

ПРОГНОЗУВАННЯ РОЗПОДІЛУ ДОЗИ ІОНІЗУЮЧОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ В ПРОМЕНЕВІЙ ТЕРАПІЇ ЗА ДОПОМОГОЮ АРХІТЕКТУРИ U-NET

Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця

Анотація

У статті розглядається застосування алгоритмів глибокого навчання для прискорення розрахунку дозиметричних планів у променевої терапії. Проаналізовано ефективність використання архітектури U-Net для прогнозування 3D-розподілу дози іонізуючого випромінювання на основі комп'ютерних томограм. Показано переваги нейромережевого підходу над традиційними аналітичними методами та алгоритмом Монте-Карло у швидкодії за збереження високої точності.

Ключові слова: променева терапія, медична фізика, іонізуюче випромінювання, машинне навчання, U-Net, дозиметрія.

Abstract

The article considers the application of deep learning algorithms to accelerate the calculation of dosimetric plans in radiation therapy. The efficiency of using the U-Net architecture to predict the 3D dose distribution of ionizing radiation based on computed tomography scans is analyzed. The advantages of the neural network approach over traditional analytical methods and the Monte Carlo algorithm in speed while maintaining high accuracy are shown.

Keywords: radiation therapy, medical physics, ionizing radiation, machine learning, U-Net, dosimetry.

Вступ

Сучасна променева терапія онкологічних захворювань вимагає надзвичайно точного планування для підведення максимальної дози іонізуючого випромінювання до пухлини за умови мінімального радіаційного навантаження на навколишні здорові тканини. Золотим стандартом дозиметричного планування є метод Монте-Карло, який моделює фізичні процеси взаємодії фотонів та електронів з біологічною матерією на мікроскопічному рівні [1]. Однак цей статистичний метод є надзвичайно ресурсомістким, і розрахунок одного плану лікування може тривати годинами. Традиційні аналітичні алгоритми працюють швидше, але втрачають точність у середовищах із високим градієнтом щільності (наприклад, межа між легенями та кістками).

Впровадження адаптивної променевої терапії в режимі реального часу потребує алгоритмів розрахунку, які здатні працювати за лічені секунди[2]. Метою даної роботи є дослідження застосування згорткової нейронної мережі архітектури U-Net для миттєвого та точного прогнозування просторового розподілу поглиненої дози[3].

Методика та модель

Для розв'язання задачі регресії (прогнозування безперервних значень поглиненої дози у кожному вокселі) було обрано архітектуру U-Net, яка відмінно зарекомендувала себе у задачах біомедицинської сегментації та трансляції зображень [4].

На вхід нейронної мережі подаються тензори даних, що включають анатомічну інформацію пацієнта (матрицю електронної щільності, отриману з комп'ютерної томограми) та геометричні параметри пучків іонізуючого випромінювання лінійного прискорювача. Структура мережі складається з екодера, який вилучає глибокі просторові ознаки тканин шляхом згортки та субдискретизації, і декодера, який відновлює розмірність для формування фінальної 3D-карти дози.

Наявність прокидних зв'язків (skip-connections) між шарами дозволяє мережі зберігати дрібні анатомічні деталі пацієнта під час генерації прогнозу. Навчання моделі проводилося з використанням функції втрат середньоквадратичної похибки.

$$L = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (D_i - \hat{D}_i)^2$$

де N — загальна кількість вокселів у 3D-масиві, D_i — еталонне значення дози, розраховане фізичним алгоритмом Монте-Карло, а \hat{D}_i — значення дози, спрогнозоване нейромережею.

