

Ukr Neurosurg J. 2023;29(3):58-65
doi: 10.25305/unj.284245

Власний досвід застосування голографічної нейронавігації з використанням шолома доповненої реальності в нейрохірургії

В.О. П'ятикоп^{1,2}, В.Ю. Калюжка^{1,2}, М.А. Маркевич², Ю.О. Бабалян^{1,2}, М.М. Хаустов³

¹ Нейрохірургічне відділення №2, Харківська обласна клінічна лікарня, Харків, Україна
² Кафедра нейрохірургії, Харківський національний медичний університет, Харків, Україна

³ Департамент охорони здоров'я, Харківська обласна військова адміністрація, Харків, Україна

Надійшла до редакції 10.07.2023
Прийнята до публікації 07.08.2023

Адреса для листування:

Калюжка Владислав Юрійович,
Кафедра нейрохірургії, Харківський національний медичний університет, проспект Науки, 4, Харків, 61000, Україна, e-mail: Vу.kaliuzhka@kntmu.edu.ua

Мета: оптимізувати хірургічний доступ до внутрішньочерепних уражень (пухлини, артеріовенозні мальформації, кісти тощо) шляхом використання системи голографічної нейронавігації за допомогою шолома доповненої реальності.

Матеріали і методи. У дослідження було залучено 34 пацієнти, яким виконували церебральні нейрохірургічні втручання. Голограми створювали на підставі DICOM-зображень і використовували для навігації за допомогою шолома «HoloLens 2» (Microsoft Corp., США) та створеного програмного забезпечення.

Результати. Створення та клінічне використання голографічної нейронавігації було можливим у всіх випадках, що дало змогу точно визначити локалізацію ураження. Оцінено додатковий час, необхідний для використання голографічної нейронавігації у клінічному середовищі. Він зменшувався у міру збільшення кількості випадків використання шолома доповненої реальності. Оператори оцінювали ефективність технології. У більшості випадків оцінка була позитивною.

Висновки. У невеликому пілотному дослідженні встановлено, що нейронавігаційну систему змішаної реальності можна застосовувати як метод доопераційної ідентифікації меж ураження для планування хірургічного доступу. Необхідно провести додаткові дослідження, щоб визначити стратегії підвищення точності нейронавігаційної системи змішаної реальності.

Ключові слова: змішана реальність; нейронавігація; доопераційне планування

Вступ

Доопераційне планування в нейрохірургії потребує глибокого розуміння анатомічних взаємозв'язків для забезпечення оптимальних результатів. Однак визначення точної локалізації внутрішньочерепних уражень значною мірою залежить від медичної візуалізації через високу захищеність головного мозку та складну анатомію. З появою концепції хірургії з навігацією були розроблені комерційні нейронавігаційні системи, які можуть точно визначати розташування та межі уражень під час нейрохірургічних процедур. Доопераційна точна проекція локалізації цільового ураження на шкірі голови пацієнта має важливе значення для систем нейронавігації. Однак зорова координація між операційним полем і навігаційним монітором може відволікти увагу хірурга [1]. Це також потребує уявного перетворення 2D-зображень у 3D-фізичний простір, що залежить від досвіду хірурга. Крім того, стандартна система нейронавігації має великогабаритне обладнання, зокрема інфрачервону камеру, навігаційну робочу станцію й аксесуари. Зазвичай система нейронавігації коштує понад 300 тис. доларів США.

Останнім часом створено нові технології обробки зображень, які поєднують реальне і віртуальне

середовище для інтерактивної взаємодії людини та комп'ютера [2, 3]. У віртуальній реальності користувачі спостерігають об'єкти в повністю віртуальному середовищі, тоді як у доповненій реальності – віртуальні об'єкти у фізичному середовищі, що їх оточує. Змішана реальність, похідна від доповненої реальності, дає змогу відображувати інтерактивні цифрові дані у фізичному середовищі та взаємодіяти з ними. Комерційні шоломи доповненої реальності (ШДР), наприклад, «HoloLens» (Microsoft Corp., США), сприяють застосуванню цих технологій візуалізації в багатьох сферах, зокрема в охороні здоров'я та освіті. Шоломи доповненої реальності мають три ключові особливості: 1) голографічний дисплей забезпечує краще сприйняття 3D-віртуальних об'єктів шляхом накладання голограм на поле зору користувача, 2) просторове відображення дає змогу спроектованим голограмам зберігати фізичне положення в просторі, навіть якщо користувач рухається, 3) інтерактивний інтерфейс hands-free дає змогу користувачеві керувати пристроєм за допомогою жестів, погляду та голосу.

