БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

БР.ІП – 88.00.00.000 ІПЗ

Група ІП-22-3

Якимів Тетяна

2026

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Факультет інформаційних технологій

Кафедра інженерії програмного забезпечення

Якимів Тетяна Василівна

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 004.942
(індекс)

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

Програмування систем доповненої реальності для навчання хірургії та робототехніки

(назва роботи)

Інженерія програмного забезпечення

(назва освітньої програми)

121 - Інженерія програмного забезпечення

(шифр і назва спеціальності)

Робота містить результати власних досліджень, використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело:

Здобувач освітнього ступеня _____Якимів Т.В._____
(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник ____Ваврик Тетяна Олександрівна, асистент
(підпис, прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання керівника)

Допущено до захисту
Завідувач кафедри

_доц._____Бандура В.В.__
(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Івано-Франківськ – 2026

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Інститут, факультет інформаційних технологій

Кафедра інженерії програмного забезпечення

Ступінь вищої освіти бакалавр

Спеціальність 121 – Інженерія програмного забезпечення

ЗАТВЕРДЖУЮ:
Зав. кафедрою **ІПЗ**
доцент. В.В. Бандура
“ ____ ” _____2026 р.

ЗАВДАННЯ
НА БАКАЛАВРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ

Якимів Тетяна Василівна

(прізвище, ім’я, по-батькові)

1. Тема проекту (роботи) "Програмування систем доповненої реальності для навчання хірургії та робототехніки"

керівник проекту (роботи) Ваврик Тетяна Олександрівна, асистент.

затверджені наказом вищого навчального закладу від “ 21 ” квітня 2026 р. № 179/7

2. Строк подання студентом проекту (роботи) 10 червня 2026 р.

3. Вихідні дані до проекту (роботи) Результати і матеріали отримані під час проходження переддипломної практики

4. Зміст розрахунково - пояснювальної записки(перелік питань, які потрібно розробити)

1. Аналіз вимог до програмного забезпечення
2. Аналіз вимог і постановка задачі
3. Проектування системи
4. Реалізація проекту
5. Тестування та впровадження

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов’язкових креслень)

1 Результати систематичного огляду у форматі блок-схеми PRISMA (рис. 1.1, ст. 20)

2 Хірургічний симулятор віртуальної реальності під час моделювання розрізання верхньої щелепи (рис. 1.4, ст. 26)

3 Розподіл проаналізованих робіт за типом їх використання (рис. 2.1, ст. 34)

4 КТ-скани легені з відповідною 3D-реконструкцією (рис. 3.1, ст. 70)

5 КТ-скани легені з відповідною 3D-реконструкцією (рис. 3.4, ст. 85)

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв

2. Дата видачі завдання **2026 р.**

Керівник _____
(підпис)

Завдання прийняв до виконання_____ _____
(підпис)

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту	Примітка
1	Визначення та обгрунтування теми роботи	17.01.2026	виконано
2	Огляд існуючих концепцій, рішень та сервісів в даній області	21.02.2026	виконано
3	Побудова моделі або алгоритму власного рішення	01.03.2026	виконано
4	Документування реалізації власного оригінального рішення вибраними засобами	21.04.2026	виконано
5	Оформлення пояснювальної записки бакалаврської роботи	02.05.2026	виконано

Студент _____ Якимів Т.В.
(підпис)

Керівник роботи _____Ваврик Т.О.
(підпис)

АНОТАЦІЯ

Бакалаврська робота містить 103 сторінок, 9 рисунків, 2 таблиці, список використаних джерел із 40 найменувань.

Метою роботи є дослідження принципів програмування систем доповненої реальності для навчання хірургії та робототехніки.

Об'єкт дослідження: системи доповненої реальності у сфері медичної освіти та робототехніки.

Предмет дослідження: технології, методи та програмні засоби розробки AR-систем для навчання хірургії, візуалізації медичних даних і взаємодії з роботизованими комплексами.

Результати дослідження: проведено аналіз технологій доповненої та віртуальної реальності у медичній освіті, досліджено методи інтеграції AR із роботизованими хірургічними системами.

У першому розділі розглянуто теоретичні основи доповненої реальності, принципи функціонування AR-систем та сфери їх застосування.

У другому розділі досліджено методи та інструменти розробки AR-систем для ендоскопічних, малоінвазивних і роботизованих хірургічних процедур, а також технології інтеграції клінічних даних у AR-середовище.

У третьому розділі розглянуто розробку та інтеграцію AR-платформи, апаратні компоненти, методи оцінювання ефективності та особливості програмної реалізації систем для навчання хірургії.

Висновок: використання систем доповненої реальності у навчанні хірургії та робототехніки дозволяє підвищити якість підготовки спеціалістів, покращити візуалізацію медичних процесів, забезпечити інтерактивність навчання та підвищити точність виконання хірургічних процедур.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ДОПОВНЕНА РЕАЛЬНІСТЬ, AR, ВІРТУАЛЬНА РЕАЛЬНІСТЬ, ХІРУРГІЯ, РОБОТОТЕХНІКА, МЕДИЧНІ СИМУЛЯТОРИ, ЕНДОСКОПІЧНІ СИСТЕМИ, ВІЗУАЛІЗАЦІЯ, AR-ПЛАТФОРМИ, ІНТЕРАКТИВНЕ НАВЧАННЯ.

ANNOTATION

Bachelor's thesis of 103 pages, 9 figures, 2 tables, and a reference list containing 40 sources.

The aim of the work is to study the principles of programming augmented reality systems for surgical and robotics training.

Research object: augmented reality systems in the field of medical education and robotics.

Research subject: technologies, methods, and software tools for developing AR systems for surgical training, medical data visualization, and interaction with robotic systems.

Research results: an analysis of augmented and virtual reality technologies in medical education was conducted, methods of integrating AR with robotic surgical systems were investigated.

The first section describes the theoretical foundations of augmented reality, the operating principles of AR systems, and their application in surgical and robotics training.

The second section analyzes methods and tools for developing AR systems for endoscopic, minimally invasive, and robotic surgical procedures, as well as technologies for integrating clinical data into AR environments.

The third section covers the development and integration of an AR platform, hardware components, evaluation methods, and software implementation features of systems for surgical training.

Conclusion: the use of augmented reality systems in surgical and robotics training improves the quality of specialist education, enhances medical process visualization, provides interactive learning capabilities, and increases the accuracy of surgical procedures.

KEY WORDS: AUGMENTED REALITY, AR, VIRTUAL REALITY, SURGERY, ROBOTICS, MEDICAL SIMULATORS, ENDOSCOPIC SYSTEMS, VISUALIZATION, AR PLATFORMS, INTERACTIVE LEARNING.

ЗМІСТ

ВСТУП 8

РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПРОГРАМУВАННЯ СИСТЕМ ДОПОВНЕНОЇ РЕАЛЬНОСТІ ДЛЯ НАВЧАННЯ ХІРУРГІЇ ТА РОБОТОТЕХНІКИ 11

1.1 Основи технологій доповненої реальності та їх застосування в медичній освіті 11

1.2 Класифікація та моделі взаємодії систем AR і роботизованих хірургічних комплексів 19

1.3 Віртуальна та доповнена реальність у симуляційному навчанні хірургії ... 23

1.4 Висновки по розділу 31

РОЗДІЛ 2. МЕТОДИ ТА ІНСТРУМЕНТИ РОЗРОБКИ AR-СИСТЕМ ДЛЯ ХІРУРГІЧНОГО НАВЧАННЯ ТА РОБОТОТЕХНІКИ 32

2.1 Методи реалізації AR-систем для ендоскопічних та малоінвазивних процедур 32

2.2 Програмні рішення для хірургічних і спеціалізованих роботизованих систем 50

2.3 Технології візуалізації, діагностики та інтеграції клінічних даних у AR-середовищі 57

2.4 Висновки по розділу 62

РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА, ІНТЕГРАЦІЯ ТА ОЦІНЮВАННЯ AR-СИСТЕМИ ДЛЯ НАВЧАННЯ ХІРУРГІЇ 63

3.1 Методи та метрики оцінювання ефективності AR-систем 63

3.2 Апаратне забезпечення та сенсорні компоненти AR-комплексів 67

3.3 Інтеграція програмного забезпечення та реалізація AR-платформи для навчання хірургії 80

3.4 Висновки по розділу 102

ВИСНОВКИ 103

СПИСОК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА 105

ВСТУП

У сучасному світі технології доповненої та віртуальної реальності відіграють важливу роль у розвитку освітніх, медичних і робототехнічних систем. Стрімкий розвиток інформаційних технологій, комп'ютерної графіки, сенсорних пристроїв і систем штучного інтелекту відкриває нові можливості для створення інтерактивних навчальних середовищ. Особливо актуальним є застосування систем доповненої реальності у сфері хірургії та робототехніки, де точність, швидкість прийняття рішень і безпечне відпрацювання практичних навичок мають критичне значення. Використання AR-технологій дозволяє створювати реалістичні симуляції хірургічних процедур, інтегрувати медичні дані у віртуальне середовище та забезпечувати взаємодію з роботизованими комплексами у режимі реального часу.

