

ІНТЕГРОВАНІ МЕТОДИ ТРИВИМІРНОЇ РЕКОНСТРУКЦІЇ В ЕНДОСКОПІЧНИХ СИСТЕМАХ ВІЗУАЛІЗАЦІЇ НА ОСНОВІ КОМП'ЮТЕРНОЇ ТОМОГРАФІЇ ТА ГЛИБОКОГО НАВЧАННЯ

Харківський національний університет радіоелектроніки

Анотація

У роботі розглянуто сучасні методи 3D-реконструкції анатомічних структур в хірургічній ендоскопії, що базуються на оптико-електронних принципах та цифровій обробці зображень. Основну увагу приділено інтеграції даних комп'ютерної томографії з алгоритмами глибокого навчання для валідації ендоскопічної реконструкції, зокрема в умовах обмеженої текстурованості тканин, відблисків, диму та крові. Представлені результати дослідження ефективності існуючих стереозображувальних методів та алгоритмів розпізнавання глибини, що можуть бути використані для покращення точності навігації при малоінвазивних втручаннях.

Ключові слова: стереоендоскопія, реконструкція глибини, глибоке навчання, оптичні системи, хірургічна візуалізація.

Сучасна ендоскопічна хірургія вимагає не лише високої роздільної здатності оптичних систем, а й точного відтворення просторової анатомії пацієнта. З огляду на це, тривимірна реконструкція внутрішніх структур у реальному часі на основі оптико-електронних і цифрових технологій стає ключовим елементом у плануванні та навігації малоінвазивних хірургічних втручань. Однак складні візуальні умови — зокрема, глянцеві поверхні, присутність диму, крові, обмежена текстура тканин — ускладнюють роботу традиційних алгоритмів комп'ютерного зору [1]. У такому контексті особливої ваги набувають системи, які поєднують апаратні методи реєстрації зображень із сучасними засобами глибокого навчання та валідованими еталонними даними.

Одним із прикладів такого інтегрованого підходу є набір даних SERV-CT, розроблений для оцінки точності стереозображувальних алгоритмів в ендоскопії. Набір створено на основі СВСТ-знімків ex vivo торсів свиней, у яких одночасно візуалізовані як анатомічні структури, так і саме положення ендоскопа. Це дозволяє створити єдину координатну систему для узгодження ендоскопічних зображень і просторової геометрії сцени. Подальше ручне вирівнювання положення ендоскопа відносно сегментованої поверхні КТ забезпечує надзвичайно точну відповідність між зображеннями та 3D-моделлю, що дає змогу формувати глибинні карти з похибкою близько 2 мм та диспаратності з RMS-помилкою в межах 2 пікселів. На основі цього датасету було проведено порівняльне тестування кількох сучасних алгоритмів реконструкції глибини. Найвищу точність продемонстрували нейронні мережі HSM (hierarchical stereo matching) та DeepPruner, які були попередньо натреновані на реальних зображеннях (KITTI-15). Наприклад, для HSM рівня 1 середнє значення показника bad3 (частка пікселів із помилкою диспаратності понад 3 пікселі) становило лише 8,3%, а середньоквадратична помилка глибини — приблизно 2 мм. Інші моделі, зокрема PSMNet, DispNetC та MADNet, також показали прийнятні результати, але мали підвищену варіативність точності, особливо на складних ділянках з гладкими або спекулярними поверхнями [2]. Алгоритм Stereo-UCL, що базується на класичних методах квазі-щільного відображення, продемонстрував нижчу загальну точність, проте зберігав стабільність на складних ділянках, що дозволяє розглядати його як резервний метод для клінічних сценаріїв з поганими візуальними умовами. Практичне значення таких досліджень полягає в можливості створення пацієнт-орієнтованих візуалізаційних систем, які

можуть бути використані не лише для інтраопераційної навігації, а й для попереднього моделювання втручань [3]. Завдяки точній просторовій реконструкції на основі СВСТ та ендоскопічного зображення, хірург може отримати повне уявлення про анатомію конкретного пацієнта ще до операції. Це особливо важливо в ринології, де анатомічна варіативність та близькість до критичних структур потребують максимальної точності. Крім того, формування реалістичних віртуальних моделей дозволяє створювати навчальні симулятори для відпрацювання навичок та тактичного планування оперативних втручань. Перспективним є поєднання подібних систем з технологіями доповненої реальності, що дозволить виводити реконструйовані анатомічні структури безпосередньо в полі зору хірурга [4].

Поєднання точного вимірювання, 3D-візуалізації, нейромережових алгоритмів та оптичних сенсорів створює основу для майбутніх інтелектуальних хірургічних систем. Незважаючи на те, що сервісний набір SERV-CT наразі обмежений 16 зображеннями, його методологія може бути масштабована для створення повноцінних навчальних і клінічних платформ з подальшою автоматизацією процесу вирівнювання та побудови відповідностей. Такий підхід здатен суттєво покращити якість хірургічної візуалізації та сприяти подальшому розвитку персоналізованої медицини.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Tong HS, Ng YL, Liu Z, Ho JDL, Chan PL, Chan JYK, Kwok KW. Real-to-virtual domain transfer-based depth estimation for real-time 3D annotation in transnasal surgery: a study of annotation accuracy and stability. *Int J Comput Assist Radiol Surg*. 2021 May;16(5):731-739. doi: 10.1007/s11548-021-02346-9.
2. Edwards PJE, Psychogyios D, Speidel S, Maier-Hein L, Stoyanov D. SERV-CT: A disparity dataset from cone-beam CT for validation of endoscopic 3D reconstruction. *Med Image Anal*. 2022 Feb;76:102302. doi: 10.1016/j.media.2021.102302.
3. Avrunin, O. G. et al. 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.
4. Бажан О. В., Аврунін О. Г., Тимкович М. Ю. Використання технологій віртуальної реальності в пластичній хірургії. *Авіація, промисловість, суспільство : матеріали І Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих вчених, курсантів та студентів, Кременчук. 2018. С. 184.*

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

INTEGRATED METHODS OF THREE-DIMENSIONAL RECONSTRUCTION IN ENDOSCOPIC VISUALIZATION SYSTEMS BASED ON COMPUTED TOMOGRAPHY AND DEEP LEARNING

Abstract

The paper considers modern methods of 3D reconstruction of anatomical structures in surgical endoscopy, based on optoelectronic principles and digital image processing. Particular attention is paid to the integration of computed tomography data with deep learning algorithms for validation of endoscopic reconstruction, especially under conditions of limited tissue texture, specular reflections, smoke, and blood. The study presents the results of evaluating the effectiveness of existing stereo imaging methods and depth estimation algorithms that can be applied to improve navigation accuracy in minimally invasive procedures.

Keywords: stereoendoscopy, depth reconstruction, deep learning, optical systems, surgical visualization.

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

Oleh 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