Застосування ШДР у нейрохірургії вважають перспективним методом. Проведено дослідження, в яких оцінювали користь ШДР для нейронавігації, але



їхня точність реєстрації залишається дискусійною. Крім того, відносно тривалий, трудомісткий і складний робочий процес відлякує хірургів від використання ШДР для навігації. Ми провели проспективне пілотне дослідження, щоб розробити менш дорогу, просту для застосування нейронавігаційну систему змішаної реальності з використанням ШДР та визначити її клінічну ефективність і точність під час проведення нейрохірургічних втручань.

Мета: оптимізувати хірургічний доступ до внутрішньочерепних уражень (пухлини, артеріовенозні мальформації, кісти тощо) шляхом використання системи голографічної нейронавігації за допомогою шолома доповненої реальності.

Завдання дослідження полягали у визначенні можливості застосування голографічної навігації для планування нейрохірургічних оперативних втручань, визначенні часу, необхідного для роботи системи, суб'єктивній оцінці користі методики для клінічної практики.

Матеріали і методи

Учасники дослідження

З листопада 2022 р. до травня 2023 р. у Харківській обласній клінічній лікарні обстежено 80 хворих з приводу внутрішньочерепної патології головного мозку, з них 34 відповідали критеріям залучення в дослідження.

Письмова інформована згода отримана від усіх пацієнтів або їхніх законних представників. Біоетичні комісії Харківського національного медичного університету та КНП ХОР «Обласна клінічна лікарня» схвалили проведення цього дослідження.

Критерії залучення

Пацієнтів залучали в дослідження за можливості створення тривимірних моделей уражених ділянок головного мозку.

Межі ураження визначали так:

1. У разі гомогенно розширених уражень (менінгіома, гліобластома та метастази) – за розширеною частиною ураження.

2. У разі гетерогенних посиленних уражень (кавернозна мальформація та дифузні гліоми) – за краєм аномального сигналу на T2-режимі FLAIR.

3. У разі внутрішньомозкових гематом і гематом шлуночкової системи – за даними комп'ютерної томографії (КТ).

У дослідження не залучали пацієнтів із внутрішньочерепним ураженням із сильно дифузними межами, які важко ідентифікувати.

Характеристика групи

Серед пацієнтів переважали жінки (19 (55,88%)). Середній вік хворих становив (39±12) років. Дані щодо патології, діагностованої у хворих, наведено в **Табл. 1**.

Дизайн дослідження

Загальний дизайн дослідження наведено на **Рис. 1**.

Таблиця 1. Основні патології та локалізація ураження

Показник	Абс.	%
<i>Патологія</i>		
Внутрішньомозкові пухлини	5	14,71
Позамозкові пухлини	4	11,76
Внутрішньомозкові гематоми	8	23,53
Метастази	2	5,88
Артеріовенозні мальформації	4	11,76
Кавернозні мальформації	3	8,82
Гідроцефалія	8	23,53
<i>Локалізація</i>		
Лобна частка	4	11,76
Тім'яна частка	6	17,65
Скронева частка	4	11,76
Потилична частка	3	8,82
Базальні ганглії	3	8,82
Шлуночкова система	9	26,47
Мозочок	3	8,82
Стовбур головного мозку	2	5,88

Стаття містить рисунки, які відображаються в друкованій версії у відтінках сірого, в електронній — у кольорі.



Рис. 1. Загальний дизайн дослідження: МРТ – магнітно-резонансна томографія; СКТ – спіральна комп’ютерна томографія

Результати та їх обговорення

Постобробка даних і голографічна візуалізація

Усі доопераційні дані КТ або магнітно-резонансної томографії (МРТ) були доступні у форматі DICOM. Тип послідовності візуалізації обрано на підставі радіологічних характеристик ураження й хірургічних вимог. Після імпорту даних у 3D-Builder (Microsoft Corp., США) виконано сегментацію та 3D-моделювання ураження. Глибину ураження визначали як відстань від найближчої межі до поверхні мозку. Ураження класифікували за півкулею (ліва/права), часткою (лобна, тім’яна, скронева, потилична, мозочок, стовбур, базальні ганглії), об’ємом. Моделювання проводили для цільового ураження, маркерів положення та природних анатомічних орієнтирів на голові пацієнта. Усі віртуальні моделі створено у форматі OBJ та імпортовано в Unity версії 2022.2.9 (Unity Technologies, США) для сумісності з голографічною навігацією. Ми розробили модуль Unity для завантаження оброблених 3D-голограм онлайн на спеціальний сервер на основі Microsoft Azure (Microsoft Corp., США) за допомогою ШДР «HoloLens» (Microsoft Corp., США). На основі HoloLens Mixed Reality Toolkit нами також розроблено додаток «МКМРС» для завантаження голограм і реєстрації їх у фізичному середовищі задля роботи навігації. Бездротовий доступ до даних за допомогою сервісу Remote Rendering хмарної платформи Microsoft Azure дав змогу візуалізувати голограми високої чіткості крізь прозорі лінзи перед очима нейрохірурга. **Рис. 2** демонструє вигляд робочого процесу постобробки DICOM даних, **Рис. 3** – доопераційне планування доступу за допомогою ШДР.