Актуальність теми зумовлена необхідністю підвищення ефективності навчання хірургів та спеціалістів у галузі робототехніки за допомогою сучасних інтерактивних технологій. Традиційні методи навчання часто потребують значних матеріальних ресурсів, що супроводжується високими ризиками та обмеженими можливостями для повторного відпрацювання складних процедур. Системи доповненої реальності дозволяють створити безпечне середовище для навчання, забезпечити візуалізацію анатомічних структур, моделювання хірургічних втручань і підтримку інтерактивної взаємодії між користувачем та роботизованими системами. Крім того, розвиток медичної робототехніки потребує інтеграції програмних рішень, здатних забезпечити точне позиціонування, візуальний супровід та аналіз даних у режимі реального часу.

Метою роботи є дослідження принципів програмування систем доповненої реальності для навчання хірургії та робототехніки, аналіз сучасних технологій створення AR-середовищ, а також розробка підходів до інтеграції програмних і апаратних компонентів у медичних навчальних системах.

Завданнями дослідження є аналіз предметної області та існуючих рішень у сфері AR-технологій для медичної освіти та робототехніки,

дослідження принципів функціонування систем доповненої та віртуальної реальності, визначення методів інтеграції AR із роботизованими хірургічними комплексами, аналіз апаратних компонентів і програмних платформ, дослідження методів оцінювання ефективності AR-систем, а також формулювання висновків щодо перспектив використання таких технологій у навчальному процесі.

Об’єктом дослідження є процеси розробки та інтеграції систем доповненої реальності для навчання хірургії та робототехніки, що включають проектування програмного забезпечення, обробку візуальних даних, інтеграцію апаратних компонентів і взаємодію з роботизованими системами.

Предметом дослідження є методи, технології та програмні засоби створення AR-систем для медичного навчання, зокрема технології комп’ютерного зору, тривимірної візуалізації, інтерактивної взаємодії, сенсорного відстеження руху та інтеграції з роботизованими комплексами.

Методи дослідження включають аналіз наукових джерел для вивчення сучасних підходів до створення AR-систем, порівняльний аналіз технологій доповненої та віртуальної реальності, моделювання архітектури програмних комплексів, експериментальні методи для оцінювання ефективності систем, а також методи інтеграції програмного забезпечення з апаратними компонентами.

У роботі розглядатимуться технології створення AR-середовищ для навчання хірургічних процедур, методи візуалізації медичних даних, інтеграція з ендоскопічними та роботизованими системами, а також підходи до оцінювання ефективності використання доповненої реальності у медичній освіті. Особлива увага приділятиметься питанням точності відображення даних, інтерактивності навчального процесу, масштабованості програмного забезпечення та можливостям використання AR-технологій у симуляційному навчанні.

Бакалаврська робота містить 103 сторінок, 9 рисунків, 2 таблиці, 3 розділи, список використаних джерел із 40 найменувань.

РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПРОГРАМУВАННЯ СИСТЕМ ДОПОВНЕНОЇ РЕАЛЬНОСТІ ДЛЯ НАВЧАННЯ ХІРУРГІЇ ТА РОБОТОТЕХНІКИ

1.1 Основи технологій доповненої реальності та їх застосування в медичній освіті

Динамічний характер багатьох хірургічних процедур вимагає ретельного оцінювання, професійних знань та високого рівня уваги. У моделі стажування хірурги отримують широку та широку освіту під керівництвом досвідченого хірурга, щоб опанувати ці навички. Однак модель стажування, яка є золотим стандартом для навчання хірургічних резидентів, застаріла з кількох причин, включаючи вплив на комфорт пацієнта, тривалість процедури, час та вартість операції, а також можливість ускладнень [1]. Крім того, хірургічним резидентам потрібно більше часу для навчання, щоб опанувати дедалі складніші хірургічні навички, такі як малоінвазивна хірургія. Можливістю подолати ці перешкоди є включення хірургічних симуляторів, наприклад, на основі віртуальної реальності, до навчальних програм резидентів, оскільки це забезпечує їм більшу гнучкість та практику без нагляду досвідченого хірурга. Додаткові переваги включають можливість відмови в будь-який момент часу без наслідків, об'єктивну оцінку ефективності, створення незвичайних хірургічних процедур та повторну практику. Симулятори дозволяють стажерам більш послідовно розвивати свої навички з індивідуально підібраною швидкістю, що не обов'язково було б можливо з реальним пацієнтом.

Крім того, симулятори також корисні для навчання експертів новим методам. Зрештою, симулятори також можуть допомогти розвинути нетехнічні компетенції, включаючи командну роботу та комунікацію. За останні роки галузь хірургічного симуляції досягла значного прогресу. Сьогодні розроблені не лише хірургічні симулятори VR, але й хірургічні симулятори на основі AR та MR. Складні методи та алгоритми дозволили хірургам проводити правильні хірургічні процедури, внутрішньоопераційний контроль та післяопераційне

відстеження. AR корисна для передопераційної хірургічної підготовки, забезпечуючи корисні прогнози результатів та внутрішньооперацийну навігацію для мінімізації можливих ризиків. MR дозволила зробити тривимірні (3D) зображення більш повними та точними, тим самим покращуючи хірургічну навігацію та попередню обробку. Література показує, що технології VR, AR та MR використовувалися в хірургічних робочих процесах. Однак для хірургічного планування та внутрішньооперацийного керівництва існує чітка перевага на користь AR та MR. З іншого боку, VR використовується завдяки своєму захопливому характеру і тому більше підходить для навчальних цілей. Зв'язок між VR, AR та MR полягає в тому, що всі три технології спираються на використання віртуальних даних для зміни фізичного світу навколо користувача [2]. Технологія доповненої реальності (AR) змінює фізичний світ, накладаючи інформацію на фізичний світ. Технологія магнітно-резонансної томографії (MR) закріплює віртуальні дані у фізичному світі. Зрештою, віртуальна реальність (VR) замінює фізичний світ цілим віртуальним світом. Мета цього огляду - надати огляд основних ключових технологій та виділити застосування VR, доповненої реальності (AR) та магнітно-резонансної томографії (MR), що поширюються на різні форми хірургії, оскільки поточні огляди зосереджені виключно на одній конкретній хірургічній дисципліні. Ключові технології, описані для VR, доповненої реальності (AR) та магнітно-резонансної томографії (MR), є сучасними стандартами щодо візуального рендерингу, тактильного рендерингу, відстеження та реєстрації зображень. Однак може існувати кілька конкуруючих ключових технологій, таких як оптичне та електромагнітне відстеження для доповненої реальності (AR). Одна технологія не просто краща за іншу, оскільки кожна технологія має різні сильні та слабкі сторони. Вибір того, яку технологію застосовувати, залежить від сфери застосування.

Протягом останніх кількох десятиліть дослідники в академічній спільноті досягли значного прогресу в продуктивності роботизованих платформ, причому розгортання таких роботів стрімко зросло на тлі пандемії COVID-19. Дослідження показують, що висока ймовірність повторного спалаху випадків COVID-19 вимагає економічно ефективних та саморозгортаючихся роботів

телеприсутності для забезпечення контролю патогенів у всьому світі [1]. За даними, обсяг ринку медичних роботів у 2022 році перевищив 9 мільярдів, що більш ніж удвічі перевищує поточну кількість парку порівняно зі значеннями у 2019 році. Сьогодні роботизовані платформи, такі як робот Davinci, значно покращили спосіб, яким хірурги виконують складні втручання, зменшуючи потребу в повторній госпіталізації пацієнтів завдяки своїй мінімально інвазивній природі. Новітні хірургічні роботи сьогодні є найбільш затребуваним підходом до виконання повторюваних завдань з високою точністю. Технологія візуалізації суттєво змінила світ роботизованої хірургії, особливо коли йдеться про біопсії, дослідження складних судин для катетеризації та візуальну оцінку цільових точок для розміщення портів. Існує велика потреба в аналізі зображень комп'ютерної томографії та рентгенівських знімків для визначення правильного положення анатомічного орієнтира, такого як пухлина чи поліп. Ця інформація є основою більшості систем доповненої реальності, розробка яких починається з реконструкції та локалізації цілей. Отже, основна роль застосувань доповненої реальності (AR) у хірургії полягає у візуалізації та наведенні користувача до бажаної конфігурації робота за допомогою інтелектуального комп'ютера алгоритми зору [3].

Застосування таких передових роботизованих технологій залишається різноманітним у різних секторах, від виконання військових чи виробничих завдань до повітряних чи підводних операцій, завдяки їхній спритності, простоті експлуатації, високій адаптивності та багатофункціональності. Широкий попит на доповнену реальність (AR) у хірургії є стимулом для нашої роботи, з основною увагою до проблем, що виникають під час їх впровадження в існуючій літературі, а також до запропонованих нами рішень для протидії цим проблемам, з акцентом на точності розміщення кінцевого ефектора та зворотному зв'язку від систем керування. Галузь хірургії зазнала квантового стрибка в еволюції процедурної ергономіки та рівня автономності роботів під час втручання. З моменту успішного використання першої роботизованої хірургії для лікування неврологічних пухлин за допомогою промислового робота-поворотника під назвою PUMA 200 у 1985 році [3], вчені в усьому світі виявили необхідність

підвищення точності позиціонування та орієнтації роботизованої руки, щоб звільнити хірургів від довгих годин роботи в операційних. Від роботизованої руки AESOP, створеної компанією Computer Motion для лапароскопічного позиціонування камери в 1993 році, до системи DaVinci, дозволеної до використання в 2000 році для незліченних сегментектомій різних органів, кожна платформа була вдосконалена з точки зору апаратних та програмних функцій, що дозволило хірургам отримати 3D-візуалізацію внутрішньої анатомії через прозорий дисплей. З цієї еволюційної ієрархії вчені розглядають використання доповненої реальності (AR) як благословення в хірургічному середовищі, зменшуючи когнітивне навантаження хірурга під час виконання складних операцій, таких як кардіоторакальні, колоректальні, операції на голові та шиї, а також урологічні резекції.

