DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.16
УДК 004.932:004.94:616-77

3D сегментація при моделюванні імплантів кісткових дефектів

Четверіков Роман Сергійович[1)]
Аспірант каф. Інформаційних систем
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1401-6850; romonoid85lvl@gmail.com
Антощук Світлана Григорівна[1)]
Д-р техніч. наук, професор каф. Інформаційних систем
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9346-145X; asg@op.edu.ua. Scopus Author ID**:** 8393582500
[1)] Національний університет «Одеська політехніка», пр. Шевченка, 1. Одеса, 65044, Україна

АНОТАЦІЯ

В останні роки стрімко розвинулися способи ефективного так швидкого протезування кісткових дефектів та поранень, по більшості завдяки використанню комп'ютерного моделювання та 3D-друку імплантів. Попит на такі імпланти на жаль не зменшується, особливо в Україні, де через бойові дії кількість пацієнтів з кістковими дефектами б'є всі рекорди. На даний момент найбільш розповсюдженим методом створення кісткових імплантів для черепа людини є моделювання та формування сітчастої титанової краніопластини у спеціалізовану програмному забезпеченню на основі отриманих 3D-сканів пацієнта. Зараз це потребує залученість професійних інженерів для створення багатьох прототипів та кінцевої моделі імпланта. Для того щоб полегшити, прискорити та автоматизувати цей процес необхідно створити систему підготовки даних для 3D друку, яка передбачає інтелектуальний аналіз 3D сканів пацієнта. Така система передбачає обов'язково проведення процедури сегментації 3D зображення, тобто розбиття зображення на спорідненні групи пікселів шляхом присвоєння їм міток і їх відповідне групування. Це особливо важливо для обробки людської анатомії, оскільки різні кістки мають кардинально різні структурні та функціональні характеристики, які повинні бути взяті до уваги під час моделювання імплантів. У випадку роботи з 3D зображеннями річ вже йде не про пікселі, а про вокселі, тобто тривимірні одиниці простору. У якості вхідних при моделюванні кісткових замінників використовувались існуючі датасети або 3D-атласи скелету людини. При використанні вхідних даних реальних пацієнтів необхідно мати на увазі важливість лікарської таємниці, тому дані для аналізу, якщо не використовувати існуючі датасети, повинні збиратися с письмової згоди пацієнтів, та всі метадані повинні бути видалені перед використанням у датасеті.

В цих тезах досліджено методи лікування кісткових дефектів та основні методики кісткової пластики, порівняно їх переваги та недоліки. Описано процес алопластичної трансплантації та розглянуто як на даний момент в ньому використовується 3D-моделювання. Наведено аналіз методів сегментації та показано, що перспективним є використання нейронних мереж, що дозволяє спростити процес моделювання імплантів кісткових дефектів, спираючись на досвід інших досліджень. Підкреслено які складності можуть існувати у випадку використання цієї методики.

Ключові слова: 3D-моделювання; 3D зображення; сегментація; аналіз даних; нейронна мережа; кістковий дефект; скелет людини; імплант

Актуальність дослідження. Упродовж останніх років надзвичайно активно розвиваються підходи та технології застосування 3D-друку для виготовлення імплантів при кісткових дефектах. Водночас цей процес і досі вимагає значних витрат часу, фінансів і участі висококваліфікованих фахівців зі створення 3D-моделей [1]. В умовах повномасштабної війни в Україні різко зросла кількість поранених, серед яких багато пацієнтів із пошкодженнями кісткової системи. Тому актуальним стає пошук більш раціональних і швидких способів використання технологій 3D-друку для протезування.

Мета дослідження. Дослідити процес моделювання імплантів кісткових дефектів в Україні та світі й визначити напрями для автоматизації та спрощення процесу моделювання шляхом проведення попереднього інтелектуального аналізу 3D зображень.

Основні матеріали дослідження. За останнє століття медицина зазнала радикальних змін. Багато хвороб і травм, що колись призводили до смерті або тяжкої інвалідності, сьогодні піддаються лікуванню або значному коригуванню. Наприклад, сучасні протези ніг можуть майже повністю відтворювати функції справжніх кінцівок, тоді як у минулому вони лише допомагали стояти. Для лікування переломів і дефектів кісток тепер застосовуються не лише традиційна ампутація з наступним протезуванням, а й методи Ілізарова, Маскельє та інші [2]. Кісткова пластика також істотно вдосконалилася. Титанові виливки та сітки залишаються найбільш міцними й біоінертними імплантами, але через високу вартість, вагу та складність надання їм естетичної форми їх використання обмежене, особливо при реконструкції черепа [3].