Реєстрація голограм

Шолом доповненої реальності зручно та міцно було закріплено на голові оператора завдяки регулюванню наголовача та верхнього ремня, щоб уникнути ковзання під час руху. Калібрування ШДР проводили перед кожною реєстрацією за допомогою

наданої системою програми калібрування. Оператора попросили використовувати вказівний палець для «повітряного натискання» на 6 голографічних цілей, щоб пристрій міг вирівняти фактичне положення пальця з віртуально відображеним курсором натискання. Це займало близько 1 хв, давало змогу підвищити чіткість голограм і спрощувало взаємодію з ними після встановлення правильної відстані між зіницями. Ручну реєстрацію проводили при жорсткій фіксації голови, використовуючи орієнтири на черепі пацієнта. Розроблене програмне забезпечення МКМРС, яке працює на окулярах «HoloLens», розпізнає жести рук для ручної реєстрації та використовується для переміщення й маніпулювання голограмою доки вона не зіставиться з анатомією обличчя та голови пацієнта. Реєстрацію на голові пацієнта можна виконувати вручну автоматично за допомогою алгоритму, який суміщає голографічну площу поверхні з фізичною площею поверхні, або комбінації ручної й автоматичної реєстрації (**Рис. 4** та **5**).

Це пілотне дослідження демонструє, що використання під час оперативних нейрохірургічних втручань нейронавігаційної системи змішаної реальності, яку можна носити на голові, технічно можливе. Доведено можливість клінічного застосування голографічної нейронавігації з використанням ШДР у нейрохірургії.

Нейронавігаційна система змішаної реальності може надати переваги в реальному клінічному середовищі, адже вона забезпечує додаткову візуальну голографічну інформацію [4]. Не повертаючи голову до інших моніторів, оператор може візуалізувати голограму цільового ураження та навколишні важливі структури, «нанесені» на голову пацієнта. Голограми видно крізь проекційний дисплей перед очима користувача. Таким чином, користувач може отримати інтуїтивне розуміння розташування та форми цільового ураження. Система має ергономічні переваги й зменшує відвернення уваги, підвищує ефективність робочого процесу [5, 6]. Оператор

може керувати пристроєм за допомогою жестів або голосу, не вимагаючи від членів хірургічної бригади керування робочою станцією. Порівняно з комерційними системами нейронавігації вартість цієї системи значно менша (без комп'ютера – близько 4 тис. доларів США) [7].

Користувач може виконувати обробку даних зображення та голографічну візуалізацію, використовуючи лише ШДР і комп'ютер, у будь-який час і в будь-якому місці, не потребуючи громіздкої апаратної системи робочої станції. Порівняно зі стандартними системами оптичної нейронавігації система голографічної нейронавігації не прив'язана до інфрачервоної камери. Можна досягти локалізації ураження та здійснювати просту навігацію, тримаючи надрукований на 3D-принтері інструмент позиціонування, або проводити реєстрацію вручну. Члени команди можуть ділитися інформацією від оператора в реальному часі з іншим пристроєм «HoloLens» через локальну мережу, що важливо для навчання молодих лікарів, інтернів та студентів. Важливим моментом у цьому методі голографічної локалізації є реєстрація голограми на пацієнті. Для цього ми розробили напівавтоматичну процедуру співреєстрації. Порівняно з розміщенням голограми вручну ця реєстрація має потенційну перевагу щодо зменшення візуального неправильного тлумачення, тому оператору не потрібно регулювати

положення голограми з різних точок у просторі. Для максимального ефекту цих переваг ми створили інтуїтивно зрозумілу систему на основі Microsoft Mixed Reality Tool Kit (MRTK), яку легко налаштувати особам з мінімальним досвідом використання доповненої реальності. Хоча доповнену реальність в операційній використовували й інші автори, але ми створили програму на основі MRTK для завантаження та маніпулювання створеними на підставі DICOM-даних голограмами, а також програмне забезпечення для клінічного використання, адже наявні системи або не представлені в Україні, або їхнє використання дуже дороге.

Нейрохірург або його асистент фіксували час, необхідний для голографічної навігації, тобто тривалість періоду від налаштування системи до створення контуру ураження на голові пацієнта (постобробка даних, голографічна візуалізація та голографічна реєстрація). Цей час важливий для оцінки ефективності застосування голографічного методу навігації в умовах операційної. Додатковий час оперативного втручання в середньому становив $(39,2 \pm 7,9)$ хв. Час зменшувався у міру збільшення частоти використання та опанування методикою хірургом (Рис. 6). На час постобробки даних припадає більша частина часу, необхідного для голографічної навігації, який скорочується зі збільшенням досвіду використання системи та ШДР.

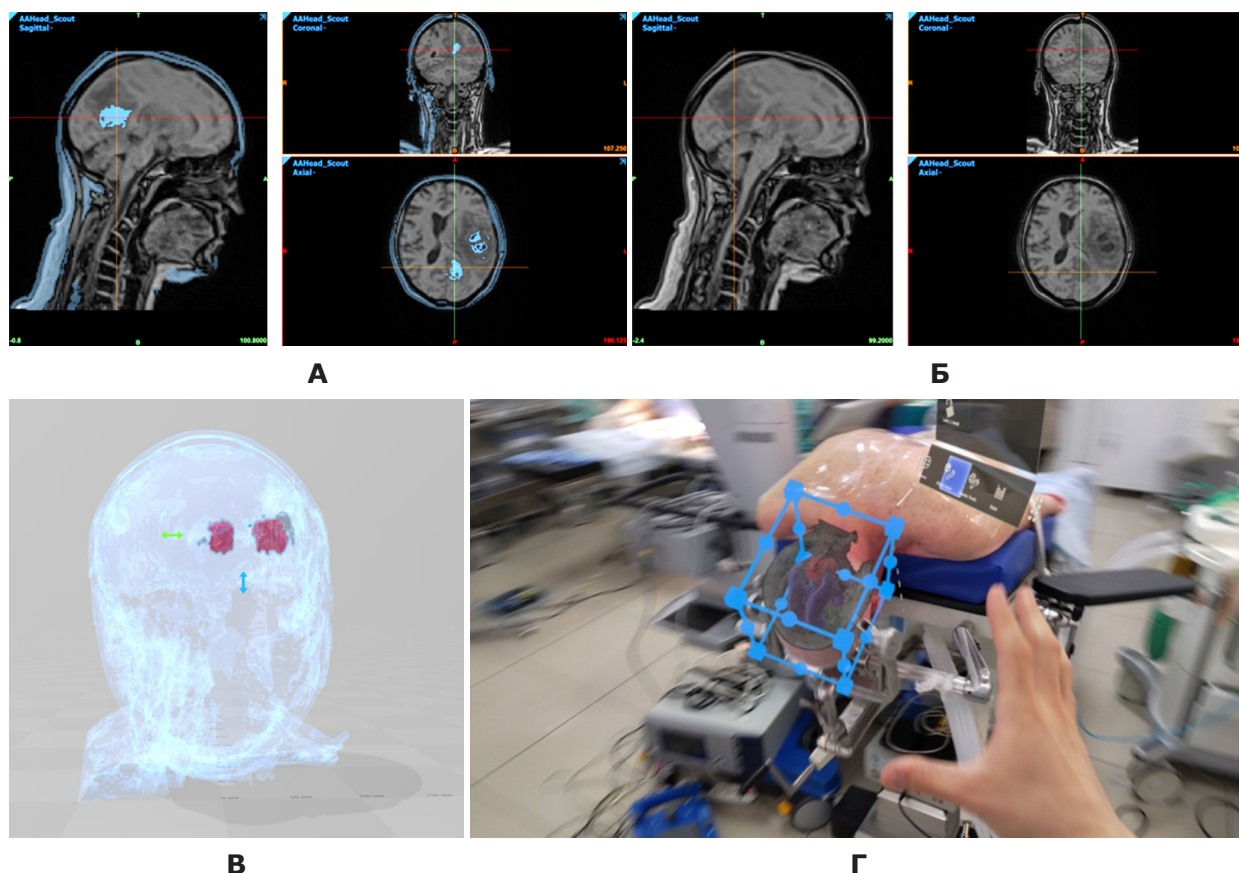


Рис. 2. Поетапний процес використання DICOM-зображень для голографічної навігації: А – вигляд МРТ головного мозку пацієнта з новоутвореннями; Б – сегментація новоутворень; В – вигляд 3D-моделі після реконструкції; Г – вигляд голографічної моделі, зіставленої з головою пацієнта через шолом доповненої реальності