Співпраця між AR та RAS є проривом у світі малоінвазивних роботизованих хірургій, а найперші публікації про цей принцип датуються 2000-ми роками. Зовсім недавно в ЗМІ стартап у сфері охорони здоров'я Novarad представив систему хірургічної навігації на основі AR під назвою VisAR, яка працює на основі віртуальної суперпозиції органів з субміліметровою точністю [4]. Різні інші стартапи, також наголосили на важливості AR для хірургічного керівництва завдяки своїй масштабній роботі з віртуального «втручання» та доповненої візуалізації операцій кінцевого ефектора. Ці платформи стимулюють виробників хірургічних роботів інтегрувати подібні пакети програмного забезпечення для спільної роботи у свої системи керування, щоб уникнути ризику тремору рук, покращити синергію в розміщенні руки людини та робота та забезпечити телеприсутність через мікрофонний зв'язок протягом усієї процедури. Цей тип співпраці залишається на ранніх пілотних стадіях, хоча він набуває дедалі більшої актуальності для усунення прогалин у безконтактній хірургії в періоди до та після пандемії [5].

Хоча більшість передових роботів виконують попередньо запрограмовані повторювані завдання з мінімальним навчанням штучного інтелекту (ШІ), існуючі хірургічні роботи з додатковими візуальними, нюховими та тактильними модальностями доводять, що вони розширюють взаємодію людини з роботом і,

отже, покращують загальну продуктивність системи. У цій роботі ми оцінюємо типи хірургічних сценаріїв, що включають технологію доповненої реальності (AR), відповідні їм стратегії навігації та методи DL, що використовуються в їхній роботі. Ми також зосереджуємося на виявленні лазівок в існуючій літературі, що стосуються рівнів автономності (LoA) в хірургічній RAS, точності продуктивності GPU, універсальності експерименту та клінічної оцінки, серед іншого. У традиційній ієрархії роботів, структура рівня автономності (LoA) дозволяє дослідникам адаптувати систему керування до нерівностей місцевості та використовувати вимоги до сили для більш ефективної кінематики робота. Використовуючи таку класифікацію роботів, дослідники з усієї академічної спільноти досліджували можливості вдосконалення систем керування хірургічними роботами за допомогою нових візуальних модальностей для кращої ефективності роботи в рамках прийнятих медичних стандартів [6]. Роботи нижчого рівня використовуються для виконання призначених завдань у визначеному обсязі, що вимагає керівництва хірурга та попереднього програмування без або з обмеженою зовнішньою підтримкою, такою як активні обмеження для навігації користувача або віртуальні прилади для покращення візуалізації навколишньої анатомії користувачем. У вищих рівнях розроблено більш комплексні системи для різної хірургічної складності, які враховують навколишнє середовище та виконують когнітивне прийняття рішень , адаптуючись до зовнішніх змін стимулів. Такі системи можуть надавати певні можливості інтерфейсу людина-робот, щоб звільнити хірурга від певних обов'язків під час перемикання від оператора до робота на час виконання завдання. Певною мірою слід зазначити, що алгоритмічні підходи включені в кожен LoA (рівень 0 має певний ступінь фільтрації тремору та роздільну здатність надлишкового навантаження), але здебільшого платформи вищого рівня здатні виконувати передопераційне планування та розробляти інтервенційний алгоритм, що дозволяє повністю контролювати операцію під наглядом хірурга.

Поточні знання про платформи XR, AR та VR

Загальний термін для платформ, що використовуються для захопливої візуалізації, взаємодії, моделювання та покращеного сприйняття користувачем сценаріїв, називається розширеною реальністю (XR). Системи AR довели свою ефективність як незамінне середовище для взаємодії людини із зовнішнім - віртуальним світом, долаючи розрив між необхідним завданням та допоміжними інструментами завдяки відкритому дисплею користувача. AR забезпечує - занурення користувача, доповнюючи поле зору реального світу комп'ютеризованими даними, такими як графіка та аудіовізуальний контент, а також іншими методами сенсорного підкріплення. У роботах використовується кілька інтерфейсів, таких як дисплеї, що кріпляться на голові, розумні окуляри, та портативні пристрої, такі як смартфони та проектори [7]. HoloLens порівнюють з персональною обчислювальною системою, розробленою з оптичним механізмом прозорості: віртуальні дані проектуються на напівпрозорий екран у полі зору користувача (FoV), зберігаючи при цьому реальний світ на задньому плані; Це дозволяє миттєво синхронізувати пропріоцептивні стимули, а також повну ситуаційну обізнаність. Завдяки високій роздільній здатності зображення, хоча й з неоптимальною просторовою когерентністю, пристрій підходить для різних секторів, таких як ігри, виробництво та хірургія. Він оснащений датчиками відстеження, датчиками оцінки пози, датчиками 3D-координатного картування, камерами для вимірювання навколишнього середовища, динаміками, інерційними вимірювальними блоками (IMU) та голографічними блоками обробки. Іншими словами, AR-модель для хірургії – це революційна платформа, спрямована на створення та відображення цифрової інформації в режимі реального часу, переважно накладеної на фактичний орган. Три основні компоненти цієї моделі включають фізичний об'єкт, такий як щипці або захвати, що використовуються як прототип для віртуального проектування та інтерпретації; датчики, керовані алгоритмом машинного навчання, з камерами для візуального зображення вихідних зображень; та програмне забезпечення для моделювання, яке обробляє вхідні сигнали з камер [8].

З іншого боку, віртуальна реальність (VR) створює комп'ютерно-

генеровану сцену для повного занурення, таким чином, що користувач може переживати реальні сцени у повністю віртуальному середовищі. Система допоміжних пристроїв для створення віртуального світу складається з джойстиків, контролерів або трекпадів для навігації; пристроїв відстеження голови для оцінки пози; та мікрофонів для розпізнавання голосу. VR-гарнітури, такі як Oculus Rift та Oculus Quest [9], як правило, розмивають реальне середовище користувача та створюють повністю захопливий віртуальний сценарій, керований стереоскопічною бінокулярною системою. Потім віртуальний сценарій розробляється для користувача шляхом проектування різних 2D-зображень на кожне око з різними перспективами та полями зору (FoV) від 90° до 210° та швидкістю 90 кадрів на секунду, для покращеного захопливого досвіду [10]. Оцінка пози VR в хірургічних умовах включає використання клінічно отриманих наборів даних зображень, які реконструюються у зручному робочому просторі з геометричними площинами x, y та z. Це дозволяє відстежувати рух за допомогою опорних точок, зареєстрованих на певних координатних площинах, які були виділені з реконструйованого віртуального сценарію та замінені в точних позиціях після видалення фону [11].

Визначення та сфера застосування доповненої реальності в хірургії

З моменту своєї появи у науковому світі у 2000-х роках, доповнена реальність (AR) у хірургії розвивалася стрімкими темпами, хоча багато хто критикував її через важкі портативні пристрої, обмежений сенсорний вхід та неефективну реєстрацію об'єктів у реальному часі через деформацію тканин [12]. Нова ера доповненої реальності (AR) у сприянні розвитку спінальної хірургії (RSA) стала стрибком у прийнятті рішень на основі комп'ютерного зору, що доводить її ефективність у таких галузях, як, але не обмежуючись, машинобудування, виробництво, хірургія та освіта. Дотримуючись підходу Халстеда до навчання «побач одне, зроби одне, навчи одного», вчений може спостерігати за виконанням певного завдання за допомогою пристрою доповненої візуалізації, практикувати це завдання кілька разів, доки не буде досягнуто майстерності, і зрештою продемонструвати цю концепцію стажерам

[13]. Щоб надати точне уявлення про роль доповненої реальності, ми зібрали та розглянули визначення, що доповнена реальність (AR) визначається як «посилення природного зворотного зв'язку, такого як візуальний, тактильний та нюховий зворотний зв'язок до хірурга за допомогою опорних сигналів». Ми вирішили дотримуватися цього визначення та класифікувати існуючі літературні статті в нашому метааналізі відповідно до цього принципу, виключаючи статті VR та AV, а також візуалізацію медичних зображень пліч-о-пліч під час хірургічної процедури без суперпозиції або вирівнювання віртуальних та реальних інструментів.

Незважаючи на поширеність технологій доповненої реальності (AR) у кількох секторах, існує значний розрив у їхній продуктивності в обробці крос-модальностей під час хірургічних маніпуляцій, що може призвести до помилок та неточностей таргетування, таких як хибнонегативні результати. Ця робота має на меті провести систематичний огляд різних типів сучасних хірургічних роботизованих платформ, одночасно визначаючи області для технологічного вдосконалення. Ми пов'язуємо специфічні функції керування, такі як тактильний зворотний зв'язок, сенсорні стимули та співпраця людини і робота, з технологією доповненої реальності для виконання складних хірургічних втручань з метою покращення сприйняття користувачем доповненого світу. Сучасні дослідники в цій галузі вже давно стикаються з численними проблемами, пов'язаними з низькою точністю розміщення інструментів навколо складних траєкторій, оцінкою пози та труднощами сприйняття глибини під час двовимірної медичної візуалізації. Безліч роботів, описаних у цьому огляді, таких як Novarad та SpineAssist, аналізуються з точки зору їх апаратних характеристик, систем комп'ютерного зору (таких як алгоритми глибокого навчання) та клінічної актуальності літератури. Ми намагаємося окреслити недоліки сучасних алгоритмів оптимізації для хірургічних роботів (таких як YOLO та LTSM), водночас пропонуючи рішення для пом'якшення цих недоліків у сфері виявлення внутрішніх зіткнень інструментів з органами та реконструкції зображень. Робота пропонує дослідникам можливість вивчити можливості адаптації доповненої

реальності (AR) до ранньої асистованої системи (RAS) для навігації та керування хірургічними інструментами в різних анатомічних середовищах.