This is an open access article under the CC BY license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.uk)

Необхідність кісткової пластики може виникати на різних ділянках тіла, тому до процесу залучаються лікарі кількох спеціалізацій: ортопеди, стоматологи, отоларингологи та травматологи.

Основними методами кісткової пластики є:

- **Аутотрансплантація.** Використовується власна кістка пацієнта, зазвичай із ділянок, де втрата тканини не критична (череп, ребра, клубова або малогомілкова кістка). Метод має високу ефективність у приживленні трансплантата, але супроводжується травматизацією донорської ділянки.
- **Алотрансплантація.** Для відновлення використовуються кістки іншої людини — донора або померлого, який дав згоду на посмертне використання тканин. Метод потребує перевірки сумісності та наявності спеціальних банків кісток із належними умовами зберігання.
- **Алопластика.** Замість кісткової тканини застосовуються природні або синтетичні полімери. Цей спосіб вважається найбільш перспективним, оскільки не потребує донорських матеріалів, проте може мати ризики відторгнення або проблем із якістю імпланта.

Саме при алопластиці активно досліджується використання 3D-друку для створення імплантів чи їхніх форм [4, 5].

Загалом алопластика включає кілька етапів:

1) проведення комп'ютерної томографії та отримання КТ-зображення у форматі DICOM;
2) завантаження даних до програмного середовища для 3D-моделювання імпланта й планування операції [6];
3) 3D-друк імпланта відповідно до форми дефекту та вибраного матеріалу;
4) хірургічне втручання з трансплантацією.

Післяопераційний період може тривати місяці та потребує регулярного контролю, аби вчасно виявити ускладнення чи відторгнення.

Найбільш складним та ресурсозатратним залишається другий етап – створення необхідних прототипів та кінцевої моделі імпланта. Цех етап вимагає від лікарів або спеціально залучених інженерів з наявністю високої компетенції та знаннь не тільки в анатомії тіла людини, а й в роботі з 3D-моделями та спеціалізованим сучасним програмним забезпеченням для аналізу результів комп'ютерної томографії, тобто КТ-зображень.

Тому перспективним є створення системи підготовки даних для 3D друку, яка передбачає інтелектуальний аналіз 3D сканів пацієнта.

Важливим етапом аналізу 3D зображень є сегментація, тобто процес розділення зображень на певні частини або «сегменти» зі спільними характеристиками. На щастя скелет людини об'єкт по більшості сталий за структурою, тому розбіжностей в даних для навчання повинно бути не так багато, як в деяких інших предметних областях.

Існує багато методів та способів сегментації, які підходять до тих чи інших ситуацій краще. Семантична сегментація – це така техніка комп'ютерного зору, яка використовує мітки для позначання та сегментування кожного пікселя в залежності від його семантичного вмісту. Ці мітки можна підготувати для навчального датасету, для того щоб, наприклад, нейронна мережа розуміла, де на зображенні знаходиться та чи інша секція скелету/кісток. Ця методика більше підходить для нестандартної анатомії чи паталогій та є більш гнучкою, за наявності великого датасету. Недоліком ж такої методики є той факт, що створення масок таких міток це дуже затратний по часу процес.

Інший підхід до сегментації який може бути застосований це сегментація на основі атласу. Він полягає у тому, що використовується «еталонне» анатомічне 3D-зображення (атлас) із готовою розміткою. Коли скан пацієнта реєструють, тобто вирівнюють та трансформують до форми в атласі, атласна розмітка переноситься на зображення пацієнта, сегментуючи його за зразком. Такий підхід зручний коли немає великого обсягу навчальних даних, але він чутливий до відмінностей від «нормальної» анатомії та деформацій, що зазвичай супроводжують травматичні кісткові дефекти.

