

Застосування штучного інтелекту на різних етапах ендопротезування колінного суглоба

Вінницький національний технічний університет

Анотація

Проаналізовано 182 публікації (2019–2024 рр.) щодо застосування штучного інтелекту на перед-, пери та післяопераційному етапах тотального ендопротезування коліна. ШІ підвищує об'єктивність діагностики, точність інтраопераційної навігації та ефективність індивідуальної реабілітації, хоча питання прозорості алгоритмів і етичної відповідальності залишаються невирішеними.

Ключові слова: штучний інтелект; машинне навчання; глибоке навчання; тотальне ендопротезування коліна; навігаційна хірургія; прогноз результатів.

Annotation

A review of 182 studies (2019–2024) on artificial intelligence applications across the total knee arthroplasty pathway shows improved diagnostic objectivity, intra operative navigation precision and personalised rehabilitation. Persisting challenges include model interpretability and ethical accountability.

Keywords: artificial intelligence; machine learning; deep learning; total knee arthroplasty; computer assisted surgery; outcome prediction

Вступ

Остеоартрит (ОА) колінного суглоба залишається провідною причиною больового синдрому та функціональних обмежень у пацієнтів старших вікових груп і становить суттєве економічне навантаження на системи охорони здоров'я. За даними епідеміологічного моделювання, у 2020 р. на симптомний ОА коліна страждали близько 86,7 млн людей, що відповідає поширеності 6,7 % у глобальній популяції [1].

Тотальне ендопротезування колінного суглоба (ТКА) лишається «золотим стандартом» лікування термінальних стадій ОА; лише в Україні у 2017–2019 рр. щорічно виконувалося $\approx$ 146 тис. планових ТКА, а до 2030 р. очікується зростання до $> 1,5$ млн втручань на рік. Попри загальну ефективність процедури, до 20 % пацієнтів повідомляють про незадоволення результатами, а частка ревізійних операцій невідомо збільшується [1] [2].

Водночас останні 30 років ознаменовані бурхливим розвитком комп'ютерно асистованої та роботизованої хірургії, що уніфікували інтраопераційні стандарти. Наступним еволюційним етапом стало впровадження штучного інтелекту (ШІ) — узагальненого терміна, що охоплює алгоритми машинного навчання (МН) і глибокого навчання (ГН). ШІ спрямований на розпізнавання складних патернів у багатовимірних клінічних даних, прогнозування подій та пошук оптимальних рішень, нерідко перевершуючи людину за швидкістю та точністю.

Матеріали та методи

Первинним джерелом інформації слугувала систематизована наукова стаття огляд, що проаналізувала 182 публікації PubMed за 2019–2024 рр., де використані MeSH терміни knee arthroplasty / replacement, artificial intelligence, machine learning, deep learning. Виключалися огляди, редакційні статті та роботи, засновані виключно на традиційних статистичних методах без явного компоненту ШІ. Кожне дослідження було класифіковане за етапом застосування ШІ:

1. Передопераційний блок ($n = 35$)
 - Прогнозування потреби у ТКА ($n = 21$)
 - Підтримка спільного прийняття рішень і освітня складова ($n = 14$)
2. Періопераційний блок ($n = 42$)
 - Імплантаційна навігація й балансування м'яких тканин
 - 3D реконструкція з 2D зображень
3. Післяопераційний блок ($n = 105$)
 - Прогнозування ускладнень та функціональних результатів

- Носимі сенсорні системи, ePROM та LLM чат боти

Окрім того, приділено увагу рівню доказовості, типам вхідних даних, метрикам ефективності (AUC, assiguasu, MAE) та етичним аспектам.

Результати та обговорення

1 Передопераційне застосування ШІ

1.1 Прогнозування необхідності ТКА

Моделі градієнтного бустингу, побудовані на основі рентгенологічних ознак, клінічних шкал WOMAC/KOOS та соціально демографічних даних, досягають $AUC = 0,84\text{--}0,88$ при 2 річному прогнозі операції. Додавання ознак атрофії чотириголового м'яза та інтра МАТ, отриманих через автоматизовану сегментацію MPT, підвищує дискримінаційну здатність до $AUC \approx 0,90$ — особливо у молодших пацієнтів з ранніми стадіями ОА [3] [4].

1.2 Інтелектуальні системи підтримки рішень (DSS)

Три рандомізовані контрольовані дослідження (RCT) переконливо показали, що персоналізовані DSS на базі ШІ зменшують декілька аспектів клінічної невизначеності:

- Якість рішення. Збільшення сумарного індексу Decision Quality Instrument на 12–18 %, $p < 0,01$.
- Активність пацієнта у shared decision making. Підвищення рівня участі у співвідношенні 1,4:1 проти контролю.
- Функціональний результат через 6 міс. Середнє покращення WOMAC Pain на 7,6 пунктів (MCID ≥ 5).

Така динаміка опосередковано знижує ризик «пост ТКА невдоволення», яке часто пов'язують із нереалістичними очікуваннями [4] [5].

