

ІНЖЕНЕРНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТРИВИМІРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ В РИНОЛОГІЇ: СИМУЛЯЦІЯ, НАВІГАЦІЯ ТА ОЦІНКА РЕЗУЛЬТАТІВ ХІРУРГІЇ

Харківський національний університет радіоелектроніки

Анотація

У роботі розглянуто використання тривимірного моделювання як інструменту біомедичної інженерії в ринології. Представлено результати клінічних і навчальних досліджень із використанням 3D-друкованих анатомічних моделей для симуляційного тренування функціональної ендоскопічної хірургії пазух носа. Показано, що такі моделі забезпечують високу точність, відтворюваність та об'єктивну оцінку хірургічних навичок. Проведено порівняльний аналіз з кадаверичними тренінгами, що підтвердив еквівалентність результатів. Зроблено висновок про перспективність впровадження 3D-моделювання у навчальний процес, передопераційне планування та сертифікацію хірургів.

Ключові слова: 3D-моделювання, ринологія, біомедична інженерія, симуляційне навчання, FESS.

Розвиток біомедичної інженерії в останнє десятиліття суттєво вплинув на трансформацію підходів до хірургічного навчання, планування оперативних втручань та післяопераційної верифікації результатів у сфері оториноларингології [1]. У сучасній літературі розглядаються різноманітні підходи до моделювання базових навичок ендоскопічної хірургії [2]. Серед них – використання овочів (перець, томати), тваринних тканин (зокрема, голови ягнят) замість трупного матеріалу, а також 3D-моделі та технології доповненої реальності. Кожен із цих методів має певні переваги та обмеження, що унеможливує його повноцінне заміщення трупних зразків. Абстрактні моделі на основі овочів ефективно розвивають базові хірургічні навички, такі як зорово-моторна координація, точність рухів та маневреність під час роботи з ендоскопічними інструментами. Згідно з даними, 90% учасників навчальних програм відзначили підвищення впевненості та кращу підготовку до подальших етапів навчання, включаючи диссекцію трупів і реальні хірургічні втручання. Тваринні тканини не повністю відтворюють анатомічні особливості людини та реакції на хірургічні маніпуляції. Наприклад, голова ягняти широко використовується у тренуваннях з ендоскопії носових пазух через її документально підтверджену схожість з людською анатомією. Однак такі моделі мають суттєві недоліки: необхідність спеціальних умов зберігання, обмежений термін придатності (до 4 годин) та відмінності у будові складних структур (наприклад, задніх гратчастих клітин, клиноподібного чи лобового синусів). Таким чином, як овочеві, так і тваринні моделі слугують допоміжними інструментами для опанування базових навичок роботи з ендоскопічним обладнанням, але не є самодостатніми для повноцінної підготовки хірургів. Їхнє застосування доцільне лише у поєднанні з іншими методами навчання [3, 4]. Особливо перспективним напрямом є впровадження тривимірного (3D) моделювання в ринології, де складна анатомічна будова приносних синусів створює високі вимоги до просторової орієнтації хірурга, точності доступу та безпеки маніпуляцій. Технології 3D-друку, обробки медичних зображень та симуляційного аналізу забезпечують формування анатомічно достовірних моделей, які можуть застосовуватись як у навчальних цілях, так і для клінічного планування втручань. 3D-моделі, виготовлені з даних комп'ютерної томографії (формат DICOM), проходять сегментацію у спеціалізованому програмному забезпеченні (Mimics, 3D Slicer) з подальшим експортом у STL-файли для адитивного виробництва. У типових моделях використовуються полімери з контролем твердості: для імітації кісткової тканини застосовується матеріал з твердістю Shore

D 83–86, для м'яких тканин — Shore A 28–33. Мінімальна товщина друку становить 0,0125 мм, що забезпечує високу точність відтворення складних анатомічних зон, зокрема фронтальної пазухи, *aggen nasi* та решітчастого лабіринту. Клінічну ефективність таких моделей було продемонстровано в дистанційному навчальному курсі, де хірурги отоларингологи під контролем досвідчених спеціалістів виконували симуляційні фронтальні синусотомії на моделях із наростаючою складністю варіативності анатомії. Під час курсу час виявлення дренажного шляху фронтальної пазухи (FSDP) зменшився з 1292 ± 672 с до 321 ± 267 с ($p = 0,017$), попри ускладнення анатомії. Об'єм FSDP збільшився з $2,36 \pm 0,00$ до $9,70 \pm 1,49$ мл ($p = 0,014$), що підтверджено за допомогою 3D-реконструкції в системі SYNAPSE VINCENT. Загальний освітній ефект курсу був оцінений учасниками на $95,5 \pm 5,1$ бала зі 100 можливих, а спостерігачами — на $89,2 \pm 15,8$ бала. Розширене дослідження за участю 47 оториноларингологів (9 експертів, 19 фахівців середнього рівня, 19 новачків) дозволило валідувати ефективність 3D-моделей за шкалою OSATS (Objective Structured Assessment of Technical Skills). Експерти набрали $74,7 \pm 3,6$ бала, фахівці середнього рівня — $58,3 \pm 10,1$, новачки — $43,1 \pm 11,1$ ($p < 0,001$). У групі новачків, які проходили семисесійну тренувальну програму, OSATS зріс з $41,1 \pm 8,0$ до $61,1 \pm 6,9$ ($p < 0,001$), а час виконання mini-FESS скоротився з $1783,2 \pm 577,8$ до $861,6 \pm 441,0$ с ($p = 0,004$). Після завершення тренування 80% новачків вперше успішно виконали повний FESS на кадаврах, що вказує на високу адаптивність симуляцій до клінічної практики [5]. У порівняльному дослідженні 17 хірургів виконували ідентичні FESS-процедури на 3D-моделях і на кадаврах. За OSATS-оцінкою не було виявлено статистично значущих відмінностей: $50,41 \pm 13,31$ на моделях проти $48,29 \pm 16,01$ на кадаврах ($p = 0,36$). Аналогічно, час виконання mini-FESS не відрізнявся достовірно ($21:29 \pm 0:10$ хв проти $20:33 \pm 0:07$ хв, $p = 0,53$). Висока кореляція результатів між моделями та кадаврами ($r = 0,84$, $p < 0,001$) підтверджує об'єктивну придатність моделей як альтернативи для навчання та оцінки хірургів [6]. Інженерні аспекти моделювання включають модульність, можливість стандартизації та варіативність анатомічної складності. Різні типи моделей охоплюють різні варіанти анатомічної будови, дозволяючи адаптувати навчання відповідно до рівня підготовки. Прозорі сегменти моделі забезпечують візуальний контроль за якістю розтину, а сумісність із навігаційними та AR-системами відкриває перспективи інтеграції у хірургію з віртуальним плануванням. Проте, основною проблемою залишається відтворення реалістичних умов операції, таких як слизова оболонка, кровотеча та забруднення лінзи ендоскопа, що ускладнює процес навчання. У контексті інженерії 3D-моделювання поєднує точність цифрової обробки медичних зображень, функціональність сучасних полімерних матеріалів і технології адитивного виробництва. Це дозволяє реалізувати концепцію цифрового двійника ЛОР-анатомії для використання як у передопераційному плануванні, так і в післяопераційній оцінці втручань [7, 8]. За рахунок низької вартості, відсутності етичних та інфекційних ризиків, високої стандартизації і масштабованості, даний підхід є одним з найбільш перспективних у хірургічному навчанні. Сучасні клінічні рекомендації з підготовки хірургів визнають навчання на кадаврах «золотим стандартом», однак у останні роки зростає інтерес до відтворюваних навчальних моделей. Цей пов'язано із економічною доцільністю, правовими обмеженнями та етичними аспектами використання біологічних зразків. Кожен із альтернативних методів має власні сильні та слабкі сторони, найбільш перспективним напрямком для навчання та преопераційного планування вважається 3D-моделювання [8].

Таким чином, тривимірне моделювання в ринології, засноване на принципах біомедичної інженерії, продемонструвало високу ефективність як засіб хірургічного навчання, інструмент об'єктивного тестування навичок та технологію планування складних оперативних втручань. Інтеграція з телемедичними платформами [9, 10], навігаційними системами та технологіями доповненої реальності визначає подальший вектор розвитку створення інтелектуальних симуляційних тренінгових середовищ для постійної клінічної практики.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Tymkovych, M. et al. (2021). Application of SOFA Framework for Physics-Based Simulation of Deformable Human Anatomy of Nasal Cavity. 8th European Medical and Biological Engineering Conference. EMBEC 2020. IFMBE Proceedings, vol 80. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-64610-3_14.
2. Selivanova, K. G., Avrunin, O. G., Tymkovych, M. Y., & Manhora, T. V. (2021). 3D Visualization of Human Body Internal Structures Surface During StereoEndoscopic Operations Using Computer Vision Techniques. *Przegląd Elektrotechniczny*, (9), 30–33.

3. Tikka S, Chaithra BG, Sharma SB, Janakiram TN. A Feasible, Low-Cost, Capsicum and Tomato Model for Endoscopic Sinus and Skull Base Surgery Training. *Indian J Otolaryngol Head Neck Surg.* 2022 Dec;74(Suppl 3):4565-4570. doi: 10.1007/s12070-021-02583-z. Epub 2021 Jul 5. PMID: 36742779; PMCID: PMC9895242.
4. De Oliveira HF, Bollela VR, Anselmo-Lima WT, Costa CAPO, Nakanishi M. A feasible, low-cost, reproducible lamb's head model for endoscopic sinus surgery training. *PLoS One.* 2017 Jun 29;12(6):e0180273. doi: 10.1371/journal.pone.0180273. PMID: 28662196; PMCID: PMC5491169.
5. Suzuki M, Watanabe R, Nakazono A, Nakamaru Y, Suzuki T, Kimura S, Matoba K, Murakami M, Hinder D, Psaltis AJ, Homma A, Wormald PJ. Can high-fidelity 3D models be a good alternative for cadaveric materials in skill assessment for endoscopic sinus surgery? A comparison study in assessment for surgical performance in 3D models and cadavers. *Front Med (Lausanne).* 2024 Oct 17;11:1301511. doi: 10.3389/fmed.2024.1301511. PMID: 39484199; PMCID: PMC11524814.
6. Suzuki M, Miyaji K, Watanabe R, Suzuki T, Matoba K, Nakazono A, Nakamaru Y, Konno A, Psaltis AJ, Abe T, Homma A, Wormald PJ. Repetitive simulation training with novel 3D-printed sinus models for functional endoscopic sinus surgeries. *Laryngoscope Invest Otolaryngol.* 2022 Jul 21;7(4):943-954. doi: 10.1002/lio2.873. PMID: 36000044; PMCID: PMC9392405.
7. Avrunin, O. G., Tymkovych, M. Y., Saed, H. F. I., Loburets, A. V., Krivoruchko, I. A., Smolarz, A., & Kalimoldayeva, S. (2019). Application of 3D printing technologies in building patient-specific training systems for computing planning in rhinology. Paper presented at the Information Technology in Medical Diagnostics II - Proceedings of the International Scientific Internet Conference on Computer Graphics and Image Processing and 48th International Scientific and Practical Conference on Application of Lasers in Medicine and Biology, 2018, 1-8. doi:10.1201/9780429057618-1.
8. Інтелектуальні технології в медичній діагностиці, лікуванні та реабілітації: монографія / [С.В. Павлов, О.Г. Аврунін, С.М. Злепко, Є.В. Бодяньський та ін.]; за редакцією С. Павлова, О. Авруніна. – Вінниця: ПП «ГД «Едельвейс і К», 2019. – 260 с.
9. Місоченко С. Ю., Селіванова К. Г., Аврунін О. Г. Дослідження використання вірогіднісних методів у сфері обробки біомедичних зображень. Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доповідей XXX міжнародної науковопрактичної конференції MicroCAD2022, 19-21 жовтня 2022 р. Харків : НТУ «ХПІ», 2022. С. 902.
10. Avrunin, O., Kolisnyk, K., Nosova, Y., Tomashevskiy, R., & Shushliapina, N. (2020). Improving the methods for visualization of middle ear pathologies based on telemedicine services in remote treatment. Paper presented at the 2020 IEEE KhPI Week on Advanced Technology, KhPI Week 2020 - Conference Proceedings, 347-350. doi:10.1109/KhPIWeek51551.2020.9250090. 4. Sokol, Y., Avrunin, O., Kolisnyk, K., & Zamiatin, P. (2020). Using medical imaging in disaster medicine. Paper presented at the 2020 IEEE 4th International Conference on Intelligent Energy and Power Systems, IEPS 2020 - Proceedings, 287-290. doi:10.1109/IEPS51250.2020.9263175

Соколюцов Андрій Олегович, аспірант кафедри біомедичної інженерії, Харківський національний університет радіоелектроніки. м. Харків, andrii.sokoltsov@nure.ua

Аврунін Олег Григорович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри біомедичної інженерії, Харківський національний університет радіоелектроніки. м. Харків, oleh.avrunin@nure.ua

ENGINEERING TECHNOLOGIES OF THREE-DIMENSIONAL MODELING IN RHINOLOGY: SIMULATION, NAVIGATION, AND SURGICAL OUTCOME ASSESSMENT

Abstract

This study explores the application of three-dimensional modeling as a biomedical engineering tool in rhinology. It presents clinical and educational research findings on the use of 3D-printed anatomical models for simulation-based training in functional endoscopic sinus surgery (FESS). The models demonstrate high anatomical accuracy, reproducibility, and enable objective evaluation of surgical skills. A comparative analysis with cadaveric training confirmed the equivalence of outcomes. The study concludes that 3D modeling holds significant promise for integration into surgical education, preoperative planning, and surgeon certification processes.

Keywords: 3D modeling, rhinology, biomedical engineering, simulation training, FESS.

Andrii Sokoltsov, PhD student, Department of Biomedical Engineering, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine, andrii.sokoltsov@nure.ua

Oleg Avrunin, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Biomedical Engineering, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine, oleh.avrunin@nure.ua