Структура цієї роботи така: представлені дані, зібрані під час огляду літератури, включаючи комерційні роботизовані платформи, системи перевірки концепції, їхні принципи роботи та відповідні інтерфейси «людина-робот» з доповненою реальністю. Описано принципи роботи пристроїв доповненої реальності (AR) та категорії апаратних пристроїв, що використовуються відповідно до AR-систем для точної візуалізації. Наголошується на програмній реалізації в цих AR-моделях, а також на відповідних отриманих вхідних та вихідних даних. Представлено нову платформу DL, яка використовується для виявлення об'єктів, планування шляхів та аналізу даних наборів медичних зображень. Робота відкриває простір для обговорення різних проблем, з якими стикається робототехнічна платформа під час взаємодії з технологією доповненої реальності, таких як ризики зіткнень, обмеження співпраці та розбіжності в траєкторіях, а також деякі рішення для боротьби з цими проблемами [14].

1.2 Класифікація та моделі взаємодії систем AR і роботизованих хірургічних комплексів

Ми розпочали наш пошук зі статей, отриманих з кількох рецензованих баз даних, таких як IEEExplore, Google Scholar, SCOPUS та PubMed, щоб провести ретельний початковий пошук літератури (Рисунок 1.1). Ми зосередилися на статтях, опублікованих з останнього десятиліття до березня 2023 року, завдяки швидкому розвитку технологій доповненої реальності, який ознаменувався новаторським випуском Microsoft HoloLens у 2016 році [15]. Ключовими пошуковими термінами, що використовувалися для сортування статей з цих баз даних, були назва та анотація, такі як «Доповнена реальність» ТА «Роботи» ТА «Хірургія» АБО «Хірургічний робот» АБО «Хірургічна робототехніка» АБО «Хірургічна навігація» АБО «Роботизована» АБО «Малоінвазивна хірургія». Зрештою, було проведено методологічну сегрегацію статей, розділивши їх на

кластери відповідно до структури ATRA у [16]. Потім їх було розділено на різні групи, такі як «Програмні засоби для хірургічних застосувань», «Специфікації обладнання » та «Алгоритми DL» (див. рис. 1.2) , що призвело до загальної кількості 425 статей у SCOPUS та 200 статей у PubMed, за винятком статей, які не були релевантними до нашого огляду, дублюваних або опублікованих неанглійськими мовами. Враховуючи той факт, що розглянуті статті були опубліковані протягом останніх 20 років, у літературі щодо високорівневого застосування доповненої реальності (AR) та штучного інтелекту (AI) для роботів у хірургії існував значний прогалину. Кількість статей, опублікованих про хірургічних роботів на основі доповненої реальності (AR) до 2013 року, становила менше 20 на рік, а накопичена кількість опублікованих статей була меншою за 500. Огляд літератури, проведений у 2023 році, показав найбільше зростання кількості статей.

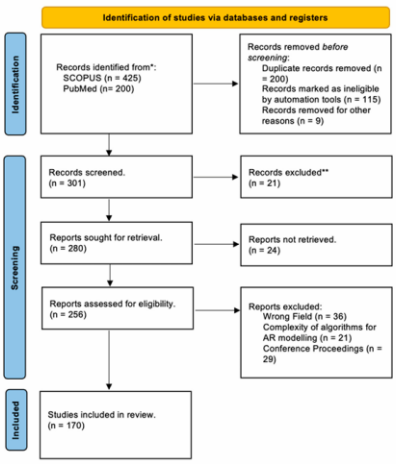

Рисунок 1.1 - Результати систематичного огляду у форматі блок-схеми PRISMA

Перелічені вище методи пройшли детальний огляд серед великої кількості рецензованих публікацій, в якому були проаналізовані переваги та недоліки доступних роботизованих систем, їх функції керування на основі доповненої реальності та обчислювальні алгоритми [17]. Були розглянуті такі параметри, як 3D-реконструкція зображень, типи апаратних функцій та потенційні прогалини, виявлені в клінічній оцінці та плануванні шляху. Деякі

автори зосередилися на управлінні та навігації за допомогою зображень з використанням інтелектуальних прогностичних систем, тоді як інші вивчали орієнтацію та позиціонування роботів у доповненому вигляді, від генерації сітки хмар точок до різних алгоритмічних підходів.

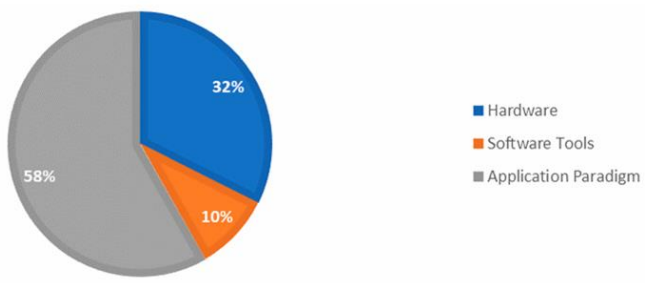

Рисунок 1.2 - Кругова діаграма, що показує розподіл та таксономію знайдених статей з літератури.

У центрі нашої роботи залишається зростаючий попит на візуалізацію в хірургічній робототехніці, особливо в передопераційних сценаріях, для пацієнта блакитного кольору, починаючи з процесу виявлення об'єктів, орієнтирів, що представляють інтерес, за межами видимої поверхні, та шляхом об'єднання передопераційних та реальних зображень. Сьогодні більше, ніж будь-коли, рекомендується впровадження AR-пристроїв у хірургії, що випливає з очікуваного зростання ринкового попиту щонайменше на 18,02% до кінця 2023 року. Найпоширеніші області Роботизована хірургія, що використовує доповнену реальність (AR), наразі включає нейрохірургію, кардіоторакальні дослідження, ортопедію, шлунково-кишковий тракт та ЛОР-хірургію, серед інших [20]. Наприклад, хірург може використовувати передопераційні зображення з медичної бази даних пацієнта, щоб знайти ракову пухлину та спроектувати цю реконструкцію на реальну анатомію, щоб допомогти собі знайти її точне положення. Для отримання додаткової інформації про типи виконаних роботизованих операцій читачі можуть звернутися до книги «Роботизована мінімально інвазивна хірургія: комплексний підручник» [18]. Класифікуючи типи комерційних роботів та концептуальних систем, на яких ми з точки зору досліджуваних параметрів, інтерфейсів доповненої реальності,

анатомічного розташування та наданого маркування CE.

У цій роботі ми прагнемо зробити свій внесок у майбутні дослідження, створивши основу на сучасному рівні техніки та доказовій базі концепцій доповненої реальності (AR) для хірургічної робототехніки, а також розглянувши такі дослідницькі питання:

- Які ваші сучасні дослідження в інтеграції AR-технологій з хірургічною робототехнікою?
- Які різні апаратні та програмні компоненти використовуються в розробці хірургічних роботів з доповненою реальністю та як вони взаємопов'язані?
- Які деякі з сучасних парадигм застосування покращили ці роботизовані платформи? Як ми можемо усунути прогалини в дослідженнях, описані в попередніх оглядах літератури, та сприяти швидшій роботі та точності обробки зображень, а також заохочувати використання хірургічних роботів з високим рівнем доступності (LoA) за допомогою методів комп'ютерного зору?

Щоб зрозуміти та детальніше описати методології, що використовуються в роботизованих хірургіях на основі доповненої реальності (AR), ми вирішили класифікувати системи з точки зору їхніх апаратних та програмних характеристик як початкове дослідження літератури з нашого метааналізу та розв'язання тонкої логічної взаємозв'язку на рисунку 1.3.

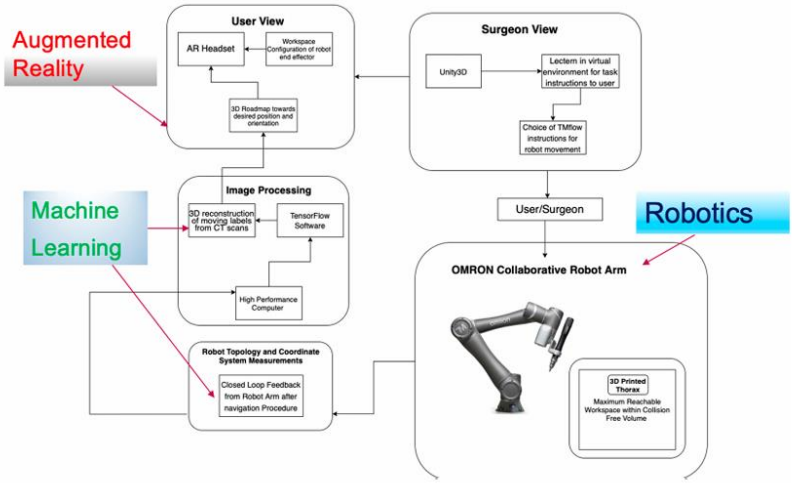

Рисунок 1.3 - Логічний зв’язок між різними розділами

У цьому підрозділі основна увага приділяється особливостям AR - інтерфейсів у RAS, які сприяють розробці апаратного забезпечення системи. Статті класифіковані за їх (різними маркерними трекерами та датчиками), методами реєстрації та вирівнювання зображень, а також типами відображень, що використовуються для візуалізації).