2 Періопераційне застосування ШІ

2.1 Інтраопераційні сенсорні платформи

AI сенсор, інтегрований у технологію електронної тонкої плівки між феморальним та тибіальним компонентами, у кадаверному досліді демонструє точність 83,4 % у визначенні абсолютного навантаження та 84,6 % у локалізації сили. Протокол клінічного випробування ($n = 120$ пацієнтів) наразі перебуває у фазі набору. Первинна кінцева точка — відсоток випадків, де медіальна/латеральна різниця < 15 Н при 90° флексії [6] [7].

2.2 2D→3D реконструкція та автоматизований підбір імплантатів

Алгоритм UNet подібної архітектури, натренований на парах рентген–КТ, генерує високоточно ($MAE \leq 1,8$ мм) поверхні дистального стегна та проксимальної великогомілкової кістки з однієї 2D проєкції. Це скорочує передопераційне планування на ≈ 12 хв, а кількість випадків «mismatch» імплантата зменшується на 43 %.

2.3 Безконтактна навігація RGB D

Пілотне дослідження 15 пацієнтів підтвердило життєздатність ГН сегментації кісткових поверхонь за допомогою RGB D камер без маркерів. Середня величина deviance angle вирівнювання склала $1,9^\circ \pm 1,3$, що співвідноситься з традиційною оптичною навігацією, однак уникає ризику відриву К дротів і зменшує інвазивність процедури [5] [8].

3 Післяопераційне застосування ШІ

3.1 Прогностичні моделі післяопераційних результатів

У когорті з 291 пацієнта порівнювалися шість класів алгоритмів (RF, XGBoost, SVM, k NN, MLP, логістична регресія). XGBoost виявився найпрогностично ефективнішим для підшкал KOOS Pain та KOOS ADL ($MAE = 4,3$ та $4,9$ пунктів відповідно). Глибина дерев ≥ 6 збільшувала ризик перенавчання — оптимальні гіперпараметри визначалися методом Bayesian Optimization.

3.2 Носимі ML сервіси реабілітації

Комерційна браслет платформа з трьома IMU датчиками та хмарною MLP моделлю досягла чутливості 92 % у розпізнаванні ROM шаблонів та 80 % у визначенні дотримання програми вправ. Пацієнти охарактеризували портал зворотного зв'язку як «мотиваційний», а 92 % бажали продовжити використання після 12 тижневого курсу [9] [10] [11].

3.3 LLM чат боти та ePROM

Prospective RCT порівняла відповіді ChatGPT 3.5 та ортопедичних медсестер на 25 типових післяопераційних запитань. Експертна оцінка ортопедів підтвердила адекватність обох джерел ($mean\ score \geq 4,0/5$), але 90,1 % пацієнтів висловили обережність щодо довіри до ШІ без людського контролю.

Висновок

Комплексний аналіз 182 досліджень свідчить: ШІ проник у всі фази ендопротезування колінного суглоба, формуючи вагомі передумови для підвищення точності діагностики, персоналізації хірургічної тактики та оптимізації реабілітації. Найбільш зрілі інструменти — прогностичні моделі післяопераційних результатів і інтраопераційні 3D навігаційні системи; найдинамічніше зростає сегмент DSS для пацієнтів. Подальший прогрес залежить від розв'язання питань інтерпретованості, етичної відповідальності й стандартизації зовнішньої валідації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Тимчик С.В., Штофель Д.Х. Регенеративна медицина та 3D друк для біомедичної інженерії: Конспект лекцій. – Вінниця: ВНТУ, 2020.
2. Anderson J.B., Agrawal D.K. *Artificial intelligence applications across the knee arthroplasty continuum*. 2024.
3. Kastrup N. et al. *AI-based patient decision support: trial protocol*. *Trials* 2023.
4. Mahmoud K. et al. *Predicting total knee replacement using machine learning*. *BMJ Surg Interv Health Technol* 2023.
5. Mohajer B. et al. *Thigh muscle MRI segmentation with deep learning*. *Radiology* 2022.
6. Al-Nasser S. et al. *AI-powered load sensor for TKA*. *Sensors* 2024.
7. Fernandes L.R. et al. *2D-to-3D knee reconstruction accuracy*. *J Arthroplasty* 2023.
8. Harris A.H.S. et al. *Machine learning prediction of KOOS outcomes*. *J Arthroplasty* 2021.
9. Ramkumar P.N. et al. *Wearable ML surveillance platform for TKA rehabilitation*. *J Arthroplasty* 2019.
10. Langenberger B. et al. *Treatment effect heterogeneity via causal forests in arthroplasty*. *Comput Biol Med* 2023.
11. Bains S.S. et al. *Large language models for postoperative patient queries*. *J Arthroplasty* 2024.

Сидорук Олег Олександрович - аспірант гр 163-23а, кафедра біомедичної інженерії та оптико-електронних систем, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця.

Науковий керівник: **Коваль Леонід Григорович** - к.т.н., доцент, завідувач кафедри біомедичної інженерії та оптико-електронних систем, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця

Oleh Oleksandrovyich Sydoruk - graduate student gr 163-23a, department of biomedical engineering and optical-electronic systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia.

Supervisor: **Koval Leonid Hryhorovych** - Ph.D., Associate Professor, Head of the Department of Biomedical Engineering and Optical-Electronic Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia