

УДК 004.92

ВІДТВОРЕННЯ ГЕОМЕТРИЧНОЇ МОДЕЛІ СТРУКТУР СЕРЦЯ ЗА ДОПОМОГОЮ АНАЛІЗУ ОДНОГО УЛЬТРАЗВУКОВОГО ЗОБРАЖЕННЯ

Кройс Назарій Іванович

edinazazaza@gmail.com

Федорін Ілля Валерійович

fedorin.illia@lll.kpi.ua@gmail.com

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
м. Київ, Україна

Анотація – Постійне зростання потреби у впровадженні ефективних технологічних рішень для тривимірної візуалізації серця зумовлене необхідністю покращення діагностики серцево-судинних захворювань. Використання тривимірних моделей серцевих структур дозволяє отримати більш повне уявлення про анатомічні особливості та функціональний стан серця. Традиційні методи тривимірної реконструкції вимагають або спеціалізованого обладнання, або отримання множини ультразвукових зрізів, що не завжди можливо в клінічній практиці через технічні обмеження або стан пацієнта. Метою дослідження було підвищення ефективності візуальної діагностики шляхом розробки методів тривимірного моделювання структур серця на основі аналізу одного ультразвукового зображення. Об'єктом дослідження виступали тривимірні моделі структур серця та ультразвукові зображення, а предметом – методи моделювання тривимірних структур серця на основі двовимірних ультразвукових зображень. В роботі застосовано комплексний підхід, що включає попередню обробку зображень, сегментацію з використанням нейронної мережі U-Net та методи геометричного моделювання, такі як метод Тейхольца та осесиметрична модель. Для розробки та валідації методів використано набір даних SAMUS, що містить 1400 ультразвукових зображень серця. Дані включають двокамерні та чотирикамерні проекції серця, отримані в різних фазах серцевого циклу. Результати дослідження продемонстрували високу ефективність запропонованого підходу до сегментації серцевих структур, що підтверджується досягнутим значенням *dice* коефіцієнту 0.89. Розроблені методи геометричного моделювання дозволяють створювати спрощені, але анатомічно обгрунтовані моделі серцевих структур, що можуть бути використані для попередньої оцінки стану серця в ситуаціях обмеженої доступності даних. Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості швидкого створення тривимірних моделей серця для підтримки прийняття клінічних рішень, особливо в умовах, коли проведення повного ультразвукового дослідження ускладнене. Запропонований підхід може бути інтегрований в існуючі системи ультразвукової діагностики, розширюючи їх можливості без потреби у додатковому спеціалізованому обладнанні.

Ключові слова: ультразвукова діагностика, тривимірне моделювання, сегментація зображень, нейронні мережі, серцеві структури.

I. ВСТУП

Ультразвукова діагностика залишається одним із найважливіших методів візуалізації серця завдяки своїй доступності, неінвазивності та можливості проведення досліджень у реальному часі [1].

Проте двовимірні ультразвукові зображення не завжди дають повне уявлення про просторову структуру серця та взаємозв'язок між його частинами [2]. Особливо це стосується випадків складної патології, коли необхідне точне розуміння просторового розташування серцевих структур.

Сучасні методи тривимірної візуалізації серця базуються переважно на використанні спеціалізованих 3D-датчиків або побудові моделей на основі множини двовимірних зрізів [3, 4]. Хоча такі підходи забезпечують високу точність відтворення анатомічних структур, вони мають суттєві обмеження: необхідність у спеціалізованому обладнанні, тривалий час дослідження та складність отримання якісних зображень у різних проекціях [5].

В контексті цих обмежень особливої актуальності набуває розробка методів, що дозволяють створювати тривимірні моделі на основі мінімальної кількості вхідних даних. Такий підхід може значно розширити можливості діагностики в ситуаціях, коли проведення повного обстеження ускладнене через стан пацієнта або технічні обмеження.