Такими як апаратне забезпечення, програмне забезпечення та гарнітури доповненої реальності. апаратне забезпечення, програмне забезпечення, та гарнітури доповненої реальності.

1.3 Віртуальна та доповнена реальність у симуляційному навчанні хірургії

Віртуальна реальність – це захопливий досвід, де віртуальний світ замінює фізичний світ. За допомогою пристроїв введення, таких як ручні контролери, пристрої тактильного зворотного зв'язку та тактильні рукавички, користувач може взаємодіяти з цим віртуальним світом. Положення цих пристроїв вимірюється за допомогою оптичного відстеження, лазерного відстеження або поворотних енкодерів. Коли користувач переміщує пристрій введення у фізичному світі, його переміщення та обертання відстежуються та застосовуються до віртуального хірургічного інструменту [19]. Це забезпечує однозначний зв'язок між переміщенням та обертанням у фізичному світі та віртуальному світі. Дві ключові технології, що використовуються для реалізації високоточних вражень від віртуальної реальності, – це візуальний рендеринг та тактильний рендеринг. На рисунку 1.4 показано віртуальний хірургічний симулятор з тактильним зворотним зв'язком та пов'язаними з ним компонентами, здатний імітувати розрізання верхньої щелепи.

Візуальний рендеринг

Хірургічний симулятор [3] створює захопливе 3D-середовище, що імітує реальну хірургічну сцену. Для реалізації візуалізації хірургічного середовища розробники використовують 3D-графічні інтерфейси прикладного

програмування (API). Найпоширенішими є Direct3D, спеціалізований графічний API для Windows, OpenGL, крос-мовний, кросплатформний графічний API та нещодавно представлений Vulkan, кросплатформний графічний API. Сьогодні існують ігрові движки, такі як Unreal Engine та Unity, які підтримують розробку VR-додатків та працюють поверх цих графічних API. Ці движки спрощують створення та розгортання 3D-сцен і привернули більше уваги в процесі розробки хірургічних симуляторів, особливо Unity [3, 5, 6]. Під час створення сцени на основі 3D-графічного API розробникам потрібно починати з нуля, що забезпечує значну гнучкість та контроль. Оскільки будуть реалізовані лише функції, необхідні для програми, вона часто є більш легкою. Однак, через низькорівневий характер, існує крута крива навчання, а також це займає багато часу, оскільки розробнику потрібно починати з нуля. З іншого боку, ігрові двигуни вже містять усі функції, необхідні для створення 3D-сцен. Вони часто мають графічний інтерфейс користувача (GUI) і їх легше вивчити, оскільки розробнику не потрібно займатися низькорівневою роботою, пов'язаною з графічними API 3D [20]. Отже, це відбувається за рахунок меншої гнучкості, меншого контролю та використання інтегрованого середовища розробки (IDE) з багатьма невикористаними функціями. Технічні специфікації для створення 3D-сцен залежать від характеру сценарію (наприклад, кількість об'єктів, деталі об'єктів тощо). Тому використовуються спеціалізовані робочі станції з потужними графічними процесорами (GPU) для прискорення обчислень віртуальних сцен, щоб відповідати частоті оновлення 30 Гц-120 Гц. Після рендерингу сцена буде показана користувачеві. Інтерфейсом для перегляду створеної сцени може бути монітор [7], але також можливе використання дисплея, що кріпиться на голові (HMD), для повного занурення користувача у віртуальний світ [5]. Комерційно доступні системи відображення для віртуального хірургічного моделювання включають HTC Vive [8], Display 300 та Oculus Rift [10]. Перевага використання HMD над монітором для відображення хірургічної сцени полягає у ступені занурення, який можна реалізувати. Коли HMD одягнено, користувач буде повністю занурений у створене віртуальне середовище.

Однак, виходячи з передбачуваного застосування, це не завжди бажано.

Наприклад, коли розробляється хірургічний симулятор для малоінвазивної хірургії, тоді хірургічному резиденту може бути корисніше дивитися на монітор, оскільки це нагадує реальні умови в операційній, де хірург дивиться на монітор, одночасно керуючи хірургічним обладнанням через тіло пацієнта.

Тактильна візуалізація. Тактильна технологія дозволяє взаємодіяти з віртуальними середовищами та може бути впроваджена в хірургічні симулятори для покращення їхньої точності. Саму тактильну сенсорну інформацію можна розділити на дві категорії: тактильну та пропріоцептивну. Тактильна інформація отримується від тактильних датчиків, вбудованих у шкіру, і відчувають тиск, вібрацію, різницю температур тощо. На противагу цьому, пропріоцептивна інформація отримується від пропріоцептивних рецепторів, зазвичай вбудованих у суглоби та м'язові волокна, і відчувають положення та рух кінцівок, а також сили, що діють на них [21]. У хірургічних симуляторах акцент робиться на пропріоцептивному зворотному зв'язку, який пристрій тактильного зворотного зв'язку застосовує до користувача. Цей пристрій складається з кількох виконавчих механізмів, які вимірюють положення користувача та блокують його рухи за необхідності, що створює враження зворотного зв'язку по силі. Робочий простір, діапазон сили, роздільна здатність, жорсткість та ступені вільності (DOF) характеризують ці пристрої. Система тактильного зворотного зв'язку здійснює вихідну силу на основі результату алгоритму тактильного рендерингу. Через пропускну здатність тактильної сенсорної інформації 1 кГц необхідні точні алгоритми тактильного рендерингу з низькою затримкою [22].

Що складається з пристрою тактильного зворотного зв'язку з 6 ступенями свободи (Omega 6), 3D -імерсивного робочого місця (Display 300), 2D-РК-монітора та 3D-окулярів.

Ці алгоритми виявляють зіткнення у віртуальному середовищі та усувають їх, забезпечуючи належний зворотний зв'язок по силі, що відбувається у два етапи. По-перше, відбувається виявлення зіткнень. У сфері виявлення зіткнень існує різноманітне представлення об'єктів, що дозволяє швидко виявляти зіткнення. Ці представлення об'єктів включають метод Voxmap-

PointShell [12], хмари точок [23, 14], вирівняні по осях обмежувальні рамки (AABB), орієнтовані обмежувальні рамки (OBB), k-DOP та сфери [24]. Структури даних, створені з цих представлень об'єктів, - це неявні поверхні [13] та деревоподібні структури [14]. Після виявлення зіткнення настає час вирішити зіткнення, обчисливши відповідний зворотний зв'язок по силі. Термін зворотний зв'язок по силі з 3 ступенями свободи застосовується, коли система тактильного зворотного зв'язку здійснює лише поступальні сили. Коли система тактильного зворотного зв'язку здійснює обертальні та поступальні сили, це називається зворотним зв'язком по силі з 6 ступенями свободи. Існує дві основні категорії методів зворотного зв'язку по силі: методи на основі штрафів [25] та методи на основі обмежень [26]. На сьогоднішній день доступні кілька комплектів розробки тактильного програмного забезпечення та інтерфейсів тактильного програмування для пришвидшення інтеграції тактильних елементів у програмні застосунки. До них належать Haptic SDK, Open Haptics Toolkit, CHAI3D, SOFA та H3D API .

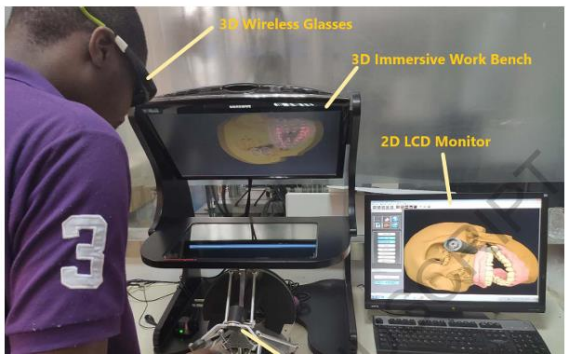

Рисунок 1.4 - Хірургічний симулятор віртуальної реальності під час моделювання розрізання верхньої щелепи

Доповнена реальність

Доповнена реальність – це технологія, яка дозволяє покращити фізичний світ віртуальними даними шляхом накладання візуальної інформації на поле зору користувача [27]. Реалізація високоякісного досвіду доповненої реальності базується на трьох ключових технологіях: візуальному рендерингу, відстеженні та реєстрації зображень.

