

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Електронної та біомедичної інженерії

(повна назва)

Кафедра біомедичної інженерії

(повна назва)

АНОТАЦІЯ кваліфікаційної роботи

рівень вищої освіти другий (магістерський)

другий (магістерський)

Метод моделювання та 3D друку індивідуального ендопротезу для
остеоінтеграції

(тема)

Виконав:

студент 2 курсу, групи БМІм-23-1

Кузнецов О. В.

(прізвище, ініціали)

Спеціальність 163 – Біомедична інженерія

(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна

(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Біомедична інженерія

(повна назва освітньої програми)

Керівник доц. Носова Т.В.

(посада, прізвище, ініціали)

ВСТУП

Індивідуальне ендопротезування поступово стає одним із найперспективніших напрямів сучасної біомедичної інженерії. Стандартні імпланти, які використовуються в ортопедії, часто не враховують анатомічних особливостей пацієнтів, що може призводити до підвищеного ризику післяопераційних ускладнень. З розвитком новітніх технологій (3D-друк) з'явилася можливість виготовляти пацієнт-специфічні імпланти, які ідеально відповідають анатомії конкретного пацієнта [1-3].

Особливого значення набуває розробка методів для оптимізації остеointegraції – процесу зрощення імпланта з кістковою тканиною. Впровадження стохастичних і регулярних структур у конструкції імплантів, а також вибір відповідних матеріалів що значно покращують цей процес. Проте, у сучасній науковій літературі все ще бракує потрібної кількості комплексних досліджень, які охоплюють всі етапи – від сегментації медичних даних та розробки операційних моделей до друку готового виробу [4-6].

Дана робота спрямована на створення методу моделювання пацієнт-специфічних моделей та 3D-друку індивідуальних ендопротезів, що базується на інтеграції сучасних технологій, аналітичних інструментів і практичного досвіду та аналізу вже наявних досліджень для вирішення зазначених проблем.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Кваліфікаційна робота присвячена розробці методу моделювання та 3D-друку індивідуального ендопротезу для остеоінтеграції. Основна мета дослідження полягає у створенні ефективного підходу до виготовлення пацієнт-специфічних імплантатів на основі даних медичної візуалізації, застосування сучасних методів цифрового моделювання та впровадження адитивного виробництва для виготовлення високоточних імплантатів [7-9].

У першому розділі досліджено медико-технічні аспекти ендопротезування. Проведено аналіз сучасних підходів до виготовлення ендопротезів та визначено їх переваги і недоліки [10]. Розглянуто традиційні серійні імпланти та індивідуальні імплантати, які виготовляються індивідуально для кожного пацієнта [11]. Було встановлено, що індивідуальні ендопротези дозволяють досягти кращої анатомічної відповідності та остеоінтеграції, однак їхнє виробництво є дорогим і тривалішим [12]. Також розглянуто різновиди імплантів за місцем встановлення, типом фіксації та методом виробництва, представлено класифікацію імплантів за місцем встановлення (рис.1.1) [13].

Важливим етапом роботи є отримання даних із медичних візуалізаційних систем [14]. У роботі досліджено методи отримання зображень, зокрема комп'ютерну томографію (КТ), магнітно-резонансну томографію (МРТ) та денситометрію [15]. Визначено їхні переваги, обмеження та можливості використання у створенні цифрових 3D-моделей кісткових структур. Порівняно параметри роздільної здатності, точності та вихідних форматів даних для різних методів візуалізації, наведено схему процесу діагностики та отримання томографічних зображень, що використовуються для подальшого аналізу [16].

Другий розділ присвячено розробці алгоритму проектування пацієнт-специфічної моделі. На основі отриманих DICOM-зображень у програмному

середовищі 3D Slicer виконано сегментацію та подальше моделювання анатомічних структур [17-27]. Використано різні методи обробки зображень, зокрема граничний метод, медіанний фільтр, порогову обробку та метод активних контурів. Оцінено якість сегментації за допомогою метричних показників, таких як RMSE (середньоквадратична похибка), Dice Similarity Coefficient (DSC) та Hausdorff Distance (HD). Представлено розроблений алгоритм обробки медичних зображень (рис 2.1) у програмному середовищі 3D Slicer, та приклад сегментованої 3D-моделі (рис 2.4). Продемонстровано власний практичний досвід з використання алгоритму на практиці (рис 2.13 – 2.15) [28-34].

У третьому розділі було розглянуто ключові аспекти розробки індивідуальних ендопротезів та визначено основні матеріали для їхнього виготовлення. Було встановлено, що титанові сплави, зокрема Ti-6Al-4V, є найбільш придатними для остеоінтеграції (рис 3.5). Проведено аналіз полімерних матеріалів, які можуть використовуватися для виготовлення тимчасових імплантів або хірургічних шаблонів.

Особливу увагу приділено використанню регулярних і стохастичних структур у конструкції імплантів. Було встановлено, що регулярні структури, забезпечують оптимальну міцність при мінімальній вазі, тоді як стохастичні структури імітують природну кісткову тканину та сприяють остеоінтеграції.

Використання методу Selective Laser Melting дозволяє створити імпланти з мікропористою поверхнею, що покращує їхню фіксацію в організмі без застосування цементної фіксації. Практичне застосування розробленого методу у майбутньому зможе показати, що запропонований підхід дозволяє отримати індивідуальні імпланти високої точності, які можуть бути ефективно використані у клінічній практиці.

ВИСНОВКИ

У ході роботи було розроблено ефективний метод створення індивідуальних імплантів, який включає етапи медичної візуалізації, цифрового моделювання та 3D друку. Запропонований підхід дозволяє значно покращити точність та якість імплантів завдяки використанню передових технологій аналізу томографічних зображень та 3D-друку.

Розроблений алгоритм сегментації у програмному середовищі 3D Slicer дозволив досягти високої точності анатомічного моделювання, що підтверджується результатами математичного аналізу геометрії моделей. Практичний досвід довів, що ретельний підбір методів фільтрації та сегментації є критично важливим для отримання коректних цифрових моделей.

Використання титанових сплавів у поєднанні з пористими структурами забезпечує оптимальні механічні властивості імплантів та сприяє швидкій остеointegraції. Технології 3D друку, зокрема SLM-друк, дозволяють виготовляти індивідуальні імпланти, що максимально відповідають анатомічним особливостям пацієнта та мають довготривалу стабільність у кістковій тканині.

Практична апробація розробленого методу розробки і 3D друку дозволить підтвердити його ефективність у виготовленні імплантів, що робить цей підхід перспективним для широкого застосування у ортопедії та реконструктивній хірургії.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Автомеєнко Є.М. Тотальне ендопротезування колінного суглоба за наявності фронтальних деформацій у хворих на ревматоїдний артрит : дис ...канд. мед. наук : 14.01.21. Київ, 2020. 196 с.
2. Алхімова С. М., Шарган М. М. Визначення оптимальних параметрів сегментації мозку на МРТ-зображеннях. *Modern problems and ways of their solution* : science, transport, production and education. 2014. URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/21022c3d-3e0a-49dc-a22d-2c63ec6a8f9c/content> (дата звернення: 17.01.2025).
3. Бурбурська С. В. Технологічне забезпечення виготовлення індивідуальних деталей ендопротезів на базі адитивних технологій: дис. ... д-ра філософії в галузі техн. наук : 131. Київ, 2024. 164 с.
4. Герасименко А. С. Тотальне ендопротезування кульшових та колінних суглобів при різних варіантах їх одночасного ураження у хворих на ревматоїдний артрит : дис ...д-ра мед. наук : 14.01.21. Київ, 2021. 312с.
5. Глиняна О. О., Копочинська Ю. В., Худецький І. Ю. Фізична реабілітація при ендопротезуванні органів та суглобів: навчальний посібник [Електронний ресурс] : навч. посібник для студ. спеціальності 227 «Фізична терапія, ерготерапія», спеціалізації «Фізична терапія»/ О.О. Глиняна, Ю.В. Копочинська, І.Ю. Худецький; КПІ ім. Ігоря Сікорського. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 190 с.
6. Коломієць Р. О. Стандарт DICOM. 2020. 15 с. URL: https://learn.ztu.edu.ua/pluginfile.php/320788/mod_resource/content/0/%D0%9C3%D0%9B10%20-%D0%A1%D1%82%D0%B0%D0%BD%D0%B4%D0%B0%D1%80%D1%82%20DICOM.pdf (дата звернення: 17.01.2025).
7. Кузнецов О. В. Носова Т. В. До питання комп'ютерного моделювання кульшового суглобу. *Електроенергетика, електромеханіка та технології в АПК* : матеріали міжнар. наук.-практ. конф., 6 листопада 2024 р.

Харків : Держ. біотехнологічний ун-т., 2024. С.230-231. URL: <https://openarchive.nure.ua/handle/document/29264>.

8. Куценко В. О. Вивчення дегенеративних захворювань поперекового відділу хребта у військових ЗСУ. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я*: тези доповідей XXXI міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD-2022, 17-20 травня 2023 р. / за ред. проф. Сокола Є. І. Харків : НТУ «ХПІ». С. 1122.

9. Наказ МОЗ України від 22.01.2020 № 142 «Про затвердження методичних рекомендацій із застосування Технічного регламенту щодо медичних виробів». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0142282-20#Text> (дата звернення: 17.01.2025).

10. Носова Я. В. До питання проєктування виробів компресійної терапії / Я. В. Носова, Т. В. Носова // *Здоров'я нації і вдосконалення фізкультурно-спортивної освіти* : матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції, 25-26 квітня 2024 р. Харків, 2024. С. 119-122.

11. Пасічник В. А., Бурбурська С. В., Кутуза В. В. Питання вимірювання параметрів точності ендопротезів, виготовлених з використанням адитивних технологій. *Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта* : матеріали XX міжнар. наук.-техн. конф., 10-13 вересня 2019 р.: Київ-Херсон, 2019. С. 223-226. URL: <http://conf.mmi.kpi.ua/proc/article/view/172544/179700>.

12. Патології опорно-рухового апарату : навч. посіб. / А. Д. Салєєва, О. Г. Аврунін, М. В. Зайцев, І. В. Кабаненко, В. М. Юткін, Р. О. Бобошко, Т. О. Трофименко, І. С. Дондорева, П. О. Баєв, О. М. Литвиненко, С. В. Корнєєв, А. Ю. Чугаєв, Т. В. Носова ; М-во освіти і науки України, Харків. нац. ун-т радіоелектроніки. Харків : ХНУРЕ, 2023. 216 с.

13. Перепелиця О. М. Система автоматизованої розробки сплінтів для ринохірургічних операцій : пояснювальна записка до атестаційної роботи здобувача вищої освіти на другому (магістерському) рівні, спеціальність 163 Біомедична інженерія / О. М. Перепелиця ; М-во освіти і науки України,

Харків. нац. ун-т радіоелектроніки. Харків, 2019. 62 с. URL: <http://openarchive.nure.ua/handle/document/10826>.

14. Філіпенко В. А., Мезенцев В. О., Овчинніков О. М., Карпінський М. Ю. Рентгенометричне вимірювання величин кутів антеверсії чашки та антеторсії ніжки ендопротеза кульшового суглоба. 2017.

15. Чечель Т. О. Актуальність заміни пошкодженого сулоба імплантом / Т. О. Чечель, Т. В. Носова, О. Г. Аврунін // *Перспективи розвитку машинобудування та транспорту 2023* : матеріали III Міжнар. наук.-техн. конф., 1 – 3 червня 2023 р. Вінниця, 2023. С. 126-127.

