

Петров В. Ф.¹, Ph.D., асистент кафедри хірургії та трансплантології, <https://orcid.org/0000-0002-2205-5403>

Паньків М. В.², Ph.D., асистент кафедри хірургії, <https://orcid.org/0000-0002-3714-2577>

¹Львівський національний медичний університет імені Данила Галицького, м. Львів, Україна

²Львівська медична академія імені Андрея Крупинського, м. Львів, Україна

Застосування розширеної реальності у кардіохірургії та інтервенційній кардіології. Аналіз літературних джерел

Резюме. Розширена реальність поєднує справжній і цифровий світи. Ця технологія знайшла застосування у всіх галузях медицини, в тому числі у кардіохірургії та інтервенційній кардіології. Робота присвячена застосуванню трьох видів розширеної реальності, а саме: віртуальної, підсиленої та змішаної.

Мета – на прикладі немедичних і медичних застосувань пояснити принципи роботи різних видів розширеної реальності; проаналізувати дані спеціалізованих публікацій у галузі втручань на серці.

Матеріали. Статті з бази даних Pubmed.

Обговорення. Висвітлено важливі деталі методики створення зображень серця та судин, з якими оперують користувачі. У віртуальній реальності зображення вади серця поглиблено аналізують та виконують віртуальні маніпуляції, які моделюють хід операції. До віртуальної реальності відносять друк серця на 3D-принтері з подальшою роботою над фізичними моделями. У підсиленій реальності створене зображення внутрішньої анатомії вади присутнє біля хірурга, не заважаючи виконувати основні маніпуляції. У змішаній реальності віртуальне зображення накладається на тіло пацієнта, що створює детальну навігаційну карту.

Висновки. Застосування розширеної реальності поглиблює розуміння анатомії за рахунок стереоскопічної візуалізації будови серця та судин. Створення моделі вади серця пацієнта і симуляція операції на ній скорочує «криву навчання», покращує професійні навички хірургів і кардіологів, а також дає змогу індивідуалізувати хірургічні та ендоваскулярні втручання. Планування втручань у кардіохірургії та інтервенційній кардіології з технологіями розширеної реальності впливає на прийняття рішень та зменшує тривалість операцій.

Ключові слова: віртуальна реальність, підсилена реальність, змішана реальність, 3D-друк, сегментація серця.

Вступ. Мініатюризація та зростаючі потужності комп'ютерної техніки створюють все більше можливостей для застосування розширеної реальності (РР) в медичних галузях, зокрема кардіохірургії та інтервенційній кардіології. Позитивні результати їх використання, отримані в 2010 – на початку 2020 рр., дають змогу передбачити, що з часом РР може стати принципово новим і важливим елементом надання медичної допомоги пацієнтам із захворюваннями серця у спеціалізованих центрах. У цьому огляді наведено можливості, доцільність і принципи застосування РР у кардіохірургії та інтервенційній кардіології.

Мета – провести аналіз літературних даних про види РР, способи та результати їх використання в кардіохірургії та інтервенційній кардіології.

Матеріали та методи. Проведено пошук у базі даних Pubmed за ключовими словами «cardiac surgery» OR «interventional cardiology» AND «extended reality» OR «virtual reality» OR «augmented reality» OR «mixed reality».

Результати

Види розширеної реальності. Розширеною реальністю називають сукупність технологій, що об'єднують віртуальний та реально існуючий світи. До РР відносять віртуальну реальність (ВР), підсилену реальність (ПР) та змішану реальність (ЗМР) [1, 2, 3]. Наведемо відомі приклади цих технологій з немедичних галузей.

Найпростішим видом ВР є будь-яка комп'ютерна гра, тому що дії в ній відбуваються в неіснуючому середовищі з віртуальними об'єктами (навіть якщо вони схожі на справжні). Більш показовим прикладом ВР є ігрова консоль HTC Vive (HTC Corporation, Тайвань), презентована для широкого використання у 2016 ро-

ці. Консоль складається з шолома, в який вмонтовані два екрани, що показують окремі картини для кожного ока і, таким чином, шолом формує стереоскопічне зображення. У шоломі наявні датчики руху, дані з яких передаються на станцію, тому зображення на дисплеях постійно оновлюються відповідно до рухів голови користувача. У такий спосіб користувач перебуває у віртуальному середовищі, бачить тривимірне зображення об'єкта і може «підійти» до нього, «зануритись» в об'єкт чи «вийти» з нього, а через контролер та іншу гарнітуру – «повернути», «перемістити» або виконати визначені дії з віртуальним предметом. На цих принципах створені ігри VR [4].

Найвідомішим прикладом PP є ігровий додаток до мобільних телефонів Pokémon Go (Niantic, США, у співпраці з Nintendo, Японія, і The Pokémon Company, Японія), який набув всесвітньої популярності у 2016–2017 рр. У цій технології відеокамера телефона показує навколишній світ на дисплеї, а додаток Pokémon Go накладає на справжнє зображення віртуальні створіння (покемони), які виконують різні дії. При цьому покемони додаються до справжньої картини з максимальною правдоподібністю, відповідно до ландшафту, архітектури, побутових предметів, але не змінюють основне поле зору і не взаємодіють з ним. Гравцю необхідно знайти або «захопити» анімаційних персонажів телефоном [5]. Іншим прикладом PP є проєкція інформації про параметри руху, шлях і поїздки на лобове скло автомобіля зі смартфона чи спеціального пристрою [6].

Змішана реальність – це поєднання VR і PP так, що віртуальні об'єкти накладаються на фізичні тіла, а оператор може взаємодіяти з ними безпосередньо, без додаткової гарнітури. Користуються цією технологією з 2016 року, коли були випущені комерційно доступні смарт-окуляри HoloLens (Microsoft, США). Ці окуляри складаються з обруча, до якого прикріплені напівпрозорі лінзи з мікродисплеями. Користувач бачить крізь них реальний світ, однак водночас лінзи скеровують з мікродисплеїв у зіниці додаткове зображення. Зображення мікродисплеїв сформоване таким чином, що віртуальний об'єкт «з'являється» на певній відстані (від сантиметрів до метрів) від користувача, реалістично «розміщуючись» між справжніми тілами. У цьому полягає принципова відмінність HoloLens від шолома HTC Vive, оскільки в останньому користувач не бачить справжнього світу, а цілком перебуває у віртуальному оточенні. HoloLens, як і HTC Vive, відстежують рухи голови, аналізують реальну картину і відповідно модифікують віртуальне зображення. Смарт-окуляри мають вбудовану відеокамеру, яка спостерігає за навколишнім світом. Це дає змогу відстежувати жести власника, тому «натискаючи» вказівним пальцем на віртуальну «кнопку», користувач може змінити параметри та хід програми. Цим ЗМР із смарт-окулярами

HoloLens відрізняються від PP і згаданої гри Pokémon Go, а також від VR та станції HTC Vive, оскільки не потрібно користуватись інтерактивним екраном, мишкою, клавіатурою чи ігровою гарнітурою [7].

Технологія ЗМР введена окулярами HoloLens у додаток Skype (Microsoft, США) у 2018 році. Завдяки їй користувач бачить екран із зображенням співрозмовника у кімнаті перед собою, може розпочати і завершити розмову, «натискаючи» віртуальні кнопки «у повітрі». У Skype віртуальне зображення можна накласти безпосередньо на реальний об'єкт, наприклад у вигляді стрілок або контурів, які підказують користувачу, в яку сторону та по якій траєкторії повернути тіло. Таким способом співрозмовник отримує змогу керувати діями користувача і навчити його певних маніпуляцій [7].

Зазначимо, що в кардіохірургії та інтервенційній кардіології провести межу між PP і ЗМР зазвичай не просто, тому їх деколи об'єднують терміном PP/ЗМР.

Створення віртуального об'єкта. Як у VR, так і PP/ЗМР спочатку потрібно створити віртуальний об'єкт, а саме тривимірне зображення серця та судин, а потім взаємодіяти з ним (VR) або із зображенням та пацієнтом (PP/ЗМР).

Методика створення віртуального образу серця та судин полягає у такому. Пацієнта обстежують шляхом проведення комп'ютерної томографії (КТ), магнітно-резонансної томографії (МРТ), тривимірної ехокардіографії (3D-ЕхоКГ) або тривимірної ротаційної катетеризаційної ангиографії (3D-РКА) [8, 9, 10]. Отримані дані зберігають у форматі DICOM (англ. Digital Imaging and Communications in Medicine). Файл DICOM обробляють за допомогою спеціального програмного забезпечення і сегментують. Сегментація – це розділення суцільного зображення на кілька сегментів (наприклад, відділяють шлуночки від усєї грудної клітки або ізолюють розширену аорту). Після цього з порожнини органа «забирають» вміст (наприклад, контрастну рідину з шлуночків чи аорти) і залишають лише стінку органа (наприклад, вільні стінки шлуночків і міжшлуночкову перегородку, розширені стінки аорти). Отриманий образ зберігають у форматі STL (англ. Stereolithography) чи інших протоколах для роботи з геометричними об'єктами [1, 9]. Для розуміння цього процесу можна уявити дошку для гри в шахи. Комп'ютерна програма у форматі DICOM вважає інформацією як білі, так і чорні клітинки, тоді як у форматі STL комп'ютер «бачить» лише чорні клітинки, а білі клітинки не вважає за інформацію, і тому під час перегляду вони виглядають як порожнини (рисунк 1).

Отже, файл STL є створеним тривимірним зображенням, яке максимально відтворює справжню анатомію з його порожнинами, нерівностями та контурними утворами [1, 2, 9, 11].

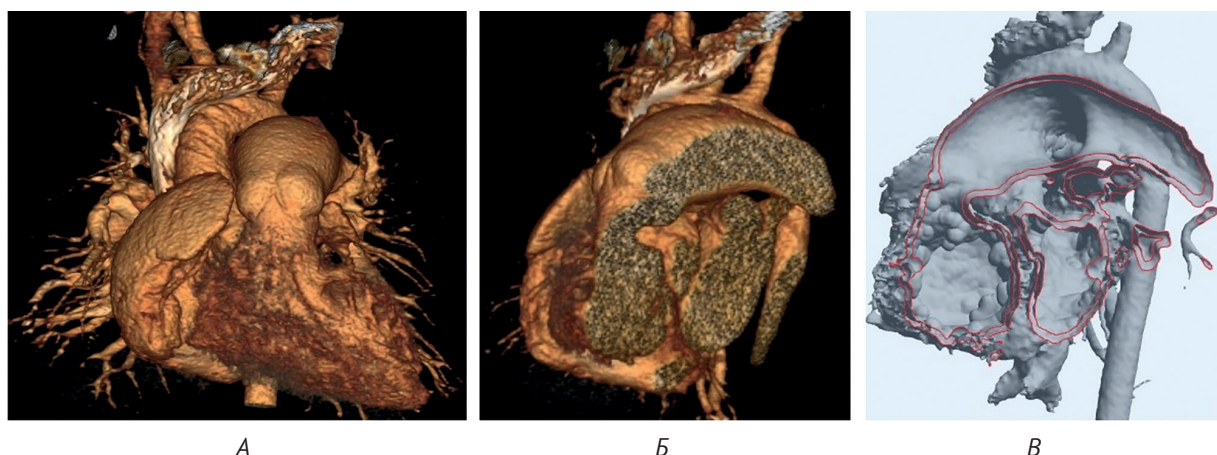


Рисунок 1. Процес створення віртуального об'єкта для PP: А – зовнішній вигляд 3D-моделі серця у форматі DICOM (зображення у програмі RadiAnt DICOM Viewer, Medixant); Б – вертикальний зріз моделі, вигляд збоку, внутрішній вміст моделі суцільний (зображення у програмі RadiAnt DICOM Viewer, Medixant); В – ця ж модель після обробки у форматі STL, вертикальний зріз моделі, вигляд збоку, видно внутрішній вміст моделі: порожнина правого шлуночка, вихідний відділ правого шлуночка, стовбур легеневої артерії, поздовжній переріз лівої і устя правої легеневої артерії, порожнина лівого передсердя (зображення імпортоване у програму Adobe Reader, Adobe Inc.)

