

РЕЦЕНЗІЯ

на дисертаційну роботу Соломатіна Владислава Андрійовича
на тему «Розроблення моделей та програмного забезпечення підтримки
прийняття рішень під час діагностики за медичними даними»,
представлену на здобуття ступеня доктора філософії
за спеціальністю 121 Інженерія програмного забезпечення

Актуальність теми дослідження

Стрімкий розвиток методів штучного інтелекту та глибинного навчання зумовлює їхнє широке впровадження в медичну практику, зокрема для автоматизованого аналізу медичних зображень. Одним із найпоширеніших і найдоступніших методів первинної діагностики захворювань органів грудної клітки залишається рентгенографія. Проте інтерпретація таких знімків потребує значного досвіду лікаря-радіолога та є доволі трудомісткою. Автоматизоване виділення серцевої області на рентгенограмах є важливим етапом побудови сучасних систем підтримки прийняття лікарських рішень, оскільки забезпечує можливість отримання об'єктивних морфометричних характеристик серця та підвищує точність його подальшого аналізу.

Незважаючи на вагомі успіхи сучасних моделей семантичної сегментації, проблема точного визначення меж серцевої області на рентгенографічних зображеннях залишається актуальною. Це зумовлено низькою контрастністю окремих ділянок, високою анатомічною варіативністю, накладанням тіней суміжних органів і анатомічних структур, а також обмеженою кількістю якісно розмічених медичних даних. У зв'язку з цим виникає потреба в розробленні нових архітектур нейронних мереж, здатних більш ефективно враховувати морфологічні особливості серця та його контурну інформацію.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуального науково-прикладного завдання — розробленню моделей і методів автоматизованої сегментації серцевої області на рентгенографічних зображеннях органів грудної клітки із застосуванням сучасних підходів глибинного навчання. Запропоновані автором рішення мають наукову новизну, практичну спрямованість та можуть бути використані як складова систем підтримки прийняття клінічних рішень, а також у подальших дослідженнях у галузі аналізу медичних даних.

Таким чином, тематика дисертаційної роботи відповідає сучасним тенденціям розвитку інформаційних технологій у медицині, а отримані наукові результати є важливими для вдосконалення методів комп'ютерного аналізу медичних зображень і засобів діагностичної підтримки.

Оцінка змісту дисертації

Дисертаційна робота складається зі вступу, 4-х розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Повний обсяг роботи становить

190 сторінок, з яких 149 сторінок займає основний текст. Дисертація містить 21 рисунок, 10 таблиць, список використаних джерел із 93 найменувань та 2 додатки.

У вступі автором обгрунтовано актуальність обраної тематики, визначено мету, завдання, об'єкт, предмет і методи дослідження, сформульовано наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, наведено відомості про особистий внесок здобувача, апробацію матеріалів дослідження та публікації за темою дисертації.

Перший розділ присвячено аналізу сучасного стану досліджень у галузі автоматизованої сегментації медичних зображень. Автором розглянуто класичні та сучасні підходи до сегментації рентгенографічних зображень органів грудної клітки, виконано їх критичний аналіз, визначено існуючі обмеження та обгрунтовано необхідність застосування сучасних архітектур глибокого навчання.

У другому розділі наведено методологічні засади побудови нової нейромережевої моделі сегментації серцевої області, описано процедуру формування навчальної, валідаційної та тестової вибірок, викладено методику підготовки та нормалізації рентгенографічних зображень, формалізовано алгоритми виділення контурних інформаційних ознак, а також обгрунтовано обрані критерії оптимізації та метрики оцінювання ефективності сегментації.

Третій розділ містить опис програмно-апаратної реалізації розробленої моделі *CardioEdgeBioMorphNet*, описано її архітектуру та принцип функціонування, наведено обгрунтування використання розроблених компонентів *EdgeMorphBlock*, *DMGGA*, *Adaptive Boundary Rejection*, а також інших модулів, що забезпечують підвищення якості виділення серцевої області на *CXR*-зображеннях.

У четвертому розділі представлено архітектуру та програмну реалізацію розробленого модуля сегментації як складової частини системи підтримки прийняття клінічних рішень та результати експериментальних досліджень. Наведено порівняльну оцінку отриманих результатів із базовими та сучасними архітектурами за метриками, викладено результати абляційного аналізу, а також представлено варіанти практичної реалізації розроблених рішень.