16. Чечель Т. О. Особливості моделювання елементів ендопротезу кисті руки / Т. О. Чечель, Т. В. Носова // *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доповідей XXXI міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD-2022, 17-20 травня 2023 р.* / за ред. проф. Сокола Є.І. Харків : НТУ «ХПІ». С.1145.

17. Bozkurt Y, Karayel E. 3D printing technology; methods, biomedical applications, future opportunities and trends. *Journal of Materials Research and Technology*. 2021. Volume 14. P. 1430-1450. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.07.050>.

18. Dougherty G. Digital Image Processing for Medical Applications. Cambridge University Press, 2009. 447 p. URL: <https://doi.org/10.1017/CBO9780511609657>.

19. Gibson, I., Rosen, D. and Stucker, B. (2015) Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing. Springer-Verlag, New York, XXI, 498. URL: <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2113-3>.

20. Gonzalez, R.C. and Woods, R.E. (2018) Digital Image Processing. 4th Edition, Pearson Education, New York, 1022 p.

21. Li, Y., Yang, C., Zhao, H., Qu, S., Li, X., & Li, Y. (2014). New developments of Ti-based alloys for biomedical applications. *Materials*, 7(3), 1709–1800. URL: <https://doi.org/10.3390/ma7031709>

22. Mandolini M, Brunzini A, Facco G, Mazzoli A, Forcellese A, Gigante A. Comparison of Three 3D Segmentation Software Tools for Hip Surgical Planning. *Sensors* (Basel). 2022 Jul 13; 22(14): 5242. URL: <https://doi.org/10.3390/s22145242>.
23. Meng M, Wang J, Huang H, Liu X, Zhang J, Li Z. 3D printing metal implants in orthopedic surgery: Methods, applications and future prospects. *J Orthop Translat.* 2023 Sep 1; 42: 94-112. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jot.2023.08.004>.
24. Munsch, M. *Laser additive manufacturing of customized prosthetics and implants for biomedical applications*, 2017. URL: <https://www.researchgate.net/publication/311995762>.
25. Murr, L. E., Gaytan, S. M., Medina, F., Lopez, H., Martinez, E., Machado, B. I., ... & Wicker, R. B. (2010). Next-generation biomedical implants using additive manufacturing of complex, cellular and functional mesh arrays. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 368(1917), 1999–2032. URL: <https://doi.org/10.1098/rsta.2010.0010>.
26. Pratt W.K. *Digital Image Processing: PIKS Scientific Inside*. Wiley, 2007. 738 p. URL: https://nana.lecturer.pens.ac.id/index_files/referensi/image_processing/Digital%20Image%20Processing.pdf.
27. Ramavath, D., Yeole, S. N., Kode, J. P., Pothula, N., & Devana, S. R. (2023). Development of patient-specific 3D printed implants for total knee arthroplasty. *Exploration of Medicine*, 4, 1033–1047.
28. Russ J. C. *The Image Processing Handbook*. 7th ed. CRC Press, 2016. 1053 p. URL: <https://doi.org/10.1201/b18983>.
29. Sikder, S., Barari, A., Kaji, F., & Kishawy, H. (2014). Using acetone vapour treatment to improve secondary finishing operations in additive manufacturing. In *Proc. ASPE* (Vol. 3898, No. 2).
30. Ultimaker Cura Documentation –

<https://ultimaker.com/software/ultimaker-cura>

31. URL: <https://chm.eu/en/product/radial-head-prosthesis/>
32. URL: <https://www.mdpi.com/2504-477X/6/3/87>
33. URL: https://www.researchgate.net/figure/Closure-view-of-the-dry-human-mandibular-condyle-a-the-STL-model-constructed-from_fig5_340202508
34. URL: https://www.researchgate.net/publication/44796917_From_cad_model_to_3d_print_via_stl_file_format