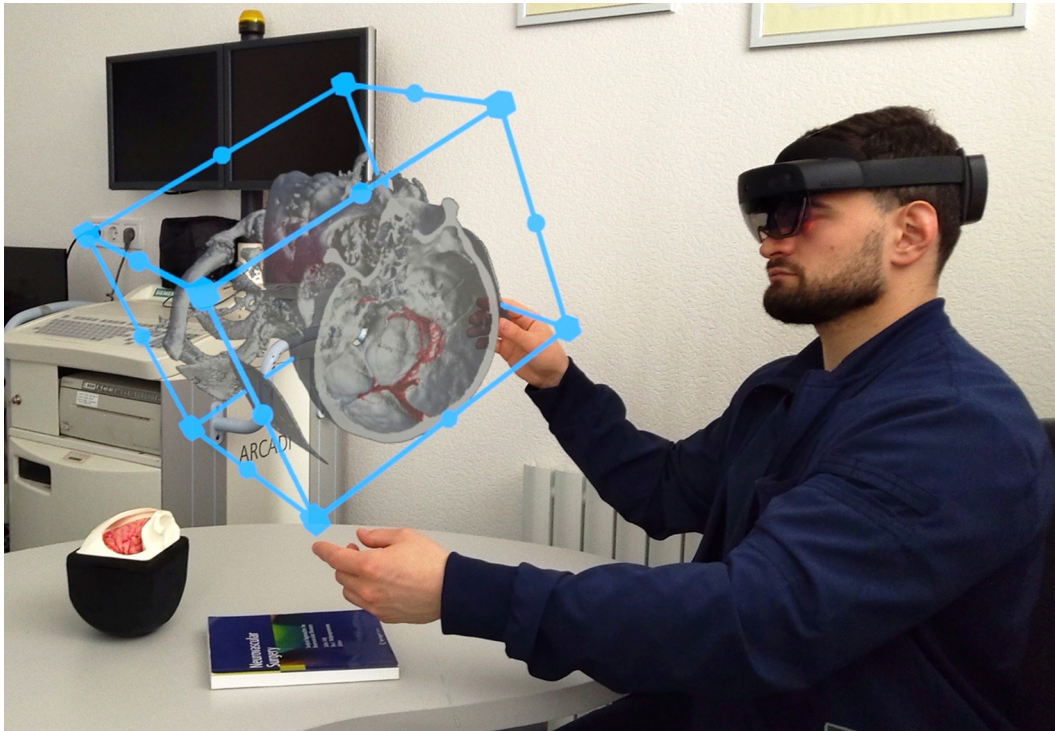


Рис. 3. Доопераційне планування з використанням 3D-моделі

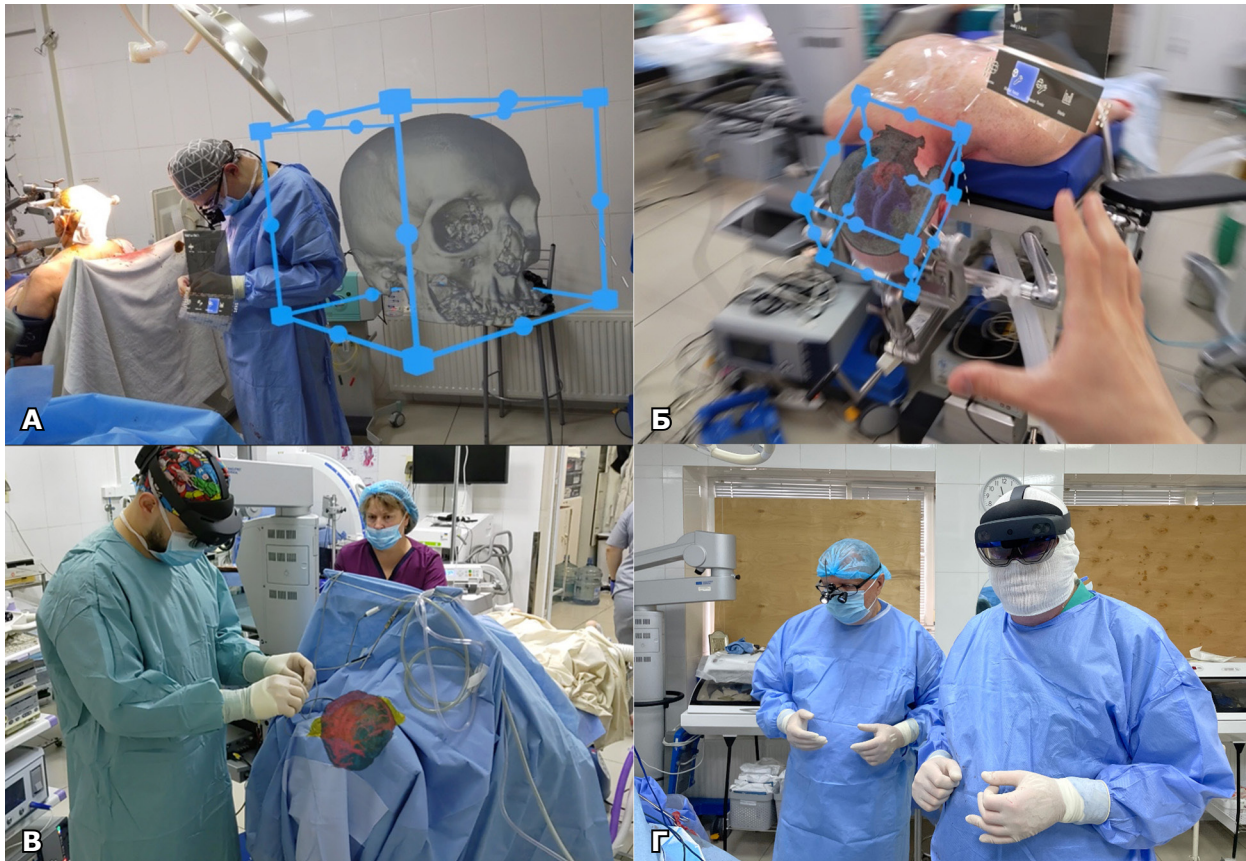
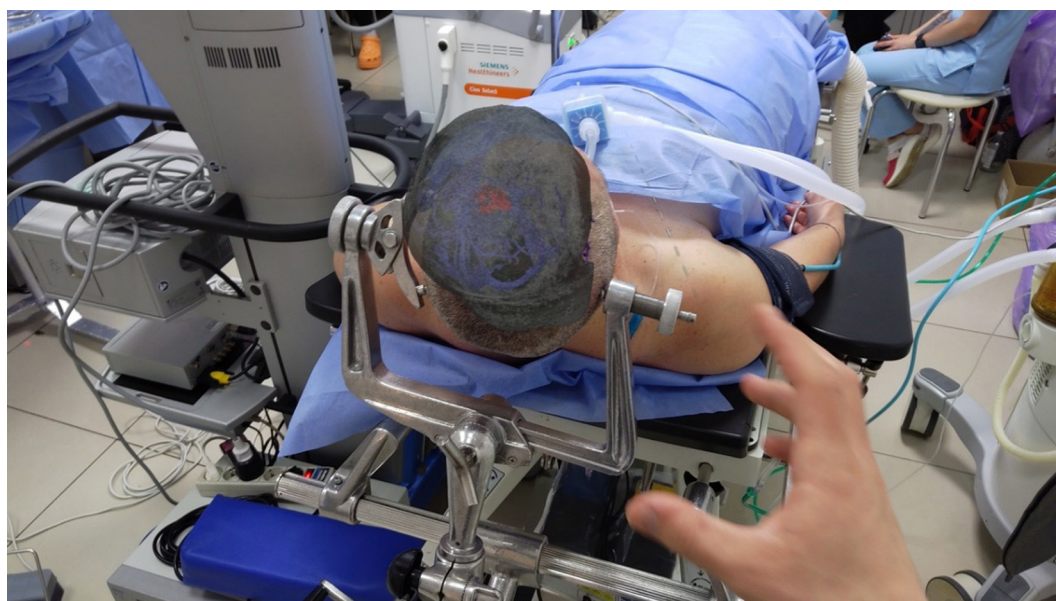