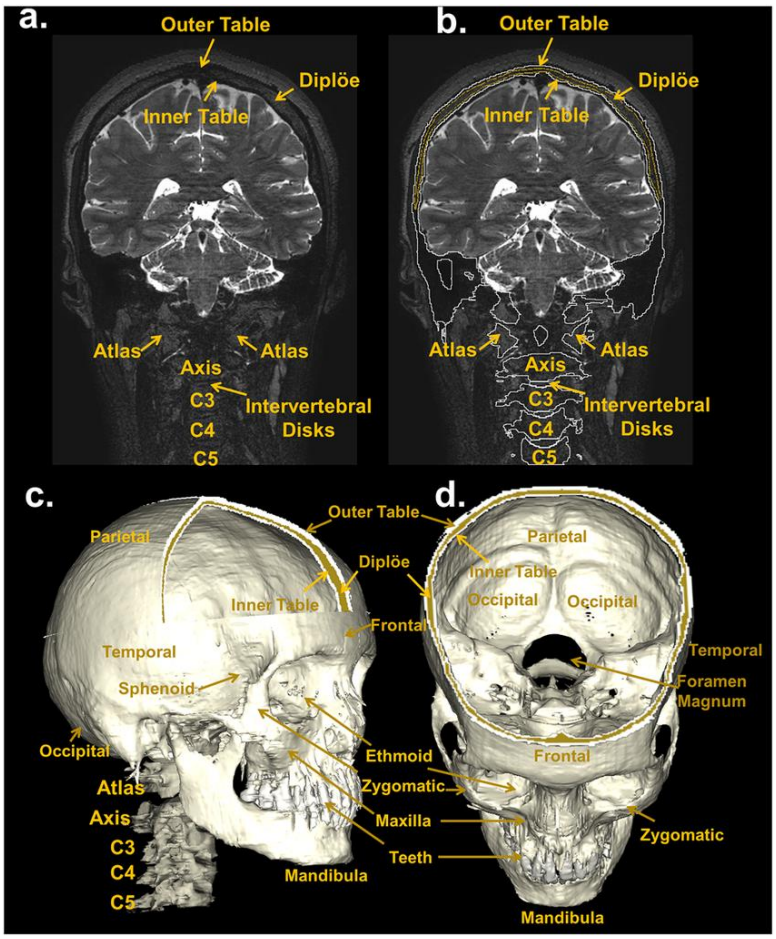
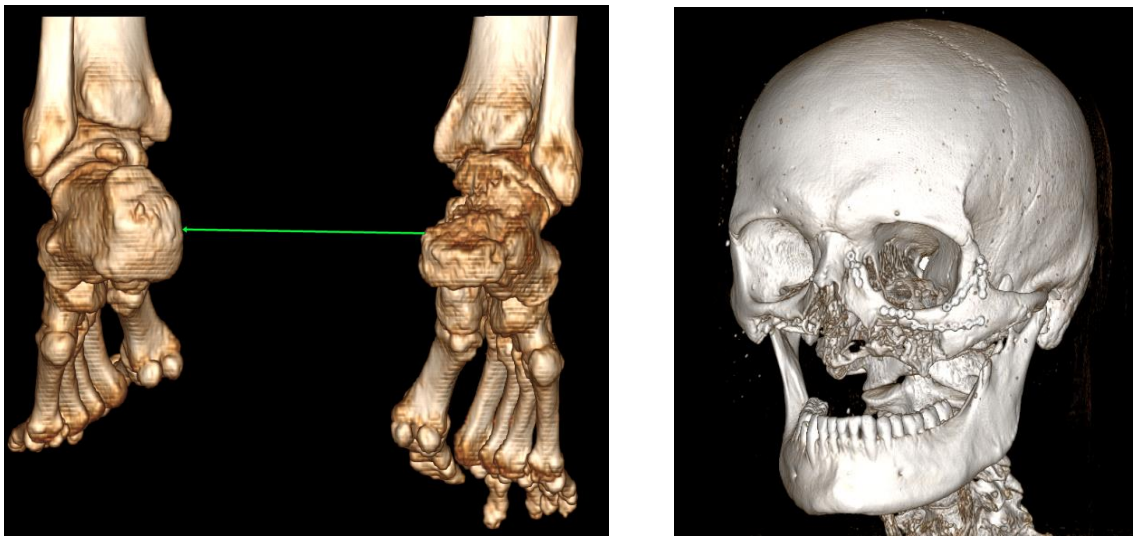


Рис.1. **Сегментація костей черепу та хребту:**
a – МРТ-скан черепа та хребців;
b – цей же скан з виділеними білим контуром кортікальними, а жовтим губчастими частинами кісток;
c, d – 3D модель черепа та хребців шийного відділу з маркуванням окремих секцій [7]

Ще один алгоритм сегментації який може бути особливо корисним в контексті обробки зображень черепу людини це алгоритм «вододілу» (watershed segmentation), названий так через його імітацію природнього процесу затоплення рельєфу водою. Принцип його роботи полягає в уявному заливанні «долин» (об’єктів) водою починаючи з локальних мінімумів, і коли «води» різних мінімумів перетинаються вони створюють «гори» чи «дамби» – межі сегментованих об’єктів. Такий метод активно застосовується коли структури злиті або щільно прилягають одне до одного. Його недоліком можна вважати необхідність дуже ретельної підготовки та фільтрації зображення від шумів та важливість правильного вибору початкових точок.

