

ПОШУК КЛЮЧОВИХ ТОЧОК НА ЗОБРАЖЕННЯХ ДЛЯ СТВОРЕННЯ ЦИФРОВИХ ДВІЙНИКІВ МЕДИКО-БІОЛОГІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ

Анотація: У статті представлений аналіз оптимальних інструментів для створення цифрового двійника внутрішніх органів людини (на прикладі отоларингології) на основі потокових відеоданих, що надходять у реальному часі з камери медичного приладу. Досліджено два основних методи: алгоритмічна реконструкція та використання нейронної мережі. Порівняння методів виконано за критеріями: ефективність, точність, швидкість реакції та практичність застосування в медичному середовищі. Особлива увага приділена підходам на основі нейронних мереж через їх високу адаптивність, точність і здатність ефективно обробляти зашумлені та неповні дані. Визначено основні переваги та особливості цього методу у контексті медичного застосування. Результати дослідження підтверджують високий потенціал нейронних мереж у створенні точних цифрових моделей внутрішніх органів, що відкриває нові перспективи для розроблення програмоного забезпечення процесів створення цифрових двійників медико біологічних об'єктів.
Ключові слова: 3D візуалізація, цифрові двійники, медичне програмне забезпечення.

Постановка проблеми. З інтенсивним розвитком цифрової медицини актуальність створення деталізованих цифрових моделей анатомічних структур людини зростає. Цифрові двійники можуть слугувати важливим інструментом для діагностики, навчання медичних фахівців, планування хірургічних втручань та розробки інноваційних методів лікування. При цьому основним джерелом інформації для моделювання часто є відеодані з ендоскопічних або інших медичних приладів. Однак, перетворення цих даних у точні тривимірні моделі виявляється значущим викликом. Сучасні методики реконструкції часто засновані на алгоритмах визначення ключових точок на зображеннях. Ці методи можуть виявлятися нестабільними у випадках, коли відеопотоки є зашумленими, неповними або викривленими. Водночас, нейронні мережі пропонують нові перспективи завдяки своїй здатності адаптуватися до складних даних та вивчати неявні залежності. У зв'язку з цим, ключовою проблемою є визначення оптимального підходу до реконструкції цифрових двійників медико-біологічних об'єктів.

Стан предметної галузі та актуальність дослідження. Аналіз досліджень зі створення цифрових двійників у галузі медицини дає змогу стверджувати, що безпосередньо ця тема дуже мало висвітлена у наукових виданнях. У більшості випадків програмне забезпечення цифрових двійників для галузі медицини створюється як стартап-проекти, які зберігають принципи реалізації свого програмного продукту як комерційну таємницю. Тому можна стверджувати, що технологічна зрілість програмних продуктів у цій галузі знаходиться за шкалою рівня технологічної готовності ТЮВЕ [1] на стадії прототипування. Отже, задача створення медичних програмних систем з відкритим кодом, які ґрунтуються на застосуванні технології цифрових двійників, є актуальною.

Метою дослідження є розроблення методу створення цифрових двійників медико-біологічних об'єктів. Для досягнення поставленої мети необхідно обрати найбільш доцільний підхід, виходячи з аналізу переваг та обмежень можливих рішень задачі створення цифрового двійника медико-біологічного об'єкта з точки зору точності, швидкості обробки та практичної застосовності у медичному середовищі. Дослідження виконується на прикладі створення цифрового двійника гортані для подальшого застосування у медичній практиці лікарів-отоларингологів.

Викладення основного матеріалу. Розглянемо основні підходи до тривимірної реконструкції гортані з подальшим створенням цифрового двійника: алгоритмічний та з використанням нейронних мереж.

Алгоритмічний підхід до тривимірної (3D) реконструкції заснований на математичних моделях та алгоритмах, які роблять можливим створення 3D моделей на основі таких вхідних даних, як 2D зображення. Наприклад, можуть бути використані окремі кадри відеопотоку [2]. Цей підхід відзначається детермінованістю, що забезпечує стабільність отримання результатів при однакових типах вхідних даних. Проте, алгоритмічний підхід може вимагати ручного налаштування цифрової моделі у разі використання нового типу даних.

3D реконструкція на основі застосування нейронних мереж для створення 3D моделей з набору 2D зображень вимагає етапу навчання мережі на великих наборах даних. Методи на основі нейронних мереж відзначаються високою адаптивністю і гнучкістю, що дозволяє розв'язувати широкий спектр задач без специфікації конкретних алгоритмічних правил. Проте, навчання нейронних мереж вимагає значних обчислювальних ресурсів і великих наборів даних.

Проаналізуємо можливість та доцільність застосування кожного з цих підходів при побудові цифрової моделі для застосування в отоларингології.