Існуючі дослідження в області тривимірного моделювання анатомічних структур можна розділити на кілька основних напрямків. Перший базується на використанні статистичних моделей форми [6], другий – на геометричних апроксимаціях [7], третій – на методах машинного навчання [8]. При цьому більшість цих підходів орієнтована на роботу з множиною зрізів, і лише невелика кількість досліджень розглядає можливість реконструкції на основі обмежених даних.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Метою даної роботи є підвищення ефективності візуальної діагностики серцево-судинних захворювань шляхом

розробки методів тривимірного моделювання структур серця на основі аналізу одного ультразвукового зображення.

III. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ

3.1 Набір даних

Для розробки та валідації методів використано набір даних CAMUS [9], що містить ультразвукові зображення серця 500 пацієнтів, зібрані в Університетській лікарні Сент-Етьєна, що в Франції. Дані в наборі були отримані за допомогою ультразвукового сканера GE Vivid E95 та проби GE M5S. Для навчання нейронної мережі було відібрано 1400 зображень, розділених на тренувальну (70%) та валідаційну (30%) вибірки.

Набір даних включає двокамерні та чотирикамерні апікальні проекції серця, отримані в різних фазах серцевого циклу: кінець діастоли (ED) та кінець систоли (ES). Кожне зображення супроводжується сегментацією лівого шлуночка (LV) та лівого передсердя (LA), що було використано для навчання та валідації моделей сегментації.

3.2 Отримання параметрів моделювання

Запропонований підхід включає декілька послідовних етапів обробки зображень та моделювання.

На першому етапі проводиться попередня обробка ультразвукових зображень для зменшення шуму. Для цього використовується медіанний фільтр, який необхідний для зменшення впливу спекл-шуму, характерного для ультразвукових зображень [10].

Важливим аспектом розробленої методології стало вирішення проблеми відмінності між сучасними та старими ультразвуковими зображеннями. Оскільки нейронна мережа навчалася на наборі даних CAMUS, що містить переважно зображення старшого покоління ультразвукових сканерів, виникла необхідність адаптації сучасних зображень для коректної роботи системи. Для цього було використано метод «штучного старіння» зображень, який включає зменшення контрастності та додавання характерного шуму.

Процес «штучного старіння» реалізується шляхом застосування комбінації гауссового та спекл-шуму, а також модифікації контрастності зображення за допомогою спеціально підібраних коефіцієнтів посилення та зміщення. Це дозволило наблизити характеристики сучасних ультразвукових зображень до тих, на яких навчалася модель, що значно підвищило якість подальшої їх сегментації. Різницю між зображенням до та після «штучного старіння» показано на рисунку 1.

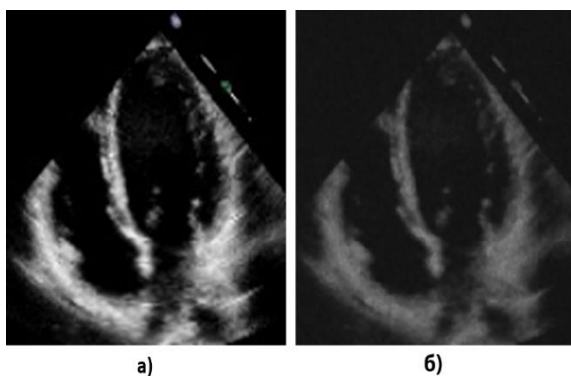


Рисунок 1. Приклад ультразвукових зображень: а) до «штучного старіння»; б) після застосування «штучного старіння»

Для сегментації серцевих структур була розроблена модифікована архітектура нейронної мережі U-Net. На відміну від класичної архітектури, в запропонованій версії використано усереднене агрегування (average pooling) замість максимального агрегування (max pooling), що дозволяє зберегти більше інформації про просторові характеристики зображення [11].

Архітектура мережі складається з енкодера та декодера. Енкодер містить чотири блоки, кожен з яких включає два згорткових шари з 32, 64, 128 та 256 фільтрами відповідно, за якими слідує шар усередненого агрегування. Для запобігання перенавчання використано dropout з коефіцієнтом 0.3 та пакетну нормалізацію.

Для навчання мережі використано комбіновану функцію втрат, що поєднує мультикласовий коефіцієнт Dice та категоріальну фокальну крос-ентропію.

Навчання проводилось протягом 200 епох з використанням оптимізатора Adam та

динамічним зменшенням швидкості навчання. Початкова швидкість навчання становила 0.001 з подальшим зменшенням при виході на плато функції втрат. Аналіз процесу навчання показав стабільне покращення як на тренувальному, так і на валідаційному наборах даних, досягнувши фінального значення dice коефіцієнту 0.9 на валідаційній вибірці.

Після отримання сегментованих областей проводиться визначення геометричних параметрів серцевих структур. Для цього була спроба використати два методи на основі аналізу головних компонент (PCA) [12], та методі обмежувального прямокутника. В результаті порівняння методів, вибір був зроблений на користь PCA, який дозволяє точніше визначити основні осі та розміри камер серця порівняно з методом обмежувального прямокутника. Приклад отримання параметрів за допомогою цих методів показано на рисунку 2.

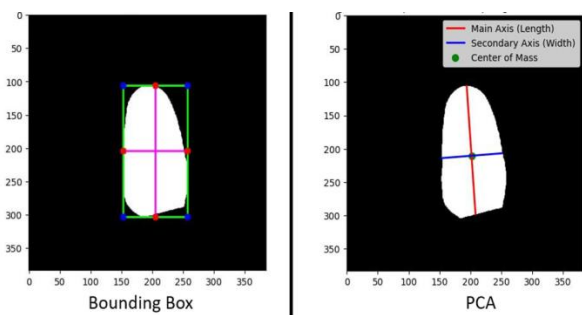


Рисунок 2. Приклад отримання параметрів методом PCA та обмежувального прямокутника

3.3 Методи тривимірного моделювання

Для створення тривимірних моделей серцевих структур реалізовано два основних підходи.

Перший базується на методі Тейхольца, який використовує припущення про еліпсоїдальну форму лівого шлуночка [13]. Цей метод дозволяє швидко отримати базову модель шлуночка на основі вимірювань його довжини та ширини.

В оригінальній формулі Тейхольца, довжина вираховується, як сума двох ширин і вже на основі цього, вираховується об'єм лівого шлуночка. В цій роботі, так як значення довжини вже вдалось отримати з

зображення, то використовується вона замість подвоєння ширини. На основі цієї формули і була створена приблизна модель.

Як саме виглядає це припущення про форму лівого шлуночка показано на рисунку 3 [13].

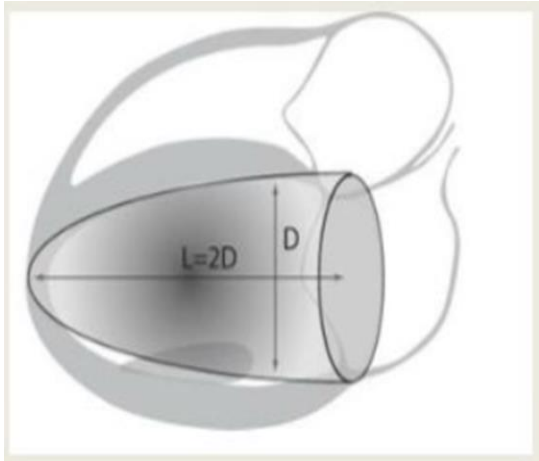


Рисунок 3. Припущення про форму та об'єм LV на основі методу Тейхольца

Другий підхід використовує осесиметричну модель, яка створюється шляхом обертання контуру серцевої камери навколо її довгої осі [14]. Цей метод забезпечує більшу гнучкість у відтворенні форми серцевих структур, особливо у випадках зі складною геометрією.

IV. РЕЗУЛЬТАТИ

Навчання та оцінка моделей нейронних мереж виконувались на ноутбучі з операційною системою Windows 11 Pro, обладнаному процесором AMD Ryzen 7 4800H 2.90 GHz, 32 гігабайтами оперативної пам'яті та графічним процесором NVIDIA GeForce GTX 1650. Для програмної реалізації, створенню тривимірних моделей та навчання нейронних використовувалась мова програмування Python 3.11 з бібліотеками TensorFlow 2.17 та VTK 9.3.

В таблиці 1 представлено основні показники ефективності моделі.