Візуальний рендеринг

Існує кілька інтерфейсів прикладного програмування (API), комплектів розробки програмного забезпечення (SDK), ігрових двигунів та комерційно доступних програмних пакетів, які наразі використовуються для розширення поля зору хірурга за допомогою інформації, специфічної для пацієнта. Обговорюючи використання доповненої реальності (AR) для накладання додаткової інформації на фізичний світ, важливо розрізняти двовимірні (2D) дані та 3D-дані, які включені в поле зору користувача. Для 2D-візуалізації даних

Використовувалися CrowdOptic, OpenCV [19, 20] та VitalVideo [21]. З іншого боку, VTK, CTK [22, 23], ITK , IGSTK [22, 23], QT [22, 23, 24] та OpenCV [24, 25] – це поширені бібліотеки, що використовуються для 3D-візуалізації даних. Unity3D використовується для візуалізації 3D-даних на Microsoft HoloLens [26]. Аргументи, наведені на користь VR щодо переваг та недоліків використання графічних бібліотек або ігрових двигунів для розробки віртуальних сцен, також застосовні для AR. Типи AR-дисплеїв можна класифікувати як відео-прозорі (VST), оптичні прозорі (OST) або проекційні [27]. У випадку VST камера захоплює фізичну сцену, а доповнені дані об'єднуються в захоплене зображення, а потім об'єднане зображення показується користувачеві. VST-дисплеї бувають у вигляді HMD [28], портативних пристроїв [29], а також звичайних моніторів [24]. OST-дисплеї дозволяють користувачеві безпосередньо переглядати фізичний світ та накладати його прямий вигляд доповненими даними. Для досягнення цього використовуються оптичні об'єднувачі, які накладають візуалізовані зображення на фізичний світ, що бачить користувач, за допомогою просторового модулятора світла (SLM) [31]. Окрім часто використовуваних OST HMD, до яких належать Google Glass та HoloLens [26], існують також менш відомі пристрої, такі як Moverio BT-200, nVisor ST60 та Vuzix. Нарешті, проекційні дисплеї проектують віртуальні дані поверх реальної сцени та часто використовуються для покриття більших площ. Інтегральна відеографія (IV), яка базується на інтегральній фотографії (IP), – це метод, що використовується для досягнення проекційної доповненої реальності (AR) для медичних застосувань [34, 35]. Ця техніка використовує плоский

дисплей з опуклим шестикутним масивом лінз, розміщеним перед дисплеєм. Промені від пікселів на плоскому дисплеї проходять через опуклі лінзи та сходяться в точці 3D-простору. Спостерігач переглядає 3D-зображення через напівсрібне дзеркало, яке діє як оптичний об'єднувач у цій системі. Перевагою системи відображення VST AR є те, що камера може захоплювати навколишнє середовище, а віртуальні дані можуть накладатися на захоплені кадри. Це набагато простіше, ніж накладання віртуальних даних безпосередньо на фізичний світ, як у випадку з дисплеями OST AR. У дисплеях OST AR погляд користувача залишається природним, і віртуальні дані потрібно додавати до цього вигляду, на відміну від дисплеїв VST AR, де погляд користувача більше не є природним, оскільки захоплені кадри замінюють його, і користувач дивиться на екран, який показує фізичний світ [29]. Недоліком дисплеїв OST AR є інтенсивність, з якою можуть відображатися зображення [30]. Нарешті, проекційні AR-дисплеї можна використовувати для проектування віртуальних даних на фізичний світ. Однак у цьому випадку потрібен об'єкт, на який можна проектувати віртуальні дані. Він також більше підходить для покриття більших площ і, таким чином, має більше поле зору порівняно з дисплеями OST AR.

Відстеження

Існують різні методи, що застосовуються для відстеження в AR-додатках. По-перше, існує різниця між відстеженням без маркерів та відстеженням на основі маркерів. Безмаркерного відстеження можна досягти за допомогою стереокамери, де застосовуються алгоритми 3D-зіставлення для оцінки пози відстежуваного об'єкта [34, 36, 37]. Інший підхід полягає у використанні однієї камери та методу 3D-2D зіставлення форми в рамках 2D-відстеження-навчання-виявлення [38]. Перевагою безмаркерного відстеження є простота використання, оскільки маркери не потрібно прикріплювати до пацієнта. Отже, хірург також витрачає менше часу на підготовку. Однак недоліком є те, що існує більше обчислювальне навантаження порівняно з відстеженням на основі маркерів через алгоритми комп'ютерного зору, яким потрібно витягувати ознаки, що використовуються для відстеження, безпосередньо з кадрів, знятих камерою. Іншим недоліком є те, що неможливо використовувати електромагнітне

відстеження для відстеження без маркерів. З іншого боку, існує відстеження на основі маркерів, де типи маркерів та техніка відстеження класифікують тип відстеження на основі маркерів. Два поширені типи маркерів – це опорні маркери [19, 20, 26] та сферичні маркери [22, 23, 24]. Сферичним маркером, який часто використовується, є пасивний світловідбиваючий ІЧ-маркер. Цей маркер відбиває падаюче ІЧ-світло, яке випромінюється оптичною системою стеження. Відбите ІЧ-світло потім виявляється ІЧ-камерами оптичної системи стеження. Як результат, цей метод можна використовувати в місцях з поганим освітленням. Недоліком є те, що ці маркери є витратними матеріалами та потребують заміни, коли їхнє відбиваюче покриття забруднене кров'ю під час операції. Опорні маркери, з іншого боку, дешевші, оскільки їх можна друкувати на аркушах паперу. Однак вони менш точні, ніж сферичні маркери. Для відстеження на основі маркерів потрібно більше часу на підготовку, оскільки маркери необхідно прикріпити до пацієнта та хірургічних інструментів. Однак, завдяки своїй особливій формі, маркери легко виявити в 3D-просторі, і немає потреби в складній пост-обробці для вилучення їх координат з 3D-простору [32]. Також можна класифікувати технологію, яка використовується для пристроїв відстеження. Зазвичай це оптичні трекери, електромагнітні трекери або їх комбінація, відома як гібридні трекери. Оптичні трекери базуються на використанні інфрачервоних (ІЧ) камер [24], кольорових (RGB) камер або монохроматичних камер [19, 20]. Недоліком оптичних трекерів є те, що користувач може загороджувати лінію зору і, отже, перешкоджати відстеженню. Крім того, оптичні трекери також вносять технічну складність у хірургічний робочий процес. Однак, щоб електромагнітні трекери досягли такої ж точності, як оптичні трекери, їх потрібно розміщувати ближче до області інтересу, оскільки їхня надійність і точність падають у присутності феромагнітних матеріалів, провідних матеріалів або обох. Ключовою перевагою електромагнітних трекерів є відстеження прихованих структур. Поєднання обох технологій у формі гібридної системи відстеження, в якій користувач може перемикатися між двома підходами до відстеження для конкретного завдання,

може бути рішенням для подолання недоліків, з якими стикаються обидві системи окремо [27].

Реєстрація зображення

Реєстрація зображень необхідна для точного вирівнювання віртуальних даних з фізичною сценою. Було застосовано багатоетапну стратегію кореєстрації, в якій навколо місця хірургічного втручання розміщуються чотири опорні маркери. Під час навігації ці маркери відстежують край пухлини, який потрібно видалити. Щоб зареєструвати віртуальну систему координат з фізичною системою координат, Застосували метод реєстрації "точка-точка". Для вилучення координат опорних орієнтирів у віртуальній системі координат застосовується обробка зображень. Координати опорних орієнтирів були отримані за допомогою зонда позиціонування у фізичній системі координат. Застосували подібний підхід до реєстрації на основі точок. Щоб покращити точність реєстрації, поєднують реєстрацію на основі опорних точок з реєстрацією на основі поверхні. Ці методи реєстрації базуються на видимих маркерах. Однак існують також методи без маркерів, які можна використовувати для реєстрації зображень

Змішана реальність

Різниця між AR та MR не завжди чітка. Хоча обидві технології використовують віртуальні дані для покращення фізичного світу, різниця полягає у способі представлення даних та їх включення у фізичний світ. AR визначають як накладання візуальної інформації на поле зору користувача, а MR – як об'єднання зображень зі сценою або об'єктом позаду дисплея. Іншими словами, AR накладає дані на реальний світ, де MR закріплює віртуальні дані у фізичному світі. Таким чином, AR – це технологія, де інформація накладається на реальний світ. Інформація не залежить від руху голови користувача та завжди з'являтиметься в одній і тій самій області поля зору користувача. У MR рух голови користувача буде відстежуватися, і при обертанні від віртуального об'єкта об'єкт рухатиметься у протилежному напрямку [33]. Google Glass – це пристрій AR, оскільки він накладає інформацію на фізичний світ. З іншого боку, Microsoft HoloLens – це пристрій MR, здатний накладати інформацію, як і Google

Glass, але також може інтегрувати віртуальні об'єкти у фізичний світ. Окрім Microsoft HoloLens, існують також інші MR HMD, такі як Magic Leap One та Avegant Light Field Display. Оскільки немає єдиного опису терміна MR, все стає дуже заплутаним [34]. Тому трапляється, що назви MR та AR використовуються як взаємозамінні. Ключові технології, описані для AR щодо візуалізації, відстеження та реєстрації зображень, також застосовні до MR через перетин між AR та MR. Обговорюючи застосування MR у сфері хірургічного моделювання, не гарантується, що застосування відповідають визначенню MR, наведеному вище, оскільки саме інтерпретація автора призвела до того, що застосування було позначено як MR. Серед трьох технологій MR є найновішою щодо комерційно доступного обладнання та найскладнішою для реалізації щодо візуального рендерингу. Однак, оскільки вона дозволяє фізичному світу зливатися з віртуальним світом, вона має значну перевагу щодо тактильних сигналів.. У MR фізичні моделі можуть частково замінити ці тактильні сигнали, щоб запровадити пасивний тактильний зворотний зв'язок, що дозволяє отримувати високоточний та недорогий тактильний зворотний зв'язок.