Глибинне навчання передбачає навчання багатошарових нейронних мереж, які наслідують принципи роботи людського мозку. У процесі обробки даних мережа поступово виявляє все складніші ознаки, що дає змогу застосовувати її як для аналізу медичних зображень, так і для генерації нових. Уже зараз такі моделі використовуються для діагностики та аналізу зображень у радіології, онкології та патології [8]. Нейромережі, навчені на великих масивах даних, здатні виявляти патології навіть там, де лікар може пропустити проблему.

Скелет людини має виражену симетрію, що відкриває два можливі підходи. Якщо дефект розташований на ділянці, де є дзеркальна здорова частина, можна реконструювати бракуючу форму шляхом порівняння. Якщо ж пошкодження симетричні або множинні, доцільним буде порівняння із «еталонною» моделлю скелета, створеною на основі даних здорових пацієнтів чи медичних 3D-атласів. На рис. 2 продемонстровано приклади симетричних, так асиметричних кісткових дефектів.



а *б*

Рис. 2. **Дефект правої п’яткової кістки, що має симетричну їй здорову ліву п’яткову кість (*а*) та руйнація верхньої щелепи, для якої немає здорової дзеркальної копії (*б*)**

У низці країн уже проводилися дослідження із застосування глибинного навчання для створення імплантів кісток черепа та ребер. Результати показали певні успіхи, однак із суттєвими обмеженнями щодо розмірів і типів дефектів [9,10]. Вони зазвичай використовували архітектуру 3D U-Net – повністю згорткову нейронну мережу, розроблену спеціально для сегментації біомедичних зображень. Іншою розглянутою архітектурою нейронних мереж, яку було б доцільно використовувати для генерації імплантів можна зазначити 3D Generative Adversarial Network(3D-GAN) – варіацію генеративної змагальної мережі допрацьованої для роботи з 3D-зображеннями. Ця архітектура полягає в роботі двух мереж, генератора та дискримінатора, паралельно для навчання один одного на створенні більш якісніших зображень [11]. Можливий також варіант комбінування архітектур, наприклад використання 3D U-Net для локальної реконструкції дефекту і після цього використання генеративних змагальних мереж для фінальної деталізації геометрії імпланту.

Іншими проблемами залишаються потреба у великих масивах якісних даних для навчання моделей, питання фіксації імпланта та дотримання етичних вимог щодо використання медичних даних. Крім того, DICOM-файли займають великі обсяги пам’яті, що потребує створення спеціальних сховищ.

Висновки. Проведені дослідження показали, що аналіз 3D зображень, особливо на основі використання нейронних мереж, може істотно спростити процес створення 3D-імплантів для відновлення кісткових дефектів. Водночас, навчання нейронної мережі потребує великих обсягів вхідних даних та скоріш за все буде недостатньо точним при обробці скелета людини цілком, що зумовлює доцільність роботи з окремими ділянками скелета для підвищення точності моделей. Зазначено основні методи сегментації зображень, які вже використовуються в обробці медичних даних та створенні 3D-моделей. Показано, що перспективними для цього є методи глибинного навчання.

Важливо також визначити оптимальне програмне забезпечення для перетворення КТ-зображень у 3D-моделі, які стануть основою для навчання нейронної мережі та обрати найбільш доцільний метод чи їх сукупність для сегментації зображень.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Bedo T., Ion Munteanu S., Popescu I., Chiriac A., Alin Pop M., Milosan I., Munteanu D. “Method for Translating 3D Bone Defects into Personalized Implants Made by Additive Manufacturing”. *11th International Conference on Materials Science & Engineering*. 2019; 19: 1032–1040. DOI: https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2019.08.018.

2. Hrytsai M., Kolov H., Sabadosh V., Vyderko R., Polovyi A., Hutsailiuk V. “Main Surgical Methods of Critical Tibial Bone Defects Replacement (Literature Review). Part II”. *TERRA ORTHOPAEDICA*, 2024; 2 (121); 45–53. DOI: https://doi.org/10.37647/2786-7595-2024-121-2-45-53.

3. Wind J., et al. “Immediate titanium mesh cranioplasty for treatment of postcraniotomy infections.” *World Neurosurgery*. 2013; 79 (1): 207.e11–207.e13. DOI: https://doi.org/10.1016/j.wneu.2011.02.013.