Аналіз процесу навчання показав, що модель досягла стабільних результатів після приблизно 150 епох, при цьому не спостерігалось значного перенавчання, що підтверджується близькими значеннями метрик на тренувальній та валідаційній вибірках.

Що стосується відтворених тривимірних моделей то в результаті їх візуалізації отримали моделі як на рисунку 4 та рисунку 5.

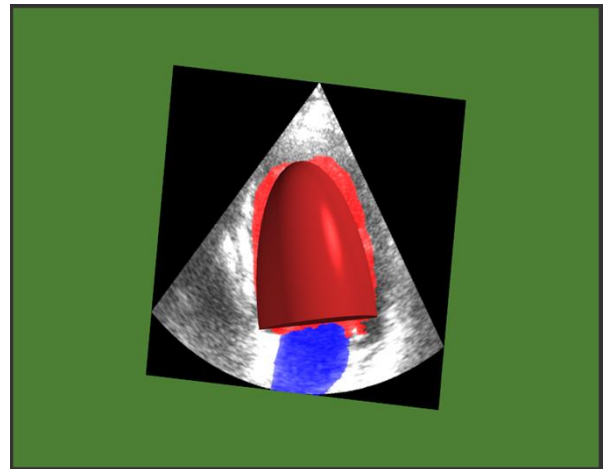


Рисунок 4. Модель LV відтворена на основі методу Тейхольца

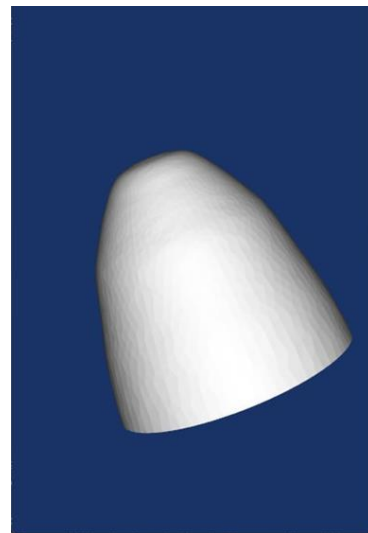


Рисунок 5. Осесиметрична модель LV

Таблиця 1. Результати навчання нейронної мережі для сегментації

Метрика	Тренувальна вибірка	Валідаційна вибірка
Функція втрат	0.056	0.061
Dice коефіцієнт	0.904	0.896

Розроблена система демонструє стабільну роботу при сегментації як лівого шлуночка, так і лівого передсердя. Особливо важливим є те, що система зберігає ефективність при роботі з зображеннями різної якості, включаючи випадки з підвищеним рівнем шуму та різним контрастом.

Основними обмеженнями розробленого підходу є:

- Необхідність попередньої обробки сучасних ультразвукових зображень
- Залежність від якості вхідного зображення
- Обмеження у відтворенні дрібних анатомічних деталей

Подальші дослідження можуть бути спрямовані на:

- Розширення можливостей системи для роботи з іншими проекціями серця
- Покращення методів попередньої обробки зображень
- Розробку методів автоматичної адаптації до різних типів ультразвукових сканерів

V. ВИСНОВОК

В результаті проведеного дослідження було розроблено та реалізовано підхід до створення тривимірних моделей серцевих структур на основі аналізу одного ультразвукового зображення. Принципова відмінність запропонованого підходу від інших рішень полягає у можливості створення тривимірної моделі на основі лише одного ультразвукового зображення, тоді як традиційні методи вимагають множини зрізів або спеціалізованого обладнання.

Для вирішення задачі сегментації серцевих структур було розроблено модифіковану архітектуру нейронної мережі U-Net, яка продемонструвала високу ефективність при виділенні контурів серцевих камер, досягнувши значення dice коефіцієнту 0.89 на валідаційній вибірці.

Важливим аспектом роботи стала розробка методу адаптації сучасних ультразвукових зображень для їх коректної обробки. Запропонований підхід «штучного старіння» зображень, що включає модифікацію контрастності та додавання характерного шуму, дозволив ефективно обробляти зображення з різних типів ультразвукових сканерів.