Віртуальна реальність. У VR оператор користується тривимірною моделлю серця та судин без прямого зв'язку з істинними органами, які слугували прототипом для віртуальної моделі.

Симуляційний центр Університету Іллінойсу (США) надав деякі моделі сердець з вродженими вадами у відкритий доступ. Безкоштовні файли доступні на сайті Національного інституту здоров'я Міністерства охорони здоров'я і соціальних служб США [12]. Користувачі можуть завантажити їх і, користуючись ігровою консоллю VR, розглянути зовнішню та внутрішню будову серця, наприклад «перебуваючи» позаду передсердь чи всередині вибраного шлуночка.

Останнім часом все більша кількість спеціалізованих центрів вдаються до планування операцій шляхом доопераційного дослідження будови клапанів, перегородок, камер серця, коронарних артерій, магістральних судин у VR, що дозволяє більш прецизійно оцінити анатомічні особливості і на їх підставі обрати тактику хірургічного втручання [2, 13, 14, 15, 16]. Pisowodzka et al. (2020) розглянули 3D-ЕхоКГ картини недостатності мітрального клапана спочатку з екрана ультразвукового апарата, а потім в стереоскопічному вигляді, і виявили, що в двох з дев'яти випадків VR суттєво доповнила розуміння клапанних вад та вплинула на тактику операційного лікування [15].

Серця VR можна не лише роздивитися зсередини та з усіх кутів ззовні, а й змодельовати у них операційні втручання. Szugye et al. (2019) віртуально розміщували моделі сердець донорів у грудні клітці дітей з дилатаційною кардіоміопатією і таким чином показали, що VR дала змогу підібрати донорський орган

краще, ніж росто-масові показники [17]. Neugebauer et al. (2019) спостерігали за змінами отвору мітрального клапана після імплантації опорного кільця [18]. Tandon et al. (2019) ввели віртуальний стент у верхню порожнисту вену моделі синус-дефекту міжпередсердної перегородки з аномальним дренажем легневих вен, у такий спосіб спланували ендovasкулярну корекцію [19]. Nam et al. (2020) імпантували VR оклюдери у дефекти міжпередсердної та міжшлуночкової перегородок та змодельовали ступінь деформації встановлених пристроїв [20]. Інші дослідники провели віртуальні імплантації клапана легеневої артерії у вихідний відділ правого шлуночка та стовбур легеневої артерії [3, 21].

Консоль VR має один або два шоломи стереоскопічного бачення, тому дивитися на модель одночасно можуть лише один-два користувачі. На відміну від неї, смарт-окуляри HoloLens автономні та не прив'язані до станції чи гарнітури, а тому всі власники смарт-окулярів можуть взяти участь у сеансі однакового споглядання віртуальної моделі. Фахівці створюють віртуальні моделі аномалій, через смарт-окуляри надають можливість їх оглянути одночасно кільком учасникам доопераційного консильярного обговорення і таким чином обрати оптимальний варіант хірургічної корекції [16, 22, 23, 24]. Виявилось, що хірурги, які ознайомилися з тривимірною структурою вади смарт-окулярами до операції, витратили менше часу на оцінювання анатомії інтраопераційно та швидше розпочали основний етап операції [23, 24]. Ye et al. (2021) показали, що хірурги, які оглядали серця смарт-окулярами, робили менше інтраопераційних змін так-

тики операції, ніж хірурги, які ними не користувалися, хоча і без статистичної достовірності [24].

Серце можна не лише розглянути VR, а й надрукувати на 3D-принтері та вивчити патологічну анатомію, тримаючи модель у руках [8, 25, 26]. Yoo et al. (2022) надрукували моделі сердець зі складними аномаліями синтопії шлуночків, що надало можливість наочно показати типи ембріональних петель (D- та L-loop) і встановити правильний діагноз [26]. Результати мультицентрового дослідження Valverde et al. (2017) показали, що використання надрукованих моделей складних вроджених вад серця у 52,5 % випадків не впливало на хірургічну тактику, хоча у 47,5 % випадків хірурги змінили первинний план операції після того, як оцінили анатомію в тривимірному режимі [8]. Залишається відкритим питання, чи діагностичне та планувальне застосування надрукованих на 3D-принтері моделей впливає на результати лікування. Biglino et al. (2015) та Jones, Seckeler (2017) виявили, що впровадження для доопераційного оцінювання вроджених вад надрукованих моделей сердець скоротило час операції, тривалість перебування в реанімації та летальність, проте без статистичної достовірності [27, 28]. Водночас дослідження Tiwari et al. (2021) показало, що в деяких випадках хірурги та кардіологи на підставі моделей визнали внутрішньосерцеву анатомію неоперабельною, відмовилися від двохшлуночкової корекції вроджених вад, що само по собі могло сприяти кращому ранньому виживанню [10].