4. Qu Z., Yue J., Song N., Li S. “Innovations in three-dimensional-printed individualized bone prosthesis materials: revolutionizing orthopedic surgery: a review”. *International Journal of Surgery*. 2024; 110 (10): 6748–6762. DOI: https://doi.org/10.1097/JS9.0000000000001842.

5. Mayfield C. K., Ayad M., Lechtholz-Zey E., Chen Y., Lieberman J. R. “3D-Printing for Critical Sized Bone Defects: Current Concepts and Future Directions”. *Bioengineering*. 2022; 9 (11): 680. DOI: https://doi.org/10.3390/bioengineering9110680.

6. Chen X., Xu L., Li X., et al. “Computer-aided implant design for the restoration of cranial defects”. *Sci Rep* . 2017; 7: 4199. DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-017-04454-6.

7. Iacono M., Neufeld E., Akinnagbe E., et al. “MIDA: A Multimodal Imaging-Based Detailed Anatomical Model of the Human Head and Neck.” *PLoS ONE*. 2015; 10: e0124126. DOI: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0124126.

8. Thakur, G., et al. “Deep Learning Approaches for Medical Image Analysis and Diagnosis.” *Cureus*. 2024; 16 (5): e59507. DOI: https://doi.org/10.7759/cureus.59507.

9. Wu C. T., Yang Y. H., Chang Y. Z. “Three-dimensional deep learning to automatically generate cranial implant geometry”. *Sci Rep*. 2022; 12: 2683. DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-022-06606-9.

10. Chaubey G., Farooq A., Singh A., Mishra D. “RibCageImp: A Deep Learning Framework for 3D Ribcage Implant Generation”. *arXiv*. 2024. DOI: https://doi.org/10.48550/arXiv.2411.09204.

11. Wu J., Zhang C., Xue T., Freeman W.T., Tenenbaum J. B. “Learning a Probablistic Latent Space of Object Shapes via 3D Generative-Adversarial Modeling”. *arXiv*. 2017. DOI: https://doi.org/10.48550/arXiv.1610.07584.

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.16
UDC 004.932:004.94:616-77

3D-segmentation in modeling of bone defect implants

Roman S. Chetverikov[1)]
Postgraduate Student of the Department of Information Systems
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1401-6850; romonoid85lvl@gmail.com
Svitlana G. Antoshchuk[1)]
Doctor of Engineering Sciences, Professor of the Department of Information Systems
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9346-145X; asg@op.edu.ua. Scopus Author ID**:** 8393582500
[1)] Odesa Polytechnic National University, 1, Shevchenko Ave. Odesa, 64044, Ukraine

ABSTRACT

In recent years, methods for efficient and rapid prosthetics of bone defects and injuries have advanced significantly, largely due to the use of computer modeling and 3D printing of implants. Unfortunately, the demand for such implants continues to grow, especially in Ukraine, where the number of patients with bone defects has reached record levels due to ongoing military actions. Currently, the most common method for creating cranial bone implants involves modeling and designing a mesh titanium cranioplasty plate using specialized software based on 3D scans of the patient. This process still requires the involvement of professional engineers to create multiple prototypes and the final implant model. To simplify, accelerate, and automate this process, it is necessary to develop a data preparation system for 3D printing that includes intelligent analysis of the patient's 3D scans. Such a system must necessarily include a 3D image segmentation procedure – dividing the image into related pixel groups by assigning labels and grouping them accordingly. This step is especially important when processing human anatomy, as different bones have fundamentally distinct structural and functional characteristics that must be taken into account during implant modeling. In the case of 3D images, the process deals not with pixels but with voxels — three-dimensional spatial units. For modeling bone substitutes, existing datasets or 3D atlases of the human skeleton are often used as input data. When working with data from real patients, medical confidentiality must be strictly observed. Therefore, if existing datasets are not used, the data must be collected with the patients' written consent, and all metadata must be removed before inclusion in the dataset. This paper examines methods for treating bone defects and the main techniques of bone plastic surgery, comparing their advantages and disadvantages. The process of alloplastic transplantation is described, along with the current applications of 3D modeling in this field. An analysis of segmentation methods is presented, demonstrating that the use of neural networks appears to be a promising approach, as it can simplify the modeling of bone defect implants based on insights from previous studies. The paper also highlights the potential challenges that may arise when applying this methodology.

Keywords: 3D-modeling; 3D image; segmentation; data analysis; neural network; bone defect;;human skeleton, implant