У висновках узагальнено отримані наукові та практичні результати щодо розроблення моделей і методів автоматизованого аналізу рентгенограм відповідно до поставлених завдань, а також визначено перспективні напрями подальшого розвитку запропонованої моделі.

Перелік використаних джерел охоплює праці, які відображають сучасний стан досліджень у галузі штучного інтелекту та аналізу медичних даних, що свідчить про належне опрацювання наукової бази за тематикою дослідження.

У цілому дисертаційна робота характеризується системністю, логічною послідовністю викладу матеріалу та повною відповідністю поставленій меті й завданням дослідження.

Новизна наукових положень, висновків і рекомендацій

Наукові положення, висновки та рекомендації, сформульовані в дисертаційній роботі, є достатньо обґрунтованими та характеризуються науковою новизною. У роботі запропоновано новий підхід до автоматизованої сегментації серцевої області на рентгенограмах органів грудної клітки, який базується на розробленій автором нейромережевій моделі *CardioEdgeBioMorphNet* і спрямований на підвищення точності виділення серцевої ROI шляхом поєднання морфологічно орієнтованих та *edge-aware* (контурно-орієнтованих) механізмів.

Серед результатів, які отримані при виконанні досліджень, слід зазначити наступні, які мають наукову новизну:

1. **Уперше розроблено** морфологічно орієнтовану нейромережеву архітектуру *CardioEdgeBioMorphNet* для автоматизованої сегментації серцевої області на рентгенограмах, яка, на відміну від існуючих аналогів, комплексно поєднує аналіз багатомасштабних ознак з окремим *edge*-потокм на основі оператора Собеля, диференційовним механізмом морфологічної уваги (*DMGGA*) та гілкою адаптивного прикордонного відкидання (*ABR*), що забезпечує підвищення точності локалізації межі та запобігає «розбуханням» маски.
2. **Удосконалено** базовий морфологічний блок шляхом інтеграції *edge-aware* компонентів, механізму каналної уваги (*SEBlock*) та морфологічного керування ознаками (*Gating*), що дозволило підвищити чутливість моделі до виділення складних, низькоконтрастних та затінених ділянок контуру серцевого силуету.
3. **Набуло** подальшого розвитку експериментальне обґрунтування комплексного використання морфологічно-орієнтованих та *edge-aware* механізмів для сегментації серцевої області.
4. **Запропоновано** підхід до інтеграції результатів сегментації з автоматизованим формуванням клінічного висновку, який базується на комплексному аналізі розподілу ймовірностей у межах виділеної області серця (*ROI*), оцінці показника впевненості та відносної площі прогнозованих пікселів у межах класифікаційного рішення, що розширює функціональні можливості систем підтримки прийняття клінічних рішень.

Обґрунтованість отриманих результатів підтверджуються тим, що автором виконано комплексне експериментальне дослідження з використанням базових моделей семантичної сегментації та проведено абляційний аналіз, який дозволив оцінити окремий внесок кожного із запропонованих компонентів у загальний результат. Отримані експериментальні дані підтверджують доцільність розроблених архітектурних рішень.

Рекомендації щодо використання розробленої моделі та програмного забезпечення є логічним продовженням проведеного дослідження, ґрунтуються на результатах експериментальної перевірки та можуть бути використані при створенні систем підтримки прийняття лікарських рішень.

а також у подальших дослідженнях у галузі автоматизованого аналізу медичних зображень.

Практичне значення результатів роботи

Практичне значення дисертаційної роботи полягає в розробленні нейромережевої моделі *CardioEdgeBioMorphNet* та відповідного програмного забезпечення, призначених для автоматизованої сегментації серцевої області на рентгенограмах органів грудної клітки з подальшим формуванням допоміжного класифікаційного висновку.

У результаті виконаного дослідження створено програмний комплекс, який реалізує повний цикл аналізу *CXR*-зображень: завантаження та попередню обробку даних, автоматизовану сегментацію серцевої області, формування класифікаційного висновку та візуалізацію отриманих результатів. Запропонований підхід забезпечує автоматичне виділення серцевої ROI без необхідності ручного окреслення її меж, що сприяє скороченню часу обробки зображень і підвищує відтворюваність результатів.

Практичну цінність становлять також реалізовані в моделі архітектурні рішення, які забезпечують більш точне відтворення контурів серця та зменшують кількість хибнопозитивних включень (*FP*) за рахунок використання блоку *EdgeMorphBlock*, *Sobel edge*-потoku, механізму морфологічної уваги, багатомасштабного аналізу та модуля *Adaptive Boundary Rejection*.

Розроблене програмне забезпечення надає можливість перегляду сегментаційної маски, її накладання на вихідну рентгенограму, аналізу контурів серцевої області, визначення ймовірного клінічного класу та рівня впевненості моделі. Використання сформованої *ROI*-маски дозволяє уточнювати результати класифікації шляхом аналізу ймовірностей безпосередньо в межах сегментованої серцевої області.

Отримані результати можуть бути використані під час створення систем підтримки прийняття клінічних рішень, у наукових дослідженнях, пов'язаних з аналізом медичних даних, а також у навчальному процесі під час підготовки фахівців у галузі штучного інтелекту, комп'ютерного зору та медичної інформатики.

Достовірність та обґрунтованість результатів

Наукові положення, висновки та результати, наведені у дисертаційній роботі, є достатньо обґрунтованими та достовірними.

Обґрунтованість сформульованих у роботі рішень забезпечується коректною постановкою наукової задачі, використанням сучасного математичного й нейромережевого апарату, а також належним вибором засобів програмної реалізації.

Достовірність отриманих результатів підтверджується проведенням експериментальних досліджень із використанням навчальної, валідаційної та тестової вибірок, порівняльним аналізом із сучасними архітектурами-аналогами та виконанням абляційного аналізу окремих компонентів розробленої моделі. Якість сегментації серцевої області та розпізнавання

патологічних станів оцінювалася за допомогою комплексу комп'ютерних та клінічних метрик: просторового перекриття (*ROI Dice*, *Mean Dice*, *ROI IoU*, *Mean IoU*), попиксельної точності класифікації серцевої зони (Acc_{heart}) та точності розпізнавання домінантного класу (Acc_{cls}).

У цілому результати дисертаційної роботи є теоретично й експериментально підтвердженими та достатніми для сформульованих автором підсумкових висновків і практичних рекомендацій.

Зауваження до дисертації

Позитивно оцінюючи дисертаційну роботу в цілому, вважаю за необхідне висловити такі зауваження:

1. **Абляційне дослідження** підтверджує ефективність окремих компонентів запропонованої архітектури. Разом із тим було б корисно більш детально пояснити причини різного впливу окремих модулів на кінцеві результати сегментації.

2. У дисертації основну увагу приділено показникам якості сегментації. Разом із тим практичний інтерес становив би **аналіз обчислювальної складності моделі**, швидкодії та можливості її використання в інформаційних системах.

3. У дисертаційній роботі основними критеріями оцінювання якості виділення серцевої області інтересу (*ROI*) та порівняльного аналізу нейромережових моделей обрано коефіцієнт *Dice* та індекс *IoU*. Проте для повнішого підтвердження ефективності морфологічно-орієнтованої архітектури *CardioEdgeBioMorphNet* та її спеціалізованих модулів (*EdgeMorphBlock*, *DMGGA*, *ABR*) доцільно було б доповнити експериментальне дослідження контурними метриками, зокрема *HD/HD95*, *ASSD* або *Boundary Dice*, які більш чутливі до якості відтворення анатомічних меж.

4. Під час оцінювання якості покласової сегментації на тестовій вибірці важливе значення має математична коректність агрегації усереднених метрик (*Mean Dice*, *Mean IoU*). Розрахунок покласового середнього без урахування множини фактично присутніх на конкретному знімку класів ($C = \{k : |R_k| > 0\}$) може штучно занижувати підсумкові показники через ділення на класи, для яких еталонна розмітка відсутня ($|R_k| = 0$). У зв'язку з цим автору доцільно уточнити формульні вирази для *Mean Dice* та *Mean IoU* у розділах 2 та 4, чітко задекларувавши фільтрацію за присутніми у розмітці класами, а також обґрунтувати внесок спеціалізованих модулів *EdgeMorphBlock* та *ABR* у стабілізацію підсумкових метрик вже на основі уточненої методики розрахунку.

5. Впроваджений для усунення хибнопозитивних відгуків модуль *ABR* (підрозділи 2.1, 3.7) прогнозує динамічний поріг $\tau(X)$ у межах $[\tau_{min}, \tau_{max}]$. Проте в розділі 4 бракує: аналізу чутливості до вибору граничних значень $[\tau_{min}, \tau_{max}]$ та їхнього впливу на метрики *ROI Dice* і *ROI IoU*; порівняння з фіксованим порогом (наприклад, $t \in \{0.3, \dots, 0.8\}$),

що необхідно для кількісного підтвердження доцільності окремої порогової голови в декодері.

6. Усі обчислювальні експерименти проводилися з масштабуванням вхідних рентгенограм (*CXR*) до розміру 128×128 пікселів. Для медичної візуалізації таке суттєве зниження роздільності може привести до стертості та втрати дрібних контурних деталей і градієнтних переходів. Це суперечить концепції розробки *edge-aware* та морфологічно-орієнтованої мережі, адже втрачається сенс використання спеціалізованих блоків уточнених меж (модуль злиття контурних ознак, контурний *edge-aware* на основі оператора Собеля) на сильно згладженому зображенні. У дисертації відсутній порівняльний аналіз для вищих роздільностей (256×256 чи 512×512), який би обґрунтував обраний компроміс між точністю та обчислювальною складністю.

7. Схема розбиття датасету у підрозділі 2.2 (80/10/10) гарантує лише відсутність дублювання імен файлів зображень, але не регламентує розподіл на рівні унікальних пацієнтів (*Patient – level Split*). Якщо вибірка містить серійні знімки одного пацієнта, їх потрапляння одночасно до навчальної та тестової множин спричиняє прихований витік даних (*Data Leakage*) і штучно завищує оцінку реальної якості сегментації.

Слід підкреслити, що зауваження висвітлюють напрями для розвитку розробленої нейромережевої архітектури, проте не спростовують головних наукових результатів, отриманих завдяки проведенню масштабної експериментальної роботи.

Повнота викладення результатів досліджень в опублікованих працях

Основні наукові положення, результати та висновки дисертаційної роботи достатньою мірою відображені в опублікованих наукових працях автора. За темою дисертації опубліковано 12 наукових праць, з яких 5 статей у наукових фахових виданнях України, включених до категорії «Б», та 7 тез доповідей на міжнародних наукових конференціях.

Опубліковані праці повною мірою висвітлюють основні етапи проведеного дослідження, зокрема результати аналізу сучасних підходів до сегментації медичних зображень, реалізації окремих морфологічних та *edge-aware* компонентів, результати експериментальних досліджень і оцінювання ефективності запропонованої моделі.

Зміст опублікованих праць відповідає темі дисертації, відображає її наукову новизну, практичне значення та основні результати дослідження. Обсяг і рівень апробації результатів є цілком достатніми й повністю відповідають вимогам МОН України до дисертаційних робіт на здобуття наукового ступеня доктора філософії (PhD).

Загальні висновки

Дисертаційна робота Соломатіна Владислава Андрійовича на тему «Розроблення моделей та програмного забезпечення підтримки прийняття рішень під час діагностики за медичними даними» є завершеним, самостійно виконаним науковим дослідженням, у якому розв'язано

актуальне науково-практичне завдання, що полягає у підвищенні точності автоматизованої сегментації серцевої області та розробленні програмного комплексу для формування допоміжного класифікаційного висновку на основі поєднання багатомасштабного аналізу, контурних потоків та диференційованих морфологічних механізмів глибинного навчання.

Результати дослідження характеризуються завершеністю, достовірністю та високим рівнем відповідності поставленій меті, демонструючи чітко виражену спрямованість на розв'язання актуальної науково-практичної задачі з автоматизації аналізу медичних зображень.

Враховуючи обсяг виконаних досліджень, наукову новизну, обґрунтованість і практичну цінність отриманих результатів, дисертація повністю відповідає вимогам Наказу Міністерства освіти і науки України № 40 від 12 січня 2017 р. та Постанови Кабінету Міністрів України № 44 від 12 січня 2022 р. зі змінами. Соломатін Владислав Андрійович заслуговує присудження ступеня доктора філософії за спеціальністю 121 Інженерія програмного забезпечення.

Рецензент

доцент кафедри
інженерії програмного забезпечення
та інформаційних технологій
Дніпровського національного університету
імені Олеся Гончара
кандидат фіз.-мат. наук, доцент



Лілія БОЖУХА

Підпис канд. фіз.-мат. наук, доцента Божухи Л.М. засвідчую:

Проректор з наукової роботи
Дніпровського національного університету
імені Олеся Гончара
кандидат біологічних наук, професор



Олег МАРЕНКОВ