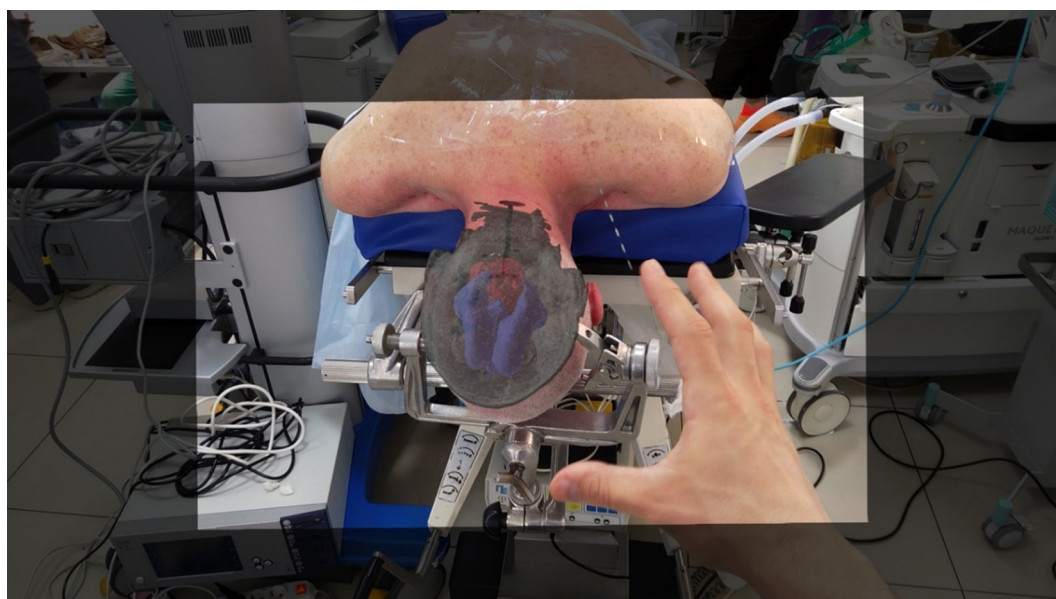
Рис. 4. Використання доповненої реальності під час планування операційного доступу та оперативного втручання: А – вигляд 3D-моделі черепа перед зіставленням; Б – зіставлення 3D-моделі з черепом пацієнта; В – вигляд голографічної навігації після обробки операційного поля; Г – операційна бригада під час планування доступу