Розроблені методи геометричного моделювання забезпечують можливість створення анатомічно обґрунтованих тривимірних моделей серцевих структур, які можуть бути використані для попередньої оцінки стану серця в ситуаціях, коли проведення повного обстеження ускладнене.

Практична цінність розробленого підходу полягає в можливості його інтеграції в існуючі системи ультразвукової діагностики без необхідності придбання додаткового спеціалізованого обладнання.

Подальший розвиток системи може бути спрямований на розширення її функціональних можливостей, зокрема додавання підтримки інших проекцій серця, вдосконалення методів попередньої обробки зображень та розробку алгоритмів автоматичної адаптації до різних типів ультразвукових сканерів та розширенню кількості доступних методів моделювання.

Фінансування. Дане дослідження не отримувало зовнішнього фінансування.

Конфлікт інтересів. Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

ORCID ID та внесок авторів:

[0009-0008-6642-1314](https://orcid.org/0009-0008-6642-1314) (А, В) Nazarii Krois
[0000-0002-0611-9120](https://orcid.org/0000-0002-0611-9120) (С, D, E) Iliia

Fedorin

А – Концепція роботи та дизайн, В – Проектування та реалізація, С – Критичний огляд, D – остаточне схвалення статті, E – експертна думка

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Федорін І., Кройс Н. ПРОГРАМНИЙ ДОДАТОК ДЛЯ ВІЗУАЛІЗАЦІЇ ТА ОБРОБКИ ТРЬОХВИМІРНИХ УЛЬТРАЗВУКОВИХ ЗОБРАЖЕНЬ. Наука і техніка сьогодні. 2023. № 12(26). URL: [https://doi.org/10.52058/2786-6025-2023-12\(26\)-806-819](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2023-12(26)-806-819) (дата звернення: 02.12.2024).
2. Федорін І., Кройс Н. ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ ТА МЕТОДОЛОГІЯ ТРИВИМІРНОЇ КОМП'ЮТЕРНОЇ ВІЗУАЛІЗАЦІЇ УЛЬТРАЗВУКОВИХ ЗОБРАЖЕНЬ. Наука і техніка сьогодні. 2023. № 12(26). URL: [https://doi.org/10.52058/2786-6025-2023-12\(26\)-820-833](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2023-12(26)-820-833) (дата звернення: 02.12.2024).
3. Engineering a freehand 3D ultrasound system / A. Gee та ін. Pattern Recognition Letters. 2003. Т. 24, № 4-5. С. 757–777. URL: [https://doi.org/10.1016/s0167-8655\(02\)00180-0](https://doi.org/10.1016/s0167-8655(02)00180-0) (дата звернення: 02.12.2024).
4. The Role of Automated 3D Echocardiography for Left Ventricular Ejection Fraction Assessment / E. Spitzer та ін. Cardiac Failure Review. 2017. Т. 3, № 2. С. 97. URL: <https://doi.org/10.15420/cfr.2017.14.1> (дата звернення: 02.12.2024).
5. 3D Echocardiography: A Review of the Current Status and Future Directions / J. Hung та ін. Journal of the American Society of Echocardiography. 2007. Т. 20, № 3. С. 213–233. URL: <https://doi.org/10.1016/j.echo.2007.01.010> (дата звернення: 02.12.2024).
6. Heimann T., Meinzer H.-P. Statistical shape models for 3D medical image segmentation: A review. Medical Image Analysis. 2009. Т. 13, № 4. С. 543–563. URL: <https://doi.org/10.1016/j.media.2009.05.004> (дата звернення: 02.12.2024).
7. Precision medicine in human heart modeling / M. Peirlinck та ін. Biomechanics and Modeling in Mechanobiology. 2021. Т. 20, № 3. С. 803–831. URL: <https://doi.org/10.1007/s10237-021-01421-z> (дата звернення: 02.12.2024).
8. Stojanovski, David, Uxio Hermida, Marica Muffoletto, Pablo Lamata, Arian Beqiri, and Alberto Gomez.. Efficient Pix2Vox++ for 3D Cardiac Reconstruction from 2D Echo Views. arXiv. 2022. URL: <https://doi.org/10.48550/ARXIV.2207.13424> (дата звернення: 02.12.2024).
9. Deep Learning for Segmentation Using an Open Large-Scale Dataset in 2D Echocardiography / S. Leclerc та ін. IEEE Transactions on Medical Imaging. 2019. Т. 38, № 9. С. 2198–2210. URL: <https://doi.org/10.1109/tmi.2019.2900516> (дата звернення: 02.12.2024).
10. Karaoğlu O., Bilge H. Ş., Uluer İ. Removal of speckle noises from ultrasound images using five different deep learning networks. Engineering Science and Technology, an International Journal. 2021. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2021.06.010> (дата звернення: 02.12.2024).
11. Mastering U-Net: A Step-by-Step Guide to Segmentation from Scratch with PyTorch. Medium. URL: <https://medium.com/@fernandopalominocobo/mastering-u-net-a-step-by-step-guide-to-segmentation-from-scratch-with-pytorch-6a17c5916114> (дата звернення: 02.12.2024).
12. Detecting Orientation of Objects in Image using PCA and OpenCV. Analytics India Magazine. URL: <https://analyticsindiamag.com/ai-mysteries/detecting-orientation-of-objects-in-image-using-pca-and-opencv/>. (дата звернення: 02.12.2024).
13. PPT - EVALUATION OF SYSTOLIC FUNCTION OF LEFT VENTRICLE BY ECHOCARDIOGRAPHY PowerPoint Presentation - ID:5019216. SlideServe. URL: <https://www.slideserve.com/anaya/evaluation-of-systolic-function-of-left-ventricle-by-echocardiography> (дата звернення: 02.12.2024).
14. Moulton M. J., Secomb T. W. A fast computational model for circulatory dynamics: effects of left ventricle–aorta coupling. Biomechanics and Modeling in Mechanobiology. 2023. URL: <https://doi.org/10.1007/s10237-023-01690-w> (дата звернення: 02.12.2024).

