

АНОТАЦІЯ

Чапалюк Б. В. Системи автоматичної медичної комп'ютерної діагностики з використанням методів штучного інтелекту — Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 122 — Комп'ютерні науки. — Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”, Київ, 2021.

Мета даного дисертаційного дослідження полягає в детальному розгляді, розробці та удосконаленні систем автоматичної комп'ютерної діагностики раку легень використовуючи методи штучного інтелекту, зокрема застосовуючи та удосконалюючи останні досягнення в області глибинного навчання.

Для діагностування раку легенів в сучасних медичних закладах використовують комп'ютерну томографію, що представляє собою тривимірне зображення легенів пацієнту, отримане за допомогою рентгенівського променя, що пошарово та поступово проходить через тканини людського тіла в різних напрямках, з різних кутів та положень. Такий вид зображень використовується в роботі для аналізу присутності пухлини в легенях за допомогою згорткових нейронних мереж. Однак, такі особливі дані накладають свої складності в розробці систем медичного комп'ютерного діагностування, оскільки при роботі з ними необхідно враховувати їхню тривимірну природу та відповідні просторові зв'язки. Тому, в дисертаційному дослідженні розглядається три основні підходи для роботи з такими даними:

1. Використання двовимірної згорткової нейронної мережі. Для кожного шару КТ знімка застосовується згорткова нейронна мережа.

Виходи мережі для кожного шару знімку об'єднуються та фінальний висновок робиться на основі правил навчання за набором зразків.

2. Використання тривимірних згорткових нейронних мереж, які враховують тривимірну природу вхідних даних та можуть віднайти корисні патерни використовуючи всі три просторові осі. Часто, такі системи розділяють задачу на декілька етапів, кожен з яких використовує тривимірну згорткову нейронну мережу налаштовану під конкретну підзадачу.
3. Використання комбінованої структури двовимірної згорткової та рекурентної нейронних мереж. В такому підході двовимірну згорткову нейронну мережу використовують для представлення вхідних даних в менш мірному просторі шляхом навчання многовиду меншої розмірності. Завдяки цьому на кожному шарі КТ зображення будуть виділятися тільки найбільш важливі високорівневі ознаки. Отримані ознаки обробляються двонаправленою рекурентною нейронною мережею з вентиляним вузлом (англ. *bidirectional gated recurrent neural network*), яка навчається складним нелінійним функціям, що описують просторові залежності та вплив між ними. Вихід рекурентної мережі повертає ймовірність наявності пухлини на знімку.

В рамках даного дисертаційного дослідження проводиться аналіз та виконується експерименти для кожного підходу, а отримані результати порівнюються з роботами інших авторів. Експерименти показують, що найбільш точними є системи побудовані із декількох тривимірних згорткових нейронних мереж (одна мережа сегментує потенційні проблемні регіони, інша класифікує присутність в таких регіонах пухлини). Однак, такі системи мають дуже великі обчислювальні вимоги, через те що використовують операцію тривимірної згортки, вимоги до обчислювальної потужності якої ростуть

кубічно зі збільшенням розмірності вхідного зображення. В такому випадку, запропонована архітектура рекурентної згорткової нейронної мережі дозволяє отримати точність роботи системи на достатньо високому рівні, в той же час використовуючи значно менш вимогливу до обчислювальних потужностей та пам'яті операцію двовимірної згортки.

Наукова новизна отриманих результатів дисертації полягає в запропонованому здобувачем методі побудови комбінованої структури системи комп'ютерної діагностики, що полягає в поєднанні двовимірної згорткової та двонаправленої рекурентної нейронної мережі LSTM. На відміну від інших рішень, така система враховує просторові зв'язки між різними шарами знімку комп'ютерної томографії шляхом використання двонаправленої рекурентної нейронної мережі, на вході якої використовують високорівневі ознаки сформовані за допомогою двовимірної згорткової нейронної мережі. Високорівневі ознаки будуються для кожного шару знімку пацієнта. За результатами експериментів така архітектура нейронної мережі змогла досягти значення AUC ROC на рівні 83%, що трохи нижче у порівнянні з системами тривимірних згорткових нейронних мереж, що показують значення AUC ROC на рівні 90-95%. Однак, отримані результати є найвищими результатами для рекурентних нейронних мереж, що застосовуються для побудови систем комп'ютерної діагностики раку легенів. Також, запропонована архітектура має вищу швидкодію, що досягається шляхом використання операції двовимірної згортки замість операції тривимірної згортки, вимоги якої до обчислювальної потужності та пам'яті ростуть квадратично з розміром вхідних даних, а не кубічно.

Для ефективного навчання комбінованої структури згорткової рекурентної нейронної мережі був запропонований механізм м'якої уваги, що надав можливість нейронній мережі отримати інформацію про локацію

пухлини під час навчання. Згідно проведених експериментів, такий підхід допоміг покращити показники метрики AUC ROC більш ніж на 8%.