Файли VR можна надрукувати на 3D-принтері в справжній розмір і використати для хірургічних тренувань. Фахівці The Hospital for Sick Children (Торонто, Канада) одними з перших у 2016 році запровадили такі курси для хірургів. Лікарі проводять корекції складних вад серця звичайними хірургічними інструментами і нитками під наглядом керівників. Результати показали, що після навчань резиденти виконували справжні операції достовірно швидше та з меншою кількістю помилок [29]. Yamada et al. (2017) надрукували на 3D-принтері серце й органомоделю грудної клітки, який слугував як симулятор для тренувань операцій на мітральному клапані з правобічної мініторакотомії та із застосуванням робота Да Вінчі [30]. Ряд дослідників показали, що завдяки навичкам, отриманим під час VR пластики мітрального клапана і скелетизації внутрішньої грудної артерії, резиденти і досвідчені хірурги почали проводити ці втручання значно швидше і якісніше [16, 31].

Віртуальні моделі судин та серця (зокрема коронарних артерій) вже продемонстрували високу ефективність для навчання ендovasкулярних методик молодих спеціалістів, а також для удосконалення навичок професіоналам. Після VR тренінгів інтервенційні кардіологи проводять втручання швидше, скорочують тривалість опромінення і допускають меншу кількість

помилки. Цікаво, що навчання VR покращило навіть нетехнічні навички операторів, такі як комунікацію з персоналом, концентрацію на екрані, планування і швидкість прийняття рішень під час ускладнень [32, 33].

Як і у випадку хірургічних симуляцій, для інтервенційної кардіології судини та серце також друкують на 3D-принтері. Наприклад, на моделях стегнових артерій ефективно навчаються техніки катетеризації, а надрукована аорта з її коренем і аортальним клапаном є хорошим симулятором для опанування методики ендovasкулярної імплантації аортального клапана [34, 35].

Надруковані моделі можна використати не лише з навчальною метою, а й для планування інтервенцій. Valverde et al. (2015) провели стентування дуги аорти спочатку на манекені (у такий спосіб обрали розмір стента і місце його імплантації), а потім успішно виконали процедуру 15-річному пацієнту [36]. Li et al. (2017) друкували моделі сердець кожного пацієнта, якому планувалось ендovasкулярне закриття порожнини лівого вушка оклюдером, і виявили, що тренування на цих моделях достовірно зменшило кількість залишкових шунтів та тривалість опромінення [37]. Jalal et al. (2018) виготовили модель серця з повною атривентрикулярною комунікацією і неоперабельним варіантом недостатності мітрального клапана, а потім імпантували в неї клапан Melody; моделювання показало механізм виникнення обструкції вихідного відділу лівого шлуночка, тому кардіологи відповідно zdeформували клапан, а потім успішно імпантували його немовляті [38]. Witowski et al. (2019), готуючись до балонних дилатацій і стентувань легеневої артерії пацієнтам з хронічною посттромбоемболічною легеневою гіпертензією, надрукували моделі ушкоджених хворобою легеневої артерії з матеріалів різної еластичності. Необхідні процедури виконали на цих моделях із застосуванням провідників, балонів та стентів різної твердості, і в такий спосіб обрали оптимальні інструменти, які забезпечили найменше травмування [39]. Giugno et al. (2020) виконали імплантацію клапана легеневої артерії в несприятливій анатомії вихідного відділу правого шлуночка 3D-моделі й успішно – пацієнту [40].

Надруковані моделі кореня і висхідного відділу аорти вже активно використовуються для індивідуального планування ендovasкулярної імплантації аортального клапана, оскільки такий підхід краще прогнозує персистенцію післяопераційних параклапанних нориць. Оцінювання анатомії допомагає обрати доступ і тактику профілактики емболій, оцінити ризики обструкцій вічок коронарних артерій і передбачити способи їх уникнення, в тому числі пацієнтам з імпантованими біологічними протезами краще, ніж лише споглядаючи результати КТ [35].

Підсилена реальність / змінена реальність. На відміну від VR, де зображення серця та судин пацієнта

не прив'язане до самого пацієнта під час огляду створеного зображення, у ПР/ЗМР віртуальна модель прив'язана до тіла конкретного хворого і може взаємодіяти з ним під час операції.

У режимі ПР зображення серця, клапанів, коронарних та легеневих артерій можна розглядати за допомогою смарт-окулярів біля пацієнта, над операційним столом чи в операційному полі. Це допомагає у навігації складної анатомії та робить рухи рук і інструментів точнішими [25, 39, 41, 42]. Opolski et al. (2020) показали, якщо віртуальне коронарне дерево відобразити в режимі ПР під час катетеризаційної ангіографії, це не впливає на результати коронарних стентувань, однак кардіологи частіше вдаються до постдилатації коротшими і жорсткішими балонами з меншою частотою дисекцій [41].

У ЗМР віртуальне зображення серця та судин накладають на грудну клітку (або на відкрите серце, судини тощо). Ці зображення «приклеюються» до «своїх» анатомічних ділянок і «слідують за ними», навіть якщо серце рухається в систолу і діастолу, а тіло повертається. Іншими словами, користувач, дивлячись на пацієнта через смарт-окуляри, «бачить» серце та судини, розглядає їх структуру. Правильне «приклеювання» віртуального рисунка проводиться за допомогою маркерів, ділянок зображення, які точно відповідають реальному предмету (контури тіла, позначки на ньому, рентгенологічні тіні органів) [25, 43].