А



Б



В

Рис. 5. Доопераційний вигляд голографічної навігації для: А – гематоми мозочка; Б – кавернозної мальформації прецентральної звивини; В – новоутворення ІV шлуночка



Рис. 6. Динаміка змін тривалості періоду від створення голограми до кінцевої реєстрації на голові пацієнта

Для оцінки ефективності та зручності використання застосовано опитувальник, за допомогою якого в післяопераційний період здійснювали збір інформації. Нейрохірургам пропонували за шкалою від 1 до 5 (1 – «повністю не згоден», 5 – «повністю згоден») оцінити такі твердження:

Мені було легко оперувати голограмою та зіставляти її з анатомічними поверхнями.

1. Межі голограми збіглися з реальними межами ураження.

2. Я не відчував(-ла) жодного дискомфорту при використанні окулярів доповненої реальності.

3. Використання програмного забезпечення MKMRS для ШДР полегшило доопераційне планування.

У цілому використання технології доповненої реальності для навігації, а також роботу застосування у шоломі «HoloLens» оцінено позитивно. Нейрохірурги відзначали точність позиціонування, якість зображення й клінічну ефективність роботи голографічної навігації. Це сприяло зменшенню тривалості оперативного втручання та розмірів краніотомії, оскільки просторове уявлення патологічного процесу та його взаємозв'язки з нормальними структурами поліпшувалося при використанні системи. Також наголошено на відсутності дискомфорту та користі цієї технології під час доопераційного планування. Оцінка хірургів змінювалася на позитивну після декількох використань з адаптацією до концепції змішаної реальності (**Табл. 2**).

При використанні голографічної нейронавігації у дослідженні виявлено деякі обмеження системи.

По-перше, спостерігався дрейф (зміщення) голограми, який не сильно впливав на точність системи та виникав через певну похибку даних відстеження та інформації, що відображується за допомогою окулярів «HoloLens». Візуальний ефект голографічного дрейфу мав місце переважно під час рухів навколо голограми і був непомітний при наближенні чи віддаленні від неї.

По-друге, спостереження за голограмами може відволікти увагу оператора від фізичного простору, що може зменшити видимість операційної зони. Крім того, оператор може відчувати дискомфорт, намагаючись виконати технічні маневри з ШДР, наприклад, позначити межі або виконати розрізи. Вирішенню цієї проблеми сприяють вбудовані можливості ШДР, адже яскравість екрана «HoloLens» і непрозорість голограми можна легко регулювати за допомогою налаштувань на пристрої, щоб оператор міг чітко бачити як голограму, так і пацієнта.

По-третє, постобробка даних займає більшу частину часу налаштування голографічної нейронавігації. Однією з проблем є забезпечення достатньої кількості добре навченого персоналу для сегментації DICOM-зображень і створення голограм. У багатьох клініках світу є центри 3D-технологій, які займаються безпосередньо сегментацією медичних зображень, а також створенням тривимірних моделей на їхній основі. Крім того, постійний розвиток програмного забезпечення MKMRS сприяє спрощенню процесу, тому система голографічної нейронавігації стає простішою для використання.

Незважаючи на багатообіцяючі попередні результати, слід удосконалити систему. Будь-який рух голови пацієнта після реєстрації призведе до сильного відхилення голограми. У цьому випадку необхідно виконати повторну реєстрацію, щоб переконатися, що голограма суміщена коректно. Ми розробляємо маркери для розміщення в хірургічній зоні, які буде постійно відстежувати ШДР, щоб точно тримати голограму на голові пацієнта. Майбутні дослідження слід зосередити на автоматизації зіставлення тривимірної моделі з реальними фізичними об'єктами. Для оцінки точності використання голографічної нейронавігації в операційній необхідно провести порівняльне дослідження з нейронавігаційними станціями та коригування положення голограм з подальшим калібруванням ШДР і програми.