Дані, які можуть надходити з медичних приладів, що використовуються в отоларингології, а саме кадри гортані та голосових зв'язок, наведено на рис.1.

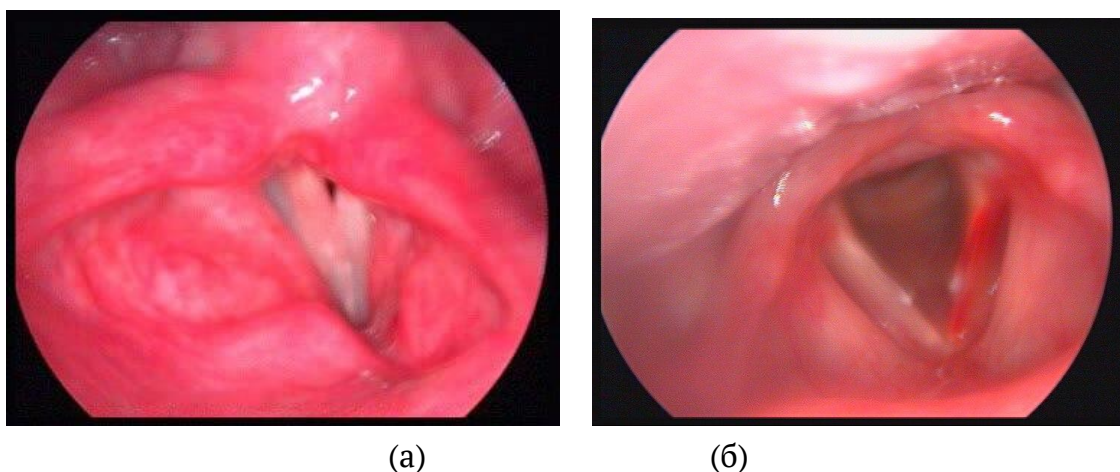


Рисунок 1 - Приклади зображення гортані, отриманого з медичного обладнання:
(а) зображення гортані зі зміщеними анатомічними орієнтирами (фаза фонації); (б) зображення частково ураженої гортані зі зміною кольору тканин (фаза дихання)

Проаналізуємо зображення на рис. 1а за допомогою алгоритмічного підходу до розпізнавання та реконструкції зображень, взявши за основу метод Харіса [3-5].

Основною задачею у цьому випадку є виявлення низки ключових точок для створення візуалізації цифрового двійника, а також фіксація змін, які відбуваються протягом дослідження. Останнє пов'язано з тим, що дані для побудови валідного двійника мають бути темпоральними.

Реалізація алгоритмічного підходу для пошуку та візуалізації ключових точок з використанням мови Python та бібліотеки OpenCV [6] наведена на Лістингу 1.

Лістинг 1. Визначення ключових точок.

```
img = cv2.imread('sample.jpg', 0)
orb = cv2.ORB_create(200)
keypoint, des = orb.detectAndCompute(img, None)
img_final = cv2.drawKeypoints(img, keypoint, None,
flags=cv2.DRAW_MATCHES_FLAGS_DRAW_RICH_KEYPOINTS)
```

Результат застосування алгоритмічного підходу до зображення на рис. 1а наведено на рис. 2. Час виконання обробки зображення склав 240 мс. Аналіз результату експерименту дозволяє зробити висновок, що з точки зору подальшої побудови 3D моделі знайдені ключові точки є недостатньо інформативними, оскільки, окрім центральної частини зображення, ключові точки на решті зображення майже відсутні, що значно ускладнює задачу реконструкції. Також на якість подальшого 3D моделювання може негативно вплинути те, що зміна інтенсивності кольору у майже кожній області представленого зображення є незначною.

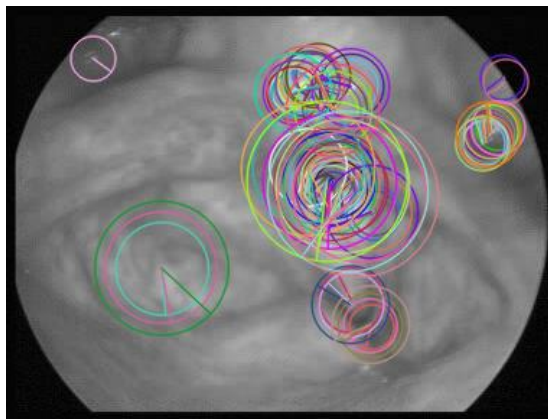


Рисунок 2 - Ключові точки, знайдені алгоритмічним методом

Тепер проведемо експеримент із застосуванням методу виявлення ключових точок за допомогою використання нейронних мереж з використанням бібліотеки TensorFlow [7]. Результат експерименту на основі нейронних мереж наведено на рис. 3.