Zhu et al. (2019) виконали КТ серця, нижньої порожнистої та стегнових вен і створене віртуальне зображення «наклали» на тіло пацієнта. Оператор через смарт-окуляри «побачив» стегнову вену, виконав її катетеризацію, виміряв довжину нижньої порожнистої вени і ввів на встановлену глибину қава-фільтр, не застосувавши під час операції контрастну рідину [43]. Через 2 роки ці ж фахівці у Пекіні виконали імплантацію қава-фільтра манекену, дивлячись на нього через смарт-окуляри за описаною методикою. Водночас їх колеги в Ібіні оперували справжнього пацієнта, через свої смарт-окуляри вони бачили руки лікарів з Пекіну і повністю копіювали їх дії, «вкладаючи» свої руки у віртуальні руки експертів. Іншими словами, ця операція виконана під віддаленим контролем ЗМР [44]. Soulami et al. (2016) за методикою ЗМР наклали на монітор ангіографа зображення кальцинованого біопротеза аортального клапана (отримане за допомогою доопераційної КТ) і виконали ендovasкулярні протезування аортальних клапанів valve-in-valve [45].

Зображення для ПР/ЗМР можна отримати 3D-РКА завдяки швидкій ротації арки навколо пацієнта під час уведення контрасту. Отримане зображення камер серця, судин чи коронарних артерій фіксується і накладається у вигляді прозорого фону на екран. У такий спосіб робоча картина постійно наявна на моніторі без додаткових уведень контрастної рідини. Під час

наступних маніпуляцій це дає змогу провести катетер чи інший ендovasкулярний пристрій точніше, але з меншим опроміненням і контрастним навантаженням [3, 46]. У такий самий спосіб на картину ангіографії накладають черезстравохідну 3D-ЕхоКГ, дані якої в реальному часі постійно синхронізуються з рентгенологічною тінню серця, що допомагає імплантувати оклюдер у дефект міжпередсердної перегородки чи параклапанну норицю, встановити ендovasкулярний аортальний клапан або MitraClip [3, 47].

Обговорення. Візуалізаційні методи діагностики в кардіохірургії та інтервенційній кардіології є дуже важливими, а застосункам ПР, які створюються на їх основі, приділяється все більше уваги. Це пов'язано з тим, що сьогодні кардіохірурги та кардіологи приймають остаточне рішення про операцію лише на підставі цифрового зображення.

Серцево-судинна система є об'ємною, тоді як картини КТ, МРТ, ЕхоКГ, катетеризаційної ангіографії показані на плоскому екрані чи роздруковані на плівці і папері. Невідповідність між природною будовою і способом її відтворення є вагомою причиною, яка ускладнює сприйняття і вивчення нормальної структури, а також її аномалій. Навіть тривимірні реконструкції результатів томографії чи ультразвукового дослідження апарати показують в одній площині своїх моніторів. Через такі фізичні обмеження цінність 3D-реконструкцій зменшується і лікарі не завжди можуть використати їх переваги повною мірою [10, 15, 16].

Технології ПР зробили суттєвий поступ в останнє десятиліття і надали можливість побачити серце та судини стереоскопічно. Протягом останніх років апаратура для ПР стала значно меншою, зрозумілою в користуванні, зручною і доступною, що обумовило її впровадження у роботу багатьох лікарень та дослідних інститутів. Шоломи VR та смарт-окуляри дають змогу розглядати тонкощі будови серця та судин так, як до останнього часу було неможливо, а саме в стереоскопічному режимі. Тому хірурги та кардіологи вивчають будову серця більш глибоко на доопераційному етапі, а завдяки технологіям ПР/ЗМР ще й інтраопераційно. Виявлені перші клінічно значущі результати цих інновацій, а саме: зменшується тривалість операційного втручання, обирається більш точна тактика ще до втручання, а не вирішується в ході операції [8, 10, 27, 28].

Особливий інтерес викликає перенесення віртуальних зображень у 3D-принтер і створення фізичних моделей серця та судин. Віртуальні та надруковані на 3D-принтері моделі використовують як з діагностичною, так і з практичною метою, що дозволяє випробувати хірургічні та інтервенційні прийоми без ризиків нашкодити пацієнту, водночас маніпулюючи саме на тих аномаліях, які наявні у хворого. Доступні дані наводять на думку, що тренування операції на моделі

серця конкретного пацієнта зможе суттєво покращити навички хірургів та кардіологів і в такий спосіб позитивно вплинути на якість надання кардіохірургічної та інтервенційної допомоги.

Необхідно врахувати, що попри виявлені переваги, немає переконливих даних про те, що застосування PR суттєво знижує летальність у кардіохірургії та інтервенційній кардіології. Цьому може бути кілька пояснень. Кардіохірургічні клініки світу, які розвивають та впроваджують PR, переважно досягли низьких рівнів летальності багатьох нозологій ще в 90-х роках ХХ або нульових роках ХХІ століття, а тому групи порівняння в їх досвіді вже мають хороші показники. Крім того, ми спостерігаємо лише початок застосування PR, публікації досить різноманітні й охоплюють невеликі вибірки, а деколи обмежуються поодиноким повідомленням. Кількість досліджень стрімко зростає в останні роки, проте ще залишається недостатньою для проведення метааналізів.

Висновки. Застосунки PR надають кардіохірургам та інтервенційним кардіологам нові можливості для вирішення критичних проблем, що виникають під час коригуючих втручань на серці. До них належать стереоскопічна візуалізація ділянок виконання операції з оцінюванням технічної операбельності та обранням оптимального хірургічного прийому, забезпечення інтраопераційної навігації. Хірург отримав інноваційний засіб для покращення мануальних навичок – втручання можна виконати на віртуальній моделі чи манекені, що імітує анатомію певного пацієнта. Це покращує результати навчання молодих спеціалістів, оптимізує планування втручання, покращує загальний менеджмент, скорочує час операцій, зменшує ризик інтраопераційних помилок. Володіючи таким потенціалом для зменшення ризиків і покращення результатів, технології PR стають передумовою подальшого впровадження у практику високоспеціалізованої допомоги пацієнтам із серцево-судинною патологією. Технології PR можуть бути важливим компонентом при дистанційному супроводі складних втручань спеціалістами високої кваліфікації.

Конфлікт інтересів: немає.

Участь авторів: концепція, проєкт, збирання матеріалу – Віталій Петров, оформлення, редагування статті – Мар'яна Паньків.

Список використаних джерел

References

1. Goo HW, Park SJ, Yoo SJ. Advanced Medical Use of Three-Dimensional Imaging in Congenital Heart Disease: Augmented Reality, Mixed Reality, Virtual Reality, and Three-Dimensional Printing. *Korean J Radiol.* 2020;21(2):133-145. <https://doi.org/10.3348/kjr.2019.0625>
2. Narang A, Hitschrich N, Mor-Avi V, Schreckenber M, Schummers G, Tiemann K, et al. Virtual Reality Analysis of Three-Dimensional Echocardiographic and Cardiac Computed Tomographic Data Sets. *J Am Soc Echocardiogr.* 2020;33(11):1306-1315. <https://doi.org/10.1016/j.echo.2020.06.018>
3. Zablach JE, Morgan GJ. Innovations in Congenital Interventional Cardiology. *Pediatr Clin North Am.* 2020;67(5):973-993. <https://doi.org/10.1016/j.pcl.2020.06.012>
4. Kelly JW, Cherep LA, Siegel ZD. Perceived Space in the HTC Vive. *ACM Trans Appl Percept.* 2017;15(1):2. <https://doi.org/10.1145/3106155>
5. Laato S, Hyrnsalmi S, Rauti S, Islam AKMN, Laine TH. Location-based Games as Exergames - From Pokémon To The Wizarding World. *International Journal of Serious Games.* 2020;7(1):79-95. <https://doi.org/10.17083/ijsg.v7i1.337>
6. Gitlin JMG. This tech replaces a car's instrument panel with a holographic display [Internet]. *Ars Technica.* 2021 [cited 2023 May 13]. Available from: <https://arstechnica.com/cars/2021/01/ti-shows-a-holographic-instrument-display-for-car-windshields-at-ces/>
7. Statt N. Microsoft's HoloLens explained: How it works and why it's different [Internet]. *CNET.* 2015 [cited 23 May 13]. Available from: <https://www.cnet.com/tech/computing/microsoft-hololens-explained-how-it-works-and-why-its-different/>
8. Valverde I, Gomez-Ciriza G, Hussain T, Suarez-Mejias C, Velasco-Forte MN, Byrne N, et al. Three-dimensional printed models for surgical planning of complex congenital heart defects: an international multicentre study. *Eur J Cardiothorac Surg.* 2017;52(6):1139-1148. <https://doi.org/10.1093/ejcts/ezx208>
9. Gómez-Ciriza G, Gómez-Cía T, Rivas-González JA, Velasco Forte MN, Valverde I. Affordable Three-Dimensional Printed Heart Models. *Front Cardiovasc Med.* 2021;8:642011. <https://doi.org/10.3389/fcvm.2021.642011>
10. Tiwari N, Ramamurthy HR, Kumar V, Kumar A, Dhanalakshmi B, Kumar G. The role of three-dimensional printed cardiac models in the management of complex congenital heart diseases. *Med J Armed Forces India.* 2021;77(3):322-330. <https://doi.org/10.1016/j.mjafi.2021.01.019>
11. Mena KA, Urbain KP, Fahey KM, Bramlet MT. Exploration of time sequential, patient specific 3D heart unlocks clinical understanding. *3D Print Med.* 2018;4(1):15. <https://doi.org/10.1186/s41205-018-0034-7>
12. 3d.nih.gov [Internet]. U.S. Department of Health and Human Services - National Institutes of Health; 2021 [cited 23 May 23]. Available from: <https://3dprint.nih.gov/discover/congenital-heart-disease>
13. Ayerbe VMC, Morales MLV, Rojas CJL, Cortés MLA. Visualization of 3D Models Through Virtual Reality in the Planning of Congenital Cardiothoracic Anomalies Correction: An Initial Experience. *World J Pediatr Congenit Heart Surg.* 2020;11(5):627-629. <https://doi.org/10.1177/2150135120923618>
14. Mendez A, Hussain T, Hosseinpour AR, Valverde I. Virtual reality for preoperative planning in large ventricular septal defects. *Eur Heart J.* 2019;40(13):1092. <https://doi.org/10.1093/eurheartj/ehy685>
15. Pisowodzka IK, Gründeman PF, Meijboom F, van Aarnhem G, Meijer R, Cramer MJ, et al. Added Value of