Таблиця 2. Результати анкетування хірургів після використання нейронавігаційної системи змішаної реальності на шоломі доповненої реальності

Запитання анкети	Оцінка				
	1 (повністю не згоден)	2 (більше не згоден, ніж згоден)	3 (складно відповісти)	4 (більше згоден, ніж не згоден)	5 (повністю згоден)
Мені було легко оперувати голограмою та зіставляти її з анатомічними поверхнями	0 (0%)	3 (8,1%)	8 (21,6%)	16 (43,2%)	10 (27,0%)
Межі голограми збіглися з реальними межами ураження	0 (0%)	1 (2,7%)	0 (0%)	13 (35,1%)	23 (62,2%)
Я не відчував(-ла) жодного дискомфорту при використанні окулярів доповненої реальності	1 (2,7%)	3 (8,1%)	2 (5,4%)	20 (54,0%)	11 (29,7%)
Використання програмного забезпечення MKMRS для ШДР полегшило доопераційне планування	0 (0%)	1 (2,7%)	4 (10,8%)	12 (32,4%)	20 (54,0%)

Висновки

Проведене дослідження довело технічну здійсненність використання нейронавігаційної системи змішаної реальності із застосуванням шолома доповненої реальності в лікувальному процесі й точність отриманих даних. Ми переконалися, що ця технологія має значний потенціал для впровадження в клінічну практику, навчальний процес та спрощує доопераційне планування складних малоінвазивних оперативних втручань. Необхідно провести додаткові дослідження і тестування для підвищення точності та ефективності системи.

Розкриття інформації

Конфлікт інтересів

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

Етичні норми

Усі процедури, виконані пацієнтам під час дослідження, відповідають етичним стандартам інституційного та Національного комітетів з етики і Гельсінської декларації 1964 р. з поправками й аналогічним етичним стандартам.

Інформована згода

Від кожного з пацієнтів отримано інформовану згоду.

Фінансування

Дослідження не мало спонсорської підтримки.

Список літератури

- Besharati Tabrizi L, Mahvash M. Augmented reality-guided neurosurgery: accuracy and intraoperative application of an image projection technique. *J Neurosurg.* 2015 Jul;123(1):206-11. doi: 10.3171/2014.9.JNS141001
- Mishra R, Narayanan MDK, Umana GE, Montemurro N, Chaurasia B, Deora H. Virtual Reality in Neurosurgery: Beyond Neurosurgical Planning. *Int J Environ Res Public Health.* 2022 Feb 2;19(3):1719. doi: 10.3390/ijerph19031719
- Guha D, Alotaibi NM, Nguyen N, Gupta S, McFaul C, Yang VXD. Augmented Reality in Neurosurgery: A Review of Current Concepts and Emerging Applications. *Can J Neurol Sci.* 2017 May;44(3):235-245. doi: 10.1017/cjn.2016.443
- Incekara F, Smits M, Dirven C, Vincent A. Clinical Feasibility of a Wearable Mixed-Reality Device in Neurosurgery. *World Neurosurg.* 2018 Oct;118:e422-e427. doi: 10.1016/j.wneu.2018.06.208
- Tepper OM, Rudy HL, Lefkowitz A, Weimer KA, Marks SM, Stern CS, Garfein ES. Mixed Reality with HoloLens: Where Virtual Reality Meets Augmented Reality in the Operating Room. *Plast Reconstr Surg.* 2017 Nov;140(5):1066-1070. doi: 10.1097/PRS.0000000000003802
- van Doormaal TPC, van Doormaal JAM, Mensink T. Clinical Accuracy of Holographic Navigation Using Point-Based Registration on Augmented-Reality Glasses. *Oper Neurosurg (Hagerstown).* 2019 Dec 1;17(6):588-593. doi: 10.1093/ons/oz094
- Frantz T, Jansen B, Duerinck J, Vandemeulebroucke J. Augmenting Microsoft's HoloLens with vuforia tracking for neuronavigation. *Healthc Technol Lett.* 2018 Oct 4;5(5):221-225. doi: 10.1049/htl.2018.5079
- Cutolo F, Meola A, Carbone M, Sinceri S, Cagnazzo F, Denaro E, Esposito N, Ferrari M, Ferrari V. A new head-mounted display-based augmented reality system in neurosurgical oncology: a study on phantom. *Comput Assist Surg (Abingdon).* 2017 Dec;22(1):39-53. doi: 10.1080/24699322.2017.1358400
- Li Y, Chen X, Wang N, Zhang W, Li D, Zhang L, Qu X, Cheng W, Xu Y, Chen W, Yang Q. A wearable mixed-reality holographic computer for guiding external ventricular drain insertion at the bedside. *J Neurosurg.* 2018 Oct 1:1-8. doi: 10.3171/2018.4.JNS18124
- Cabrilo I, Bijlenga P, Schaller K. Augmented reality in the surgery of cerebral aneurysms: a technical report. *Neurosurgery.* 2014 Jun;10 Suppl 2:252-60; discussion 260-1. doi: 10.1227/NEU.0000000000000328
- Condino S, Montemurro N, Cattari N, D'Amato R, Thomale U, Ferrari V, Cutolo F. Evaluation of a Wearable AR Platform for Guiding Complex Craniotomies in Neurosurgery. *Ann Biomed Eng.* 2021 Sep;49(9):2590-2605. doi: 10.1007/s10439-021-02834-8