

Моделювання штучної імунної системи: клональна селекція на $SO(2)$ та дендритні клітини для виявлення аномалій

Ростислав Лифиренко, студент¹ (ORCID: 0009-0003-5118-652X), Роман Жук, аспірант¹ (ORCID: 0009-0007-1657-6281)

¹ Київський національний університет будівництва і архітектури, Україна

АНОТАЦІЯ

У цій роботі представлено моделювання штучної імунної системи за допомогою двох біоінспірованих підходів: клональної селекції та алгоритму дендритних клітин. Перший метод реалізовано для групи обертань $SO(2)$, де особини, що представляють кути, еволюціонують через відбір, клонування та мутацію з метою наближення до цільового значення. Другий метод імітує поведінку дендритних клітин, які на основі сигналів безпеки, небезпеки та РАМР виявляють аномалії у потоках даних. Обидва підходи демонструють ефективність адаптивного навчання, виявлення загроз і самоналаштування, що робить їх перспективними для задач оптимізації та кібербезпеки.

Ключові слова: штучна імунна система (ШИС), клональна селекція, дендритні клітини, група $SO(2)$, еволюційні алгоритми, виявлення аномалій, адаптивна система, сигнали небезпеки, біоінспіровані методи, оптимізація.

1. ВСТУП

Імунна система людини вражає своєю складністю та ефективністю, демонструючи властивості, подібні до штучного інтелекту. Вона має пам'ять, здатність до навчання, вміння розпізнавати й ухвалювати рішення щодо реагування на чужорідні білки (антигени), навіть якщо вони раніше не зустрічалися в природі. Як і штучні нейронні мережі, імунна система (ШИС) здатна накопичувати інформацію та здійснювати розпізнавання образів у децентралізований спосіб. Основною її функцією є захист організму від інфекційних агентів і чужорідних речовин, а також знищення пошкоджених клітин. Розпізнавання збудників відбувається на молекулярному рівні — імунна система виявляє окремі молекули мікроорганізмів, звані антигенами, і нейтралізує їх за допомогою антитіл, що продукуються В- і Т-лімфоцитами [1].

У свою чергу, ідеї, покладені в основу біологічної імунної системи, лягли в основу створення імунних алгоритмів у сфері штучного інтелекту. Вони включають способи подання компонентів системи, механізми оцінки взаємодій (функції афінності) та процедури адаптації, які керують динамікою штучної імунної системи. Такі моделі дозволяють будувати абстрактні образи клітин і молекул, оцінювати ефективність їхньої взаємодії з навколишнім середовищем і змінювати поведінку системи з часом. Завдяки цьому імунні алгоритми стають потужним інструментом для розв'язання складних завдань у різних галузях — від медицини до кібербезпеки.

2. МЕТА

Метою роботи є створення ефективних біоінспірованих алгоритмів — клональної селекції для точного пошуку оптимальних рішень у просторі кутів і алгоритму дендритних клітин для раннього виявлення аномалій у даних — що дозволить підвищити точність, адаптивність і швидкість прийняття рішень у задачах оптимізації та кібербезпеки.

3. КЛОНАЛЬНА СЕЛЕКЦІЯ

Алгоритм клональної селекції, натхнений імунною системою, моделює природні механізми адаптації, де антитіла, що найкраще взаємодіють з антигенами, активно клонуються та зазнають мутацій. Цей процес сприяє генерації нових варіантів з потенційно кращими властивостями, що дозволяє системі швидше і точніше реагувати на загрози. У моделі клонального відбору важливу роль відіграє фітнес-функція, яка визначає "відповідність" індивіда до заданої цілі. Найуспішніші особини з найкращим фітнесом створюють більше клонів, які потім мутують у межах заданої амплітуди, дозволяючи пошуку просуватись ближче до оптимального рішення. Це імітує появу ефективних і пам'яті клітин, що в біології відповідають за ефективну і швидку імунну відповідь [2].

У тестовій реалізації цей принцип застосовується для оптимізації елементів групи $SO(2)$, що описують обертання в площині. Кожен індивід є кутом у радіанах, а ціль — певне обертання, до якого прагне система. Алгоритм еволюційно підбирає набір таких кутів, що наближаються до цільового значення, завдяки повторним клонуванням, мутаціям та селекції. Такий підхід є особливо ефективним у задачах з циклічною природою, де важлива точна відповідність фаз чи орієнтацій, наприклад, у робототехніці, фазових налаштуваннях у телекомунікаціях або комп'ютерній графіці. Еволюція індивідів на колі дозволяє наочно відстежити поступове сходження до оптимального обертання, демонструючи адаптивну силу клонального підходу в задачах на $SO(2)$.

Як і в біологічному прототипі, найкращі «антитіла» (кути з найменшою похибкою) частіше клонуються, а мутації у вигляді випадкових зміщень імітують соматичну гіпермутацію. Це дає змогу досліджувати локальні околиці рішень. Згодом формуються «клітини пам'яті» — точні значення, які зберігаються між ітераціями. Низькоякісні індивіди відсіюються, забезпечуючи поступове та точне сходження до цільового обертання.

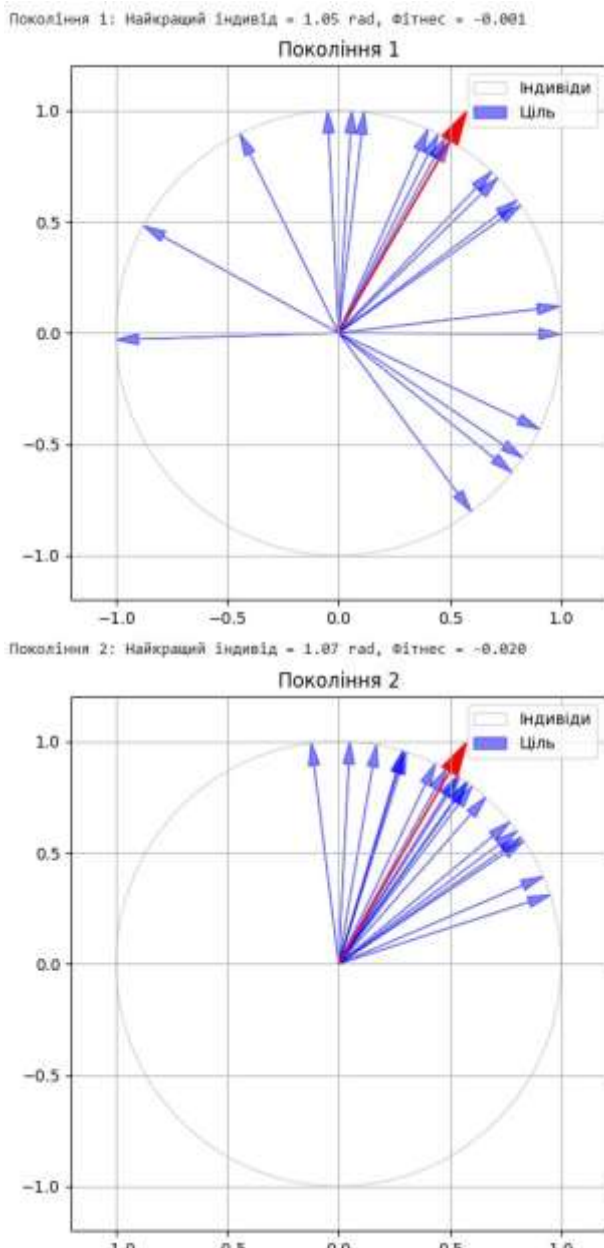


Рисунок. 1. Програма “Еволюція кутів SO(2)”

4. ДЕНДРИТНІ КЛІТИНИ

Дендритні клітини є ключовими «вартувими» імунної системи, які постійно патрулюють організм, шукаючи патогени, такі як віруси чи бактерії. Виявивши загрозу, вони захоплюють антигени, які допомагають визначити шкідливість елементів, після чого обробляють їх та презентують на своїй поверхні, активуючи імунну відповідь. Тестова програма моделює роботу дендритних клітин за допомогою алгоритму дендритних клітин (DCA), який аналізує сигнали безпеки, небезпеки та підсилюючі молекули. Клітини накопичують ці сигнали та, якщо їх сума перевищує поріг, дозрівають та запускають імунну відповідь [3]. Програма генерує синтетичні дані для аналізу загрози та активності клітин, візуалізуючи їх поведінку на графіку, схожому на діаграму серця, що відображає зміни в імунній

реакції з часом. Таке моделювання корисне у біомедичних дослідженнях, кібербезпеці для виявлення аномалій у мережах, а також у штучному інтелекті для створення систем виявлення загроз та аномалій у даних.

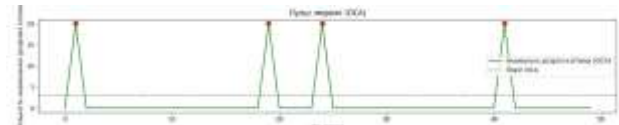


Рисунок. 2. Програма “Імунний пульс”

5. ВИСНОВОК

Було розглянуто два підходи до моделювання імунних процесів: клональна селекція і дендритні клітини. Програмна реалізація клональної селекції на основі групи SO(2) оптимізує рішення через клонування та мутації, що корисно для задач оптимізації. Модель дендритних клітин виявляє аномалії, обробляючи сигнали про загрози. Ці підходи мають застосування в біомедичних дослідженнях для вивчення імунітету та в кібербезпеці для виявлення аномалій у мережах і даних, допомагаючи створювати адаптивні системи, здатні реагувати на нові загрози.

Список літератури

- [1]Штучна імунна система, URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A8%D1%82%D1%83%D1%87%D0%BD%D0%B0_%D1%96%D0%BC%D1%83%D0%BD%D0%BD%D0%B0_%D1%81%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%B5%D0%BC%D0%B0
- [2]Artificial immune systems:principle, algorithms and applications URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/53186933.pdf>
- [3]Виявлення DDoS-атак на основі алгоритму дендритних клітин URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/03e41d97-f1c3-4ab0-ab03-95339149074c/content>

¹ Робота виконана під керівництвом д.т.н., проф. Тетяна Гончаренко.