- Interactive 3-D Stereo Vision Echocardiography in the Heart Valve Team: A Post Hoc Analysis for Optimal Decision Making in Patients With Mitral Valve Regurgitation. *Innovations (Phila)*. 2020;15(1):36-42. <https://doi.org/10.1177/1556984519887973>
16. Nanchahal S, Arjomandi Rad A, Naruka V, Chacko J, Liu G, Afoke J, et al. Mitral valve surgery assisted by virtual and augmented reality: Cardiac surgery at the front of innovation. *Perfusion*. 2022 Oct 30;2676591221137480. Epub 2022 Oct 30. <https://doi.org/10.1177/02676591221137480>
 17. Szugye NA, Lorts A, Zafar F, Taylor M, Morales DLS, Moore RA. Can virtual heart transplantation via 3-dimensional imaging increase the maximum acceptable donor size? *J Heart Lung Transplant*. 2019;38(3):331-333. <https://doi.org/10.1016/j.healun.2018.12.014>
 18. Neugebauer M, Tautz L, Hüllebrand M, Sündermann S, Degener F, Goubergrits L, et al. Virtual downsizing for decision support in mitral valve repair. *Int J Comput Assist Radiol Surg*. 2019;14(2):357-371. <https://doi.org/10.1007/s11548-018-1868-6>
 19. Tandon A, Burkhardt BEU, Batsis M, Zellers TM, Velasco Forte MN, Valverde I, et al. Sinus Venosus Defects: Anatomic Variants and Transcatheter Closure Feasibility Using Virtual Reality Planning. *JACC Cardiovasc Imaging*. 2019;12(5):921-924. <https://doi.org/10.1016/j.jcmg.2018.10.013>
 20. Nam HH, Herz C, Lasso A, Drouin S, Posada A, Morray B, et al. Simulation of Transcatheter Atrial and Ventricular Septal Defect Device Closure Within Three-Dimensional Echocardiography-Derived Heart Models On Screen and in Virtual Reality. *J Am Soc Echocardiogr*. 2020;33(5):641-644.e2. <https://doi.org/10.1016/j.echo.2020.01.011>
 21. Jolley MA, Lasso A, Nam HH, Dinh PV, Scanlan AB, Nguyen AV, et al. Toward predictive modeling of catheter-based pulmonary valve replacement into native right ventricular outflow tracts. *Catheter Cardiovasc Interv*. 2019;93(3):E143-E152. <https://doi.org/10.1002/ccd.27962>
 22. Brun H, Bugge RAB, Suther LKR, Birkeland S, Kumar R, Pelanis E, et al. Mixed reality holograms for heart surgery planning: first user experience in congenital heart disease. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging*. 2019;20(8):883-888. <https://doi.org/10.1093/ehjci/jey184>
 23. Gehrsitz P, Rompel O, Schöber M, Cesnjevar R, Purbojo A, Uder M, et al. Cinematic Rendering in Mixed-Reality Holograms: A New 3D Preoperative Planning Tool in Pediatric Heart Surgery. *Front Cardiovasc Med*. 2021;8:633611. <https://doi.org/10.3389/fcvm.2021.633611>
 24. Ye W, Zhang X, Li T, Luo C, Yang L. Mixed-reality hologram for diagnosis and surgical planning of double outlet of the right ventricle: a pilot study. *Clin Radiol*. 2021;76(3):237.e1-237.e7. <https://doi.org/10.1016/j.crad.2020.10.017>
 25. Cen J, Liufu R, Wen S, Qiu H, Liu X, Chen X, et al. Three-Dimensional Printing, Virtual Reality and Mixed Reality for Pulmonary Atresia: Early Surgical Outcomes Evaluation. *Heart Lung Circ*. 2021;30(2):296-302. <https://doi.org/10.1016/j.hlc.2020.03.017>
 26. Yoo S, Saprunguang A, Lam CZ, Anderson RH. Disharmonious Ventricular Relationship and Topology for the Given Atrioventricular Connections. *Contemporary Diagnostic Approach Using 3D Modeling and Printing. Congenital Heart Disease*. 2022;17(5):495-504. <https://doi.org/10.32604/chd.2022.021155>
 27. Biglino G, Capelli C, Leaver LK, Schievano S, Taylor AM, Wray J. Involving patients, families and medical staff in the evaluation of 3D printing models of congenital heart disease. *Commun Med*. 2015;12(2-3):157-169. <https://doi.org/10.1558/cam.28455>
 28. Jones TW, Seckeler MD. Use of 3D models of vascular rings and slings to improve resident education. *Congenit Heart Dis*. 2017;12(5):578-582. <https://doi.org/10.1111/chd.12486>
 29. Hussein N, Honjo O, Barron DJ, Haller C, Coles JG, Yoo SJ. The Incorporation of Hands-On Surgical Training in a Congenital Heart Surgery Training Curriculum. *Ann Thorac Surg*. 2021;112(5):1672-1680. <https://doi.org/10.1016/j.athoracsur.2020.11.018>
 30. Yamada T, Osaka M, Uchimuro T, Yoon R, Morikawa T, Sugimoto M, et al. Three-Dimensional Printing of Life-Like Models for Simulation and Training of Minimally Invasive Cardiac Surgery. *Innovations (Phila)*. 2017;12(6):459-465. <https://doi.org/10.1097/IMI.0000000000000423>
 31. Valdis M, Chu MW, Schlachta CM, Kiaii B. Validation of a Novel Virtual Reality Training Curriculum for Robotic Cardiac Surgery: A Randomized Trial. *Innovations (Phila)*. 2015;10(6):383-388. <https://doi.org/10.1097/IMI.0000000000000222>
 32. Rudarakanchana N, van Herzelee I, Desender L, Cheshire NJ. Virtual reality simulation for the optimization of endovascular procedures: current perspectives. *Vasc Health Risk Manag*. 2015;11:195-202. <https://doi.org/10.2147/VHRM.S46194>
 33. Jensen UJ, Jensen J, Ahlberg G, Tornvall P. Virtual reality training in coronary angiography and its transfer effect to real-life catheterisation lab. *EuroIntervention*. 2016;11(13):1503-1510. https://doi.org/10.4244/EIJY15M06_05
 34. Mafeld S, Nesbitt C, McCaslin J, Bagnall A, Davey P, Bose P, et al. Three-dimensional (3D) printed endovascular simulation models: a feasibility study. *Ann Transl Med*. 2017 Feb;5(3):42. <https://doi.org/10.21037/atm.2017.01.16>
 35. Levin D, Mackensen GB, Reisman M, McCabe JM, Dvir D, Ripley B. 3D Printing Applications for Transcatheter Aortic Valve Replacement. *Curr Cardiol Rep*. 2020 Feb;22(4):23. <https://doi.org/10.1007/s11886-020-1276-8>
 36. Valverde I, Gomez G, Coserria JF, Suarez-Mejias C, Uribe S, Sotelo J, et al. 3D printed models for planning endovascular stenting in transverse aortic arch hypoplasia. *Catheter Cardiovasc Interv*. 2015;85(6):1006-1012. <https://doi.org/10.1002/ccd.25810>
 37. Li H, Qingyao, Bingshen, Shu M, Lizhong, Wang X, et al. Application of 3D printing technology to left atrial appendage occlusion. *Int J Cardiol*. 2017;231:258-263. <https://doi.org/10.1016/j.ijcard.2017.01.031>
 38. Jalal Z, Seguela PE, Iriart X, Roubertie F, Quessard A, Kreitmann B, et al. Hybrid Melody Valve Implantation in Mitral Position in a Child: Usefulness of a 3-Dimensional Printed Model for Preprocedural Planning. *Can J Cardiol*. 2018;34(6):812.e5-812.e7. <https://doi.org/10.1016/j.cjca.2018.02.011>