1.4 Висновки по розділу

У першому розділі було розглянуто теоретичні основи програмування систем доповненої реальності для навчання хірургії та робототехніки. Проаналізовано базові принципи технологій доповненої реальності та їх застосування у медичній освіті для підвищення ефективності навчального процесу. Досліджено класифікацію та моделі взаємодії AR-систем із роботизованими хірургічними комплексами, що забезпечують інтерактивне навчання та підтримку медичних процедур. Також розглянуто роль віртуальної та доповненої реальності у симуляційному навчанні хірургії. Отримані результати формують теоретичну основу для подальшого проєктування та реалізації AR-систем медичного призначення.

РОЗДІЛ 2. МЕТОДИ ТА ІНСТРУМЕНТИ РОЗРОБКИ AR-СИСТЕМ ДЛЯ ХІРУРГІЧНОГО НАВЧАННЯ ТА РОБОТОТЕХНІКИ

У цьому розділі представлено вибрані відповідні дослідження. Як зазначено, у цьому розділі розглядаються застосування з точки зору використовуваних технологій, зворотного зв'язку за силою, оцінки навчання, дидактичних та візуальних посібників, керівництва, збору та зберігання даних, а також типу рішення (комерційне чи некомерційне). Вибрані дослідження організовані за видом медичної практики, яку вони охоплюють.

2.1 Методи реалізації AR-систем для ендоскопічних та малоінвазивних процедур

Для встановлення методології проведення огляду та уникнення упередженості було створено наступний протокол огляду. Стратегія пошуку була проведена з використанням таких кроків: (1) Передумови, (2) Дослідницькі питання, (3) Метод пошуку для ідентифікації досліджень, (4) Критерії відбору, (5) Вилучення даних та характеристики досліджень, (6) Аналіз та (7) Синтез вибраних робіт.

У попередніх роботах у цій галузі зазначається, що за останні роки було створено кілька середовищ електронного навчання для медичної освіти [39 , 40]. Однак сучасні навчальні середовища не забезпечують рівня візуального реалізму, необхідного для виконання таких завдань. Поточні огляди в цій галузі охоплюють досягнення в медичній підготовці [35]. У цих оглядах віртуальні програми, що використовувалися для відпрацювання хірургічних навичок , були описані як засоби симуляції станцій, як серйозні ігри для підтвердження набутих навичок або того, як до них застосовувалися технології (наприклад, тактильні технології та віртуальна або доповнена реальність). Однак було виявлено, що сучасні віртуальні середовища часто не забезпечують достатнього зворотного зв'язку під час або після симуляції, або вони не забезпечують оцінку отриманих навичок і знань. Отже, цей огляд аналізує останні досягнення в медичних

симуляторах з акцентом на технології оцінки та керівництва.

Початковий пошук розпочався з визначення того, які рішення для навчання та керівництва в медичній хірургії були успішно розроблені в дослідженнях та на комерційному рівні. Це полегшило зосередження зусиль огляду та визначення дослідницьких питань. Були враховані знайдені початкові дослідження, і згодом для огляду та формування дослідницьких питань були обрані такі дослідницькі питання:

(RQ 1) Які віртуальні програми можуть забезпечити навчання та керівництво для різних галузей медичної хірургії?

(ЗП 2) Які аспекти оцінювання слід використовувати для порівняння та пошуку взаємозв'язків між навчальними та консультативними програмами медичної хірургії?

(ЗП 3) Яка тенденція в розробці середовищ для медичної підготовки між віртуальними та фізичними застосуваннями?

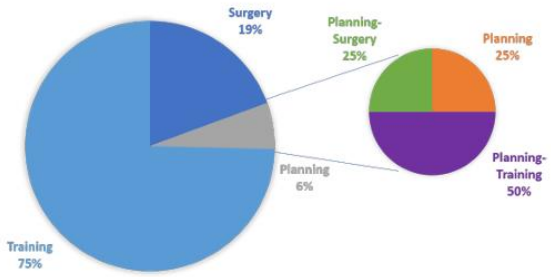

Рисунок 2.1 - Розподіл проаналізованих робіт за типом їх використання (навчання, хірургія та планування).

Загалом було зібрано та проаналізовано 3530 досліджень. Спочатку провели читання всіх назв та анотацій, а ті, що не стосувалися дослідницьких питань, були видалені, залишилося 2857. З них 2184 було додатково видалено, щоб уникнути дублікатів або робіт, не пов'язаних з дослідженням. Згодом провели незалежну оцінку решти 673 досліджень. Виключили 606 робіт відповідно до критеріїв відбору, доки не досягли консенсусу щодо досліджень, які будуть включені до огляду. Зрештою, було включено загалом 67 досліджень, а повні тексти вибраних досліджень були отримані для огляду. (рисунок 2.1)

Артроскопія. Артроскопія – це тип хірургічного втручання, що використовується для діагностики та лікування проблем із суглобами. Вона пропонує такі переваги, як менша травматичність, зменшення болю та швидкий час відновлення. Вони вимагають від лікарів високих психомоторних навичок. На ринку можна знайти комерційні станції, такі як ARTHRO Mentor. Виробляє його Simbionix. Протестували ARTHRO Mentor, щоб оцінити його корисність як базового симулятора для навчання компетенцій [36]. Система складається зі стенду зі склопластиковою моделлю правого коліна, підключеного до комп'ютера, та двох тактильних пристроїв Geomagic Touch, що продаються Geomagic. ARTHRO Mentor використовує візуальні підказки під час симуляції, щоб керувати студентами під час виконання завдання. Він має інтегровані медичні навчальні програми, які включають процедури та повні випадки хірургічних операцій. Нарешті, він надає можливості управління користувачами та генерує статистику та графіку, пов'язані з процесом навчання студентів. Тому вважають, що ці типи рішень пропонують якісні, повні та безпечні станції з використанням віртуальних середовищ, що охоплюють медичну навчальну програму.

Розглядається розробка комп'ютерних (КА) систем або навчальних станцій, щоб допомогти резидентам та хірургам правильно та кваліфіковано проводити операції. Одним із досліджень у цій галузі є дослідження. Застосували методи КА під час роботи з трапецієподібним п'ястковим протезом. У цьому підході використовувалися система морфування кісток Leibinfer та програмне забезпечення Knee 2.0, обидва розроблені Stryker. Під час операції використовувалися два трасери та калібрувальний зонд для допомоги під час процедури. Система спрямована на допомогу хірургам під час наступних етапів: розріз, підготовка та ініціалізація морфування кісток, записи трапецієподібних та п'ясткових кісток, перший та другий кінематичний аналіз, а також встановлення протеза. Записували дані під час операції для її оцінки. Під час завдання не було виявлено жодного вивиху. Це дослідження допомогло довести, що методи КА допомагають хірургам отримувати та використовувати біомеханічні вимірювання під час операції [37].

Тотальне ендопротезування колінного суглоба (ТОЕ) є однією з найскладніших процедур. Дослідження оцінює, чи може система ендопротезування колінного суглоба (КА) полегшити цей тип операції. Для оцінки методик КА дослідження складалося з двох груп, де одна мала виконувати ТОЕ звичайним способом, а інша мала використовувати програмне забезпечення для КА. Обидві групи використовували модель імплантату Triathlon для ендопротезування, виготовлену Stryker, а група КА використовувала програмне забезпечення Stryker Knee. Ця навігаційна система дозволяє користувачам відстежувати рухи своїх інструментів та надсилати дані до системи локалізації камери. Результати дослідження показують, що як КА, так і механічна техніка покращили вирівнювання стегново-великогомілкових кісток, але за наявності попередніх деформацій група КА отримала кращі результати.

Використовували програмне забезпечення для комп'ютерної хірургії (КА) для оптимізації стабільності корональної артропластики та паралельного положення компонентів під час операцій тотального ендопротезування колінного суглоба (ТАКС). Оцінено навігаційну систему OrthoPilot, розроблену Aesculap. До- та післяопераційні оцінки були отримані за допомогою систем (KSS) та (HSS). OrthoPilot забезпечував надання керованих даних через зворотний зв'язок у режимі реального часу під час операцій. Отже, він є корисним способом досягнення корекції варусної деформації корональної вирівнювання від нуля до двох градусів. Дослідження підтверджують, що методи КА дозволяють хірургам досягати кращих результатів, ніж ті, що отримані під час стандартних інструментальних робіт, де під час позиціонування стегнового компонента було зібрано дані ближче до трьох
градусів зовнішнього обертання.

Ще однією захопливою роботою в галузі ендопротезування колінного суглоба (ТКА) є робота де розробили навчальне втручання для цього типу процедури. Розробили курс навчання ТКА. В експерименті брали участь дев'ять резидентів, з яких шість були молодшими студентами, а троє - старшими. Перед використанням підходу СА ТКА учасники випробування мали пройти Об'єктивну структуровану оцінку технічних навичок (OSATS), валідований тест

навичок для ТКА. Після тесту OSATS використовували дві системи тибіофеморальної (TF) СА та одну власну систему пателярної СА. Системи TF були: програмне забезпечення Orthosoft Universal Knee на системі Sesamoid Plasty, обидві розроблені Zimmer CAS, та програмне забезпечення Knee Unlimited на системі Kolibri, обидві створені BrainLAB. Ці рішення СА дозволяють користувачам планувати на віртуальній моделі бажані положення стегнового та великогомілкового компонентів, а потім вони направляють користувача під час розрізів для отримання точних результатів. Створено середовище для розвитку когнітивної гнучкості та самооцінки. Результати показали, що завдяки різним точкам зору (традиційній та комп'ютерній, а також СА), резиденти отримали переваги під час процесу навчання, де результати молодших студентів навіть перевершили результати старших студентів у пост-тестах [38]. Як наслідок, університетам або лікарням слід розглянути створення навчальних курсів із системами СА для посилення своєї освітньої моделі.