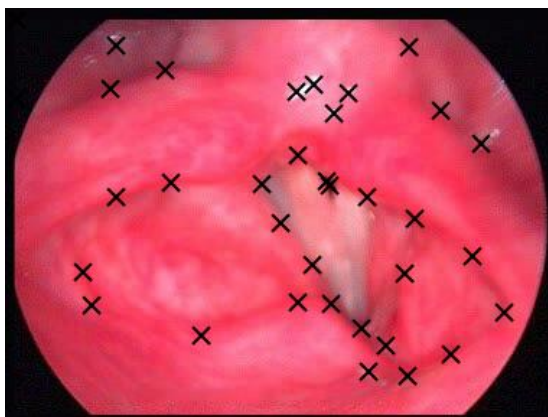


Рисунок 3 - Ключові точки, знайдені за допомогою нейронної мережі

Час виконання обробки зображення на рис. 1а методом виявлення ключових точок за допомогою використання нейронних мереж склав 301 мс. Модель натренована на наборі даних, що являє собою кадри відеопотоку ендоскопічного дослідження гортані. У експерименті використано 60 кадрів. Для кожного кадра цього набору даних виконана ручна розмітка ключових точок, що становлять інтерес для подальшої 3D візуалізації. Через невеликий розмір набору даних, використаного для тренування нейронної мережі, точність пошуку ключових точок є недостатньо високою, однак порівняння результатів пошуку на рис. 2 та рис. 3 дозволяє зробити висновок про більш широкий розподіл ключових точок при застосуванні методу на основі нейронних мереж, що дозволяє рекомендувати його для використання при створенні 3D моделі медико-біологічного об'єкту.

Висновок про доцільність використання підходу з використанням нейронних мереж також підкріплюється наступними аргументами, які ґрунтуються на особливостях задач, що вирішуватимуться за допомогою програмного забезпечення, яке реалізуватиме цей підхід:

– *Адаптивність*: нейронні мережі базуються на механізмах самонавчання, що дозволяє їм поліпшувати якість роботи на основі додаткових об'ємів даних. Це також означає, що вони можуть легко масштабуватися для вирішення інших задач – у нашому випадку для моделювання інших внутрішніх органів.

– *Точність*: у дослідженні було продемонстровано, що нейронні мережі можуть забезпечувати більш високу точність, а саме гарантувати рівномірне виявлення ключових точок на всіх поверхні об'єкту. Це є особливо важливим за наявності шуму, що становить одну з важливих проблем, яка виникає при обробленні потоку даних у реальному часі.

Сформулюємо функціональні та нефункціональні вимоги до програмного продукту, який ґрунтуватиметься на обраному підході.

Функціональні вимоги:

1. Введення даних:

– отримання вхідних медичних зображень та даних у найбільш поширених форматах (avi, mp4) або у вигляді відеопотоку;
– забезпечення підтримки декількох каналів уведення даних для можливого подальшого масштабування.

2. Обробка даних:

– препроцесінг зображень (підсилення контрасту, видалення шумів);
– виділення ключових характеристик з вхідних даних.

3. Реконструкція:

– модифікація шаблону медико-біологічного об'єкту з урахуванням вхідного потоку даних для створення цифрового двійника;

– забезпечення можливості зміни цифрового двійника у реальному часі.

4. Збереження та експорт:

– можливість експорту моделі (цифрового двійника) до локального сховища з використанням форматів, що найчастіше використовуються у прикладній галузі (наприклад, STL, OBJ).

Нефункціональні вимоги:

1. Швидкість: програмне забезпечення має виконувати реконструкцію максимально швидко, враховуючи об'єм вхідних даних.

2. Точність: відтворення анатомічних деталей має відбуватись з максимальною точністю.

3. Інтеграційність: можливість інтеграції програмного продукту з іншими системами та надання API для розширення функціональності.

4. Безпека: захист медичних даних пацієнтів, шифрування даних та дотримання стандартів конфіденційності.

5. Сумісність: підтримка різних форматів медичних зображень і даних.

6. Масштабованість: можливість обробки великих наборів даних без втрати продуктивності.

7. Адаптивність: можливість адаптування програмного забезпечення до реалізації різних медико-біологічних об'єктів або їх систем.

8. Стійкість: здатність працювати без збоїв та відновлювати роботу після відмов.