39. Witowski J, Darocha S, Kownacki Ł, Pietrasik A, Pietura R, Banaszekiewicz M, et al. Augmented reality and three-dimensional printing in percutaneous interventions on pulmonary arteries. *Quant Imaging Med Surg.* 2019;9(1):23-29. <https://doi.org/10.21037/qims.2018.09.08>
40. Giugno L, Faccini A, Carminati M. Percutaneous Pulmonary Valve Implantation. *Korean Circ J.* 2020;50(4):302-316. <https://doi.org/10.4070/kcj.2019.0291>
41. Opolski MP, Schumacher SP, Verouden NJW, van Diemen PA, Borucki BA, Sprengers R, et al. On-Site Computed Tomography Versus Angiography Alone to Guide Coronary Stent Implantation: A Prospective Randomized Study. *J Invasive Cardiol.* 2020;32(11):E268-E276.
42. Kasprzak JD, Pawlowski J, Peruga JZ, Kaminski J, Lipiec P. First-in-man experience with real-time holographic mixed reality display of three-dimensional echocardiography during structural intervention: balloon mitral commissurotomy. *Eur Heart J.* 2020;41(6):801. <https://doi.org/10.1093/eurheartj/ehz127>
43. Zhu H, Li Y, Wang C, Li QY, Xu ZY, Li X, et al. A first attempt of inferior vena cava filter successfully guided by a mixed-reality system: a case report. *J Geriatr Cardiol.* 2019;16(7):575-577. <https://doi.org/10.11909/j.issn.1671-5411.2019.07.008>
44. Zhu H, Li Y, Gong G, Zhao MX, Liu L, Yao SY, et al. A world's first attempt of mixed-reality system guided inferior vena cava filter implantation under remote guidance of 5G communication. *J Geriatr Cardiol.* 2021;18(3):233-237. <https://doi.org/10.11909/j.issn.1671-5411.2021.03.008>
45. Belhaj Soulami R, Verhoye JP, Nguyen Duc H, Castro M, Auffret V, Anselmi A, et al. Computer-Assisted Transcatheter Heart Valve Implantation in Valve-in-Valve Procedures. *Innovations (Phila).* 2016;11(3):193-200. <https://doi.org/10.1097/IMI.0000000000000259>
46. Minderhoud SCS, van der Stelt F, Molenschot MMC, Koster MS, Krings GJ, Breur JMPJ. Dramatic Dose Reduction in Three-Dimensional Rotational Angiography After Implementation of a Simple Dose Reduction Protocol. *Pediatr Cardiol.* 2018;39(8):1635-1641. <https://doi.org/10.1007/s00246-018-1943-3>
47. Balzer J, Zeus T, Hellhammer K, Veulemans V, Eschenhagen S, Kehmeier E, et al. Initial clinical experience using the EchoNavigator®-system during structural heart disease interventions. *World J Cardiol.* 2015;7(9):562-570. <https://doi.org/10.4330/wjc.v7.i9.562>

Extended Reality Applications in Cardiac Surgery and Interventional Cardiology

Vitaliy F. Petrov¹, Mariana V. Pankiv²

¹Department of Surgery and Transplantology, Danylo Halytsky Lviv National Medical University, Lviv, Ukraine

²Department of Surgery, Andrei Krupynskyi Lviv Medical Academy, Lviv, Ukraine

Abstract. Extended reality combines the real and digital worlds. This technology has found applications in all fields of medicine, including cardiac surgery and interventional cardiology. The paper describes the application of three types of extended reality, namely virtual, augmented and mixed realities.

The aim. To explain the principles of operation of various types of extended reality using non-medical and medical applications as examples; to analyze the data from specialized publications in the field of cardiac interventions.

Materials. Articles from the Pubmed database.

Results. The article highlights important details of the heart and blood vessels image creation technique with which users operate. Primary data is obtained from imaging modalities like tomography or ultrasound, then it is segmented and processed for the virtual viewing. In virtual reality, three-dimensional (3D) images of the heart defects are analyzed in depth, and virtual manipulations can be performed that simulate the course of the operation. Virtual reality includes printing the heart on a 3D printer with subsequent executions on physical models, both diagnostic dissections and therapeutic surgical or endovascular simulations. In augmented reality, the created image of the internal anatomy of the defect is present near the surgeon, without interfering medical manipulations. In mixed reality, a virtual image is superimposed on the patient's body, creating a detailed navigation map.

Conclusions. Extended reality application deepens the understanding of anatomy due to stereoscopic visualization of the structure of the heart and blood vessels. Creating a model of a patient's heart defect and simulating an operation on it shortens the "learning curve", improves the professional skills of surgeons and cardiologists, and also allows for surgical and endovascular interventions individualization. Planning interventions in cardiac surgery and interventional cardiology with extended reality technologies influences decision-making and reduces the duration of operations.

Keywords: *virtual reality, augmented reality, mixed reality, 3D printing, heart segmentation.*

Стаття надійшла в редакцію / Received: 04.04.2023

Після доопрацювання / Revised: 10.05.2023

Прийнято до друку / Accepted: 16.06.2023