Практичне значення отриманих результатів полягає в розширенні та удосконаленні існуючих методів побудови систем комп'ютерної діагностики. Запропонована комбінована структура згорткової нейронної мережі та двонаправленої рекурентної мережі дозволяє отримати достатньо високу точність роботи системи та підвищує точність роботи системи у порівнянні з використанням звичайних рекурентних нейронних мереж. Також, така система відзначається використанням меншої кількості ресурсів чим у тривимірної згорткової нейронної мережі. Проведені експерименти та аналіз існуючих методів систем комп'ютерної діагностики дозволив сформулювати необхідні вимоги та підходи, які потрібно використовувати в залежності від пріоритету швидкодії чи точності роботи системи. Запропонований механізм м'якої уваги дозволяє значно підвищити ефективність навчання комбінованих архітектур згорткових рекурентних нейронних мереж.

Результати дисертаційного дослідження впроваджено в НДР за темою "Розроблення та дослідження методів обробки, розпізнавання, захисту та зберігання медичних зображень в розподілених комп'ютерних системах" за номером держ реєстрації 0117U004267 (тема №2021п, код КВНТД І.1 01.05.02). Також, основні результати роботи викладені в 6 друкованих наукових роботах, з них двоє статей в наукових фахових виданнях України, 2 опубліковано в іноземних журналах, що індексується в Google Scholar та інших базах даних, 1-а стаття у виданні, що входить до Web of Science Core Collection та SCOPUS. Також опубліковано одну роботу в тезах доповідей міжнародної наукової конференції.

Ключові слова: глибинне навчання, згорткова нейронна мережа, рекурентна нейронна мережа, механізм уваги, тривимірна згортка, система автоматичної медичної комп'ютерної діагностики раку легенів.

ABSTRACT

Chapaliuk B. V. Computer-aided diagnostic systems with artificial intelligence methods usage. — Qualification scientific work in the form of manuscript.

Thesis for doctor of philosophy degree in speciality 122 {{ Computer science. — National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, 2021.

The primary purpose of the thesis research is to consider and analyse, develop, and improve computer-aided detection systems for lung cancer using artificial intelligence methods. In particular, work examines, applies, and improves the latest achievements in the field of deep learning.

The modern medicine practice recommends using low-dose computed tomography (also called CT scan) of the human chest to investigate lung cancer presence. CT scan represents a three-dimensional image of the patient’s lungs obtained by the X-ray that gradually passes through the human body’s tissue, layer by layer, in different directions, angles, and positions. Such images are usually used for computer-aided lung cancer detection systems based on convolution neural networks. However, such special data impose additional difficulties in building and implementing computer-aided diagnosis systems because implementation should consider the three-dimensional nature of the data and related spatial dependencies. That’s why thesis research considers three main approaches for working with such data types:

1. The first approach uses a two-dimensional convolution neural network. In this approach, the convolution neural network is applied for each layer in the CT scan, and network outputs are combined by predefined rules. The final inference is based on the rules of multiple-instance learning.
2. The second approach uses three-dimensional convolution neural networks that take into account the three-dimensional data nature, which

can learn the pattern among all three dimensions. Often, systems that use 3D convolutional neural networks divide the problem into several stages. In this case, each step was responsible and configured for a specific subtask.

3. The third approach uses a combined structure of convolution and recurrent neural networks. In this case, the convolution neural network is used to represent input data in the lower dimensional space by learning the manifold in the lower dimensional space. Due to this, each processed CT scan layer represents only the most useful highlevel features. These high-level features are examined and combined by the bidirectional gated recurrent neural network that learned complex patterns. The patterns describe dependencies and spatial relationships that can be used to diagnose lung cancer. The output of recurrent neural networks returns the probability of lung cancer presence on the CT scan.

In the scope of the dissertation research, each approach is investigated and analysed in detail. For each approach, experiments were created for the approach checking, compared to the results of works with other authors. The experiment results show the most precise inference has the systems based on the several three-dimensional neural networks (one network segments potentially dangerous pulmonary nodules; meanwhile, the second network classifies the presence of cancer in the segmented regions). However, such neural networks have huge computational power and memory requirements. The reason is the usage of three-dimensional convolution operation, in which computation power requirements grow cubically when the input image dimension increases. Conversely, the proposed structure of the convolution and recurrent neural network show results that are precise enough and meanwhile, use a much less computationally and memory demanding operation: the two-dimensional convolution operation.

The scientific novelty of the thesis results is the creation of the methods to build a combined structure of the two-dimensional convolutional neural network and bidirectional recurrent neural network LSTM. Unlike other solutions, such a system takes into account spatial relationships between different CT scan layers by using bidirectional recurrent neural networks. The input of the recurrent neural network consists of the high-level features retrieved from the two-dimensional convolution neural network. The high-level features are built for each layer. The experiment results show that such a neural network achieves 83% of AUC ROC metric. That number is lower than the number three-dimensional neural networks show, which can reach 90-95% of AUC ROC metric. Nevertheless, obtained results are the highest results that were achieved for recurrent neural networks used for lung cancer detection systems. Also, the proposed neural network architecture has higher performance characteristics, which is achieved by using a two-dimensional convolution operation instead of a three-dimensional convolution.

In addition, the soft-attention mechanism was proposed to improve the learning process effectiveness of the combined structure of convolutional and recurrent neural networks. The proposed mechanism of explicit attention gives the neural network information about the cancer location during the training process. Per the experiments, the proposed mechanism improved the AUC ROC metrics value by more than 8%.

The practical significance of the obtained results is the ability to extend and improve existing methods of building computer-aided lung cancer diagnosis systems. The proposed combined structure of the convolutional and bidirectional recurrent neural networks allows for achieving a high enough precision level of system work and increasing system precision compared to the simple recurrent neural network usage. Also, the proposed architecture uses much less memory and has lower computation requirements than threedimensional neural networks. Conducted experiments and analysis of existing methods for building computer-

aided lung cancer detection systems enable formulating requirements and approaches that should be used depending on the priority of the performance or precision. The proposed soft attention mechanism makes the learning of the convolutional recurrent neural network more effective.

The results of the dissertation research were captured in the scientific research work “Development and Study of Methods of Medical Images Processing, Recognition, Protection and Storing in Distributed Computer Systems” (Ref. No. 2021p, Reg. No. 0117U004267). Also, the main results were published in six scientific work print pieces; two of the papers were articles in Ukrainian scientific professional publications, two papers were in a foreign scientific journals that are indexed in Google Scholar and other scientific databases, and another paper was in a magazine indexed in the Web Of Science Core Collection and Scopus. In addition, there is an article published in international conference thesis collection.

Key words: deep learning, convolution neural network, recurrent neural network, attention, three-dimensional convolution, computer-aided lung cancer detection system.

Список публікацій здобувача:

Статті у періодичних наукових виданнях держав, які входять до Організації економічного співробітництва та розвитку та/або Європейського Союзу

1. Chapaliuk B. Overview of the three-dimensional convolutional neural networks usage in medical computer-aided diagnosis systems / B. Chapaliuk // American Journal of Neural Networks and Applications. – 2020. – № 2 (6). – pp. 22-28. (Америка). (Було показано чому для обробки тривимірних даних краще використовувати тривимірну згортку замість двовимірної. Зроблено огляд існуючих рішень на основі тривимірних згорткових нейронних мереж).

Статті у наукових фахових виданнях України

2. Chapaliuk B. V. Огляд методів сегментації медичних зображень / B. V. Chapaliuk, Y. P. Zaychenko // Системні дослідження та інформаційні технології. – 2018. – №1. - С. 72–81. *(Детально розглянуті багато-атласні методи для вирішення задачі сегментації необхідних областей на медичних знімках).*

3. Chapaliuk B. V. Використання рекурентних нейронних мереж для автоматичної діагностики раку легенів / B. V. Chapaliuk, Y. P. Zaychenko // Системні дослідження та інформаційні технології. – 2019 – №3. – С. 33–40. *(Запропоновано комбіновану структуру архітектури нейронної мережі, що складається з двовимірної операції згортки та двонаправленої рекурентної нейронної мережі. Для підвищення ефективності навчання нейронної мережі було запропоновано використати «механізм уваги».*

]Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації та інші публікації

4. Чапалюк Б. В., Зайченко Ю. П.: Автоматична медична діагностика на базі зображень комп'ютерної томографії, System Analysis and Information Technology (SAIT), Травень 2018, ст. 155, Київ, Україна.

5. B. Chapaliuk and Y. Zaychenko: Deep learning approach in computer-aided detection system for lung cancer, 2018 IEEE First International Conference on System Analysis Intelligent Computing (SAIC), 2018, Kyiv, Ukraine, pp. 1 – 4. *(включено до Web of Science Core Collection та SCOPUS)*

6. B. Chapaliuk and Y. Zaychenko: “Review of semi-supervised learning methods for medical computer-aided diagnosis systems,” 2020 IEEE First International Conference on System Analysis Intelligent Computing (SAIC), Oct 2020. *(включено до Web of Science Core Collection та SCOPUS)*

7. B. Chapaliuk, Y. Zaychenko: End-to-end deep learning strategies for computer-aided lung cancer detection systems, *SCIREA Journal of Mathematics*, vol. 4, no. 5, pp. 140–155, 2019.