Висновки. У дослідженні було проаналізовано основні методи пошуку ключових точок для 3D моделювання як етапу створення цифрових двійників медико-біологічних об'єктів. Дослідження проведено на прикладі аналізу зображень гортані для застосування розроблюваного програмного забезпечення в отоларингології. У результаті аналізу двох основних підходів до визначення ключових точок на зображеннях об'єктів, які потребуються 3D моделювання, виявлено, що доцільно розроблювати програмне забезпечення для створення цифрових двійників медико-біологічних об'єктів із застосуванням нейронних мереж. Цей підхід забезпечує стійкість до шумів на зображеннях та є менш чутливим до роздільності вхідного відеопотоку. У статті також сформульовані функціональні та нефункціональні вимоги до програмного забезпечення процесів створення цифрових двійників медико-біологічних об'єктів.

Автори висловлюють подяку Шидловській Т.А., доктору медичних наук, професору, завідувачці лабораторії голосу і слуху Державної установи «Інститут отоларингології ім. проф. О.С. Коломійченка АМН України», за надання медичних зображень та консультаційну допомогу. Медичні зображення надані з дотриманням вимог медичної етики і конфіденційності інформації.

ЛІТЕРАТУРА

1. Steneker, M., 2016. *Towards an empirical validation of the TIOBE Quality Indicator* (Doctoral dissertation, Eindhoven University of Technology).
2. Zhen, W. and Luan, L., 2021, February. Physical World to Virtual Reality–Motion Capture Technology in Dance Creation. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1828, No. 1, p. 012097). IOP Publishing.
3. Peng, K., Chen, X., Zhou, D. and Liu, Y., 2009, December. 3D reconstruction based on SIFT and Harris feature points. In *2009 IEEE international conference on robotics and biomimetics (ROBIO)* (pp. 960-964). IEEE.
4. Kamel Boulos, M.N. and Zhang, P., 2021. Digital twins: from personalised medicine to precision public health. *Journal of personalized medicine*, 11(8), p.745.
5. Sipiran, I. and Bustos, B., 2011. Harris 3D: a robust extension of the Harris operator for interest point detection on 3D meshes. *The Visual Computer*, 27, pp.963-976.
6. Bradski, G. and Kaehler, A., 2000. *OpenCV. Dr. Dobb's journal of software tools*, 3(2).
7. Pang, B., Nijkamp, E. and Wu, Y.N., 2020. Deep learning with tensorflow: A review. *Journal of Educational and Behavioral Statistics*, 45(2), pp.227-248.

REFERENCES

1. Steneker, M., 2016. *Towards an empirical validation of the TIOBE Quality Indicator* (Doctoral dissertation, Eindhoven University of Technology).
2. Zhen, W. and Luan, L., 2021, February. Physical World to Virtual Reality–Motion Capture Technology in Dance Creation. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1828, No. 1, p. 012097). IOP Publishing.
3. Peng, K., Chen, X., Zhou, D. and Liu, Y., 2009, December. 3D reconstruction based on SIFT and Harris feature points. In *2009 IEEE international conference on robotics and biomimetics (ROBIO)* (pp. 960-964). IEEE.
4. Kamel Boulos, M.N. and Zhang, P., 2021. Digital twins: from personalised medicine to precision public health. *Journal of personalized medicine*, 11(8), p.745.
5. Sipiran, I. and Bustos, B., 2011. Harris 3D: a robust extension of the Harris operator for interest point detection on 3D meshes. *The Visual Computer*, 27, pp.963-976.

6. Bradski, G. and Kaehler, A., 2000. OpenCV. *Dr. Dobb's journal of software tools*, 3(2).

7. Pang, B., Nijkamp, E. and Wu, Y.N., 2020. Deep learning with tensorflow: A review. *Journal of Educational and Behavioral Statistics*, 45(2), pp.227-248.

Received 01.12.2023.

Accepted 07.12.2023.

Detection of key points on images for creating digital twins of medical and biological objects

The paper presents an analysis of optimal tools for creating a digital twin of human organs (on the example of otolaryngology) based on streaming video data received in real time from the camera of a medical device. Two main methods were studied: algorithmic reconstruction and the use of a neural network. The comparison of methods was performed according to the following criteria: efficiency, accuracy, speed of reaction and practicality of application in the medical environment. Special attention is paid to approaches based on neural networks due to their high adaptability, accuracy and ability to efficiently process noisy and incomplete data. The main advantages and features of this method in the context of medical application are determined. The results of the study confirm the high potential of neural networks in creating accurate digital models of internal organs, which opens up new perspectives for the development of software for the creation of digital twins of medical and biological objects.

Песчанський Владислав Юрійович – аспірант кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ.

Сулєма Євгенія Станіславівна – доктор технічних наук, завідувачка кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем. Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ.

Vladyslav Peschanskii – Post-Graduate Student of Computer Systems Software Department National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv.

Yevgeniya Sulema – DSc, Head of Computer Systems Software Department. National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv.