуючи структурні та функціональні дані, що підвищує точність моніторингу та забезпечує можливість аналізу в реальному часі.

Інтегровані системи включають поєднання фотоплетизмографії, оптичних сенсорів, алгоритмів машинного навчання та носимих пристроїв [8, 9]. Це дозволяє оцінювати як статичні, так і динамічні параметри функціонального стану зорової системи, формуючи комплексні показники для медичного та професійного застосування.

Висновки

Аналіз літератури показав, що сучасні оптико-електронні системи для моніторингу функціонального стану зорової системи успішно поєднують різні підходи та методи: непрямий моніторинг біомедичних показників, прямий моніторинг рухів очей та аналіз зображень сітківки. Застосування алгоритмів машинного навчання та глибинного аналізу сигналів дозволяє інтегрувати багатопараметричні дані та забезпечувати оцінку стану зорової системи у реальному часі. Розвиток таких систем відкриває перспективи для комплексного контролю функціонального стану зорової системи в медичних та професійних умовах, забезпечуючи точну та надійну оцінку параметрів зорового сприйняття.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Barylo G.I., Ivakh M.S., Mykytiuk Z.M., Kremer I.P. Optical-electronic monitoring system of biomedical indicators, 2020.
2. Sims J.R., Chen A.M., Sun Z. Role of Structural, Metabolic, and Functional MRI in Monitoring Visual System Impairment and Recovery, 2020.
3. Vavrinsky E. et al. The Current State of Optical Sensors in Medical Wearables, 2022.
4. Sundstedt V., Garro V. A Systematic Review of Visualization Techniques and Analysis Tools for Eye-Tracking in 3D Environments, 2022.
5. Belikova E.I., Gatilov D.V., Ovechkin N.I., Eskina E.N. Modern aspects of diagnosis and treatment of subjective manifestations and accommodation disorders in patients — professional users of personal computers (systematic review), 2023.
6. Wiecek E., et al. Eye Tracking to Assess the Functional Consequences of Vision Impairment: A Systematic Review, Optometry and Vision Science, 2023.
7. Daghestani M., et al. Eye Tracking in Optometry: A Systematic Review, PMC, 2023.
8. Li H., et al. Wearable Optical Fiber Sensors in Medical Monitoring Applications: A Review, MDPI Sensors, 2023.
9. Palomera-Gallagher N., et al. Investigation of Web-Based Eye-Tracking System Performance under Different Lighting Conditions for Neuromarketing, MDPI, 2023.
10. Kim J., et al. Non-Contact Vision-Based Techniques of Vital Sign Monitoring: Systematic Review, MDPI Sensors, 2024.

Мормітко Олексій Михайлович — аспірант кафедри біомедичної інженерії та оптико-електронних систем, факультет інформаційних електронних систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця.

Науковий керівник: **Тимчик Сергій Васильович** — канд. техн. наук, доцент кафедри біомедичної інженерії та оптико-електронних систем, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: tymchyksv@ukr.net.

Oleksiy Mykhailovych Mormitko — postgraduate student of the Department of Biomedical Engineering and Optoelectronic Systems, Faculty of Information Electronic Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia.

Supervisor: **Tymchyk Serhiy Vasyliovych** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Biomedical Engineering and Optoelectronic Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: tymchyksv@ukr.net.