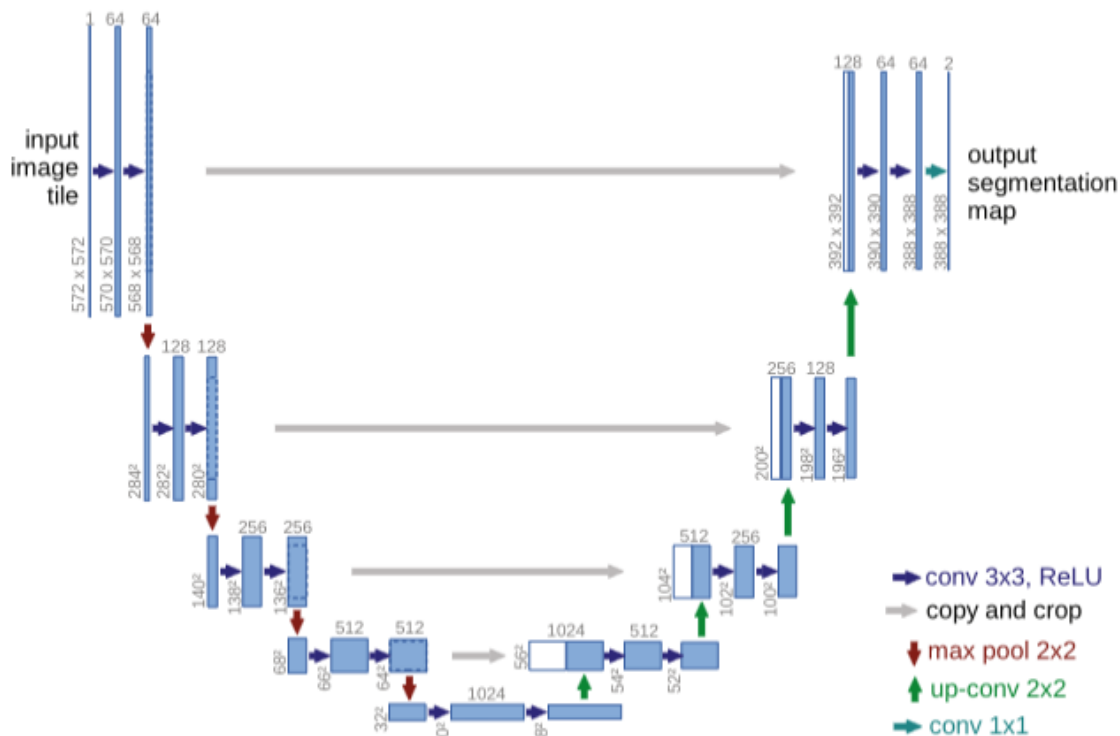


Рис. 1. Архітектура згорткової нейронної мережі U-Net для прогнозування дози [4]

Результати Дослідження

Тестування розробленої моделі проводилося на ретроспективних КТ-знімках та відповідних клінічних планах лікування. Оцінка фізичної достовірності згенерованих дозових розподілів здійснювалася за допомогою стандартного для медичної фізики критерію Гамма-індексу (Gamma Index 3D)[5]. Порівняння результатів наведено у таблиці 1.

Таблиця 1 — Порівняння швидкості та точності методів розрахунку

Метод розрахунку	Середній час інференсу	Проходження Гамма-критерію (3%/3 мм)
Метод Монте-Карло (MC)	~ 240 хв	100% (Еталон)
Аналітичний алгоритм (AAA)	~ 5 хв	96,2%
Розроблена модель U-Net	2 с	95,8%

Застосування методів глибокого навчання дозволило отримати точність (95,8%), яка повністю відповідає суворим міжнародним клінічним стандартам (безпечний поріг становить 95%). При цьому швидкість обчислень на GPU скоротилася до двох секунд, що робить алгоритм придатним для адаптивної терапії безпосередньо під час сеансу опромінення.

Висновки

Застосування архітектури U-Net у медичній фізиці є потужною альтернативою класичним методам розрахунку взаємодії іонізуючого випромінювання з речовиною. Розроблена модель дозволила скоротити час дозиметричного планування на кілька порядків, зберігши клінічну точність. Подальші дослідження будуть спрямовані на врахування радіобіологічних ефектів та інтеграцію моделі з системами КТ-візуалізації в реальному часі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- 1 Reynaert N. Monte Carlo treatment planning for photon and electron beams / N. Reynaert // Radiation Physics and Chemistry. – 2003. – Vol. 68, № 5. – P. 643-686.
- 2 Meyer P. Survey on deep learning for radiotherapy / P. Meyer [et al.] // Artificial Intelligence in Medicine. – 2018. – Vol. 90. – P. 14-25.
- 3 Kearney V. DoseNet: a volumetric dose prediction algorithm using 3D fully-convolutional neural networks / V. Kearney [et al.] // Physics in Medicine & Biology. – 2018. – Vol. 63, № 21. – P. 215022.
- 4 Ronneberger O. U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation / O. Ronneberger, P. Fischer, T. Brox // Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention (MICCAI). – 2015. – P. 234-241.
- 5 Low D. A. A technique for the quantitative evaluation of dose distributions / D. A. Low [et al.] // Medical Physics. – 1998. – Vol. 25, № 5. – P. 656-661.

Адаменко Данило Костянтинович, студент групи 2ПІ-256, Факультет інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: daniladamenko5@gmail.com

Науковий керівник: *Мартинюк Володимир Валерійович* – доцент, кафедри загальної фізики, Вінниця, Вінницький національний технічний університет

Adamenko Danilo Kostyantynovich, student of group 2SE-25b, Faculty of Information Technologies and Computer Engineering, Vinnytsia National Technical University, m. Vinnytsia, e-mail: daniladamenko5@gmail.com

Supervisor: *Martyniuk Volodymyr Valeriiovich*, Associate Professor, Department of General Physics, Vinnytsia, Vinnytsia National Technical University