UDC 004.92

RECONSTRUCTION OF THREE-DIMENSIONAL MODEL OF HEART STRUCTURES BASED ON THE ANALYSIS OF A SINGLE ULTRASOUND IMAGE

Nazarii Krois

edinazazaza@gmail.com

Illia Fedorin

fedorin.illia@ill.kpi.ua@gmail.com

National Technical University of Ukraine
«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»,
Kyiv, Ukraine

Abstract – The continuous growth in demand for implementing effective technological solutions for three-dimensional heart visualization is driven by the need to improve cardiovascular disease diagnostics. The use of three-dimensional models of cardiac structures provides a more comprehensive understanding of anatomical features and functional state of the heart. Traditional methods of three-dimensional reconstruction require either specialized equipment or multiple ultrasound slices, which is not always feasible in clinical practice due to technical limitations or patient condition. The aim of this study was to improve the efficiency of visual diagnostics through the development of methods for three-dimensional modeling of heart structures based on the analysis of a single ultrasound image. The object of study was three-dimensional models of heart structures and ultrasound images, while the subject was methods for modeling three-dimensional heart structures based on two-dimensional ultrasound images. The work employed a comprehensive approach including image preprocessing, segmentation using U-Net neural network, and geometric modeling methods such as the Teichholz method and axisymmetric model. For method development and validation, the CAMUS dataset containing 1400 cardiac ultrasound images was used. The data includes two-chamber and four-chamber heart projections obtained at different phases of the cardiac cycle. The results demonstrated high effectiveness of the proposed approach to cardiac structure segmentation, confirmed by achieving a dice coefficient value of 0.89. The developed geometric modeling methods allow creation of simplified but anatomically justified models of cardiac structures that can be used for preliminary heart assessment in situations of limited data availability. The practical significance of the obtained results lies in the ability to quickly create three-dimensional heart models to support clinical decision-making, especially in conditions where conducting a complete ultrasound examination is complicated. The proposed approach can be integrated into existing ultrasound diagnostic systems, expanding their capabilities without requiring additional specialized equipment.

Keywords: ultrasound diagnostics, three-dimensional modeling, image segmentation, neural networks, cardiac structures.