У загальних процедурах артроскопії зосередили свою роботу на оцінці навичок у цій галузі. Тести проводилися за допомогою симулятора коліна, розробленого Sawbones. Записувались такі параметри, як час операції, траєкторію інструменту та силу, що прикладається в симуляторі. Для збору даних про довжину шляху та швидкість інструментів використовувалася вимірювальна система Aurora, виготовлена NDI. Для оцінки хірургічної сили було впроваджено датчик із шістьма ступенями свободи, виготовлений Nitta Corporation. Користувачі пройшли орієнтацію та практичний сеанс перед початком оцінюваних випробувань. Завдання, що оцінювалися, були: огляд та зондування суглобів, а також меніскектомія. Перевірка та зондування суглобів дозволяють користувачам взаємодіяти з певною кількістю фігур протягом обмеженого часу [39]. З іншого боку, меніскектомія була запрограмована як керована симуляція, де користувач повинен виконувати її, слідуючи лінії в симуляції.

Шляхом створення систем оцінювання, можна проводити оцінку рівня кваліфікації. Це важлива функція в сучасному комерційному середовищі. Вони дозволяють студентам і хірургам зрозуміти ступінь своєї майстерності та

навичок у виконанні завдань, а також допомагають їм зосередитися та вдосконалити свої менш розвинені техніки в процедурі.

Ендоскопія. З появою нових технологій ендоскопія отримала переваги завдяки своїм вимогам до сенсомоторних навичок. Застосовуючи технології під час операцій, можна підвищити безпеку та запобігти шкідливим або небезпечним подіям. Цей тип технологій зазвичай надається комерційними системами, апаратним та програмним забезпеченням. Оцінено продуктивність симулятора ендоскопічної хірургії пазух (ES3). ES3 записує загальні та конкретні для завдання бали. Для оцінки він розраховує бали, використовуючи час процедури та точність. До рейтингу застосовуються штрафи, якщо під час процесу виявлено хірургічні небезпеки. ES3 надає керівництво та допомогу у вигляді віртуального інструктора, який вказує на помилки, промахи та неточності під час симуляції. Крім того, система надає користувачам попередньо визначені навігаційні підказки та використовує цільові маркери під час ін'єкцій та дисекції.

Ще одне дослідження, яке аналізує комерційну систему для оцінки та керівництва під час навчання. У цьому дослідженні автори протестували систему LapSim, виготовлену Surgical Science. Цей ендоскопічний симулятор був використаний для створення навчального курсу. Вправи LapSim, що використовувалися в цьому курсі, включали підіймання та хапання. Вони дозволили авторам оцінити координацію обох рук , що є вирішальною навичкою під час ендоскопічних завдань. LapSim дозволяє викладачам керувати заняттями, профілями студентів та створювати звіти про ефективність. Щодо допомоги, LapSim надає підказки на екрані в режимі реального часу та огляди поза межами навчального закладу на основі дій користувача, а система також використовує віртуального помічника для забезпечення інтерактивного навчання в симуляції.

Хоча комерційні системи можуть забезпечити повний спектр інструментів відстеження, керівництва та оцінювання, вони є дорогими, що робить їх недоступними для більшості освітніх чи медичних закладів світу. Відповідно, зосереджують свої дослідження на забезпеченні недорогого рішення. Створено систему навчання верхній ендоскопії, яка зберігає дані з

сеансів користувачів. Система пропонує два режими: режим навчання та режим іспиту. Під час навчання симулятор використовує інтерактивний навчальний досвід, забезпечуючи помічника на місці події. З іншого боку, режим іспиту просить студентів робити знімки місця події, які оцінюються за допомогою SVM. Симулятор надає адаптивні запитання, пов'язані із завданням, які генеруються відповідно до відповіді попереднього. Система надає оцінки користувачів на основі зображень, результатів анкети та часу процедури.

Адаптація комерційних станцій – ще одна тема досліджень в ендоскопії. Вона дозволяє установам, які вже інвестували в ринкові системи, розширити їхню корисність, замінивши попередньо встановлене програмне забезпечення на станціях. Модифіковано систему NeuroVR для виконання ендоскопічної третій вентрикулостомії. Автори замінили оригінальні два дзеркала та два екрани NeuroVR, а також встановили чотири дзеркала та один екран. Було встановлено нове програмне забезпечення для моделювання, розроблене з використанням фреймворку Blade. Автори змоделювали два завдання – вибір положення отвору для свердла та орієнтації входу, а також навігацію всередині шлуночкової системи. Було впроваджено екранний консультант. Цей консультант може повідомляти користувачеві про дії, які необхідно виконати під час процедури, відображаючи вікно повідомлення.

Ще одна досліджувана область ендоскопії зосереджена на інформації, що надається лікарям під час операції. Візуальна інформація про ендоскопію зазвичай відображається на моніторі під час операції; однак деякі дослідження стверджують, що прямий огляд місця події забезпечує кращу продуктивність. Шістнадцять учасників були розділені на дві групи: групу з ендоскопічним оглядом та групу з прямим оглядом. Вони мали абляцію трьох шарів симульованої тканини. Система складалася з коробки з отвором для вставки жорсткої моделі резектоскопа A 2614 виробництва Olympus. Симулятор був оснащений акустичною системою захоплення руху CMS 50 від zebris Medical GmbH для запису 3D-положень резектоскопа. Автори надали зворотний зв'язок, показавши видалені залишки та пояснивши якість результату. Проводячи цей експеримент, автори виявили, що підхід з прямим оглядом може допомогти

хірургам калібрувати інформацію монітора перед проведенням операції в ендоскопічному огляді.

У галузі лікування навколоносових пазух зосередили свою увагу на оцінці та порівнянні результатів операцій з використанням коронарної артропластики (КА) та без неї. Дослідження було зосереджено на дослідженнях хронічного риніту або поліпів носа. Запропонована установка складалася з навігаційної системи SurgiGATE ORL, розробленої Synthes Incorporation. SurgiGATE ORL відстежує локалізацію кінчика та осі інструментів. Дослідження показало, що операції не мають жодної різниці між процедурами КА та без неї. Тому подібні дослідження застерігають дослідницьку спільноту уникати залежності лише від систем КА. Система КА забезпечує взаємодопомогу під час операції; отже, слід додатково розглянути питання про належне навчання без такої допомоги.

Досягнення в роботах-асистованих процедурах також спостерігаються в ендоскопії. Розроблено алгоритм відстеження інструментів на основі зору, щоб допомогти хірургам під час операцій. Оскільки ендоскопія належить до категорії малоінвазивних операцій (МІО), робочий простір мінімальний, і можуть виникати зіткнення між хірургічними інструментами. Застосували методи роботоасистованої хірургії (КА) в роботах-асистованих операціях. У цьому дослідженні було розроблено алгоритм для моніторингу інструментів та зіткнень. Вони використовували підхід візуального зворотного зв'язку, де, якщо інструменти зіткнуться між собою, система видає попередження. Це попередження генерується за допомогою розрахунку евклідової відстані. До цього значення було застосовано фільтр Калмана, щоб уникнути помилок під час процесу відстеження інструментів. Алгоритм було запрограмовано в MATLAB та протестовано з використанням запису ендоскопічних операцій. Результати були багатообіцяючими та підтверджують їхній неапаратний підхід до операцій,

пов'язаних з КА, що може значно знизити вартість операцій.

Нарешті, розробили симулятор для проведення трансгастральної гібридної холецистектомії. Для свого симулятора NOViSE автори розробили власний тактильний пристрій для ендоскопа зі зворотним зв'язком по силі та поєднали його з віртуальною симуляцією, розробленою в Unity, та їхньою

власною системою деформованих об'єктів. Симулятор дозволяє користувачеві переміщувати ендоскоп через стравохід, щоб дістатися до жовчного міхура та виконати його видалення. Крім того, NOViSE забезпечує візуальне керівництво через контрольні точки, щоб допомогти користувачеві досягти цілі. Чотирнадцять клініцистів перевірили симулятор NOViSE, і було досягнуто хороших загальних результатів [40].

Лапароскопія. Лапароскопія, окрім ендоскопії, є однією з галузей медицини, яка отримала користь від технологічного прогресу. Деякі дослідження були зосереджені на відтворенні комерційних рішень у віртуальних середовищах. Створено Базовий лапароскопічний хірургічний тренажер (VBLaST). Він відтворює симулятор основ лапароскопічних навичок (FLS), розроблений Товариством американських шлунково-кишкових та ендоскопічних хірургів (SAGES). VBLaST моделює такі завдання: перенесення кілочків, вирізання шаблону, розміщення світлового контуру та накладання швів з внутрішньокорпоральним або екстракорпоральним зав'язуванням вузлів. Користувач виконує завдання за допомогою двох тактильних пристроїв Geomagic Touch, які мають хапальні пристрої як кінцеві механізми. Для вимірювання продуктивності користувача симулятор аналізує відеозаписи сеансу, щоб визначити час процедури та помилки. Цей експеримент було проведено, щоб перевірити, чи може VBLaST бути таким же ефективним, як FLS, для навчання лапароскопії. Студенти використовували FLS та VBLaST, і результати показали, що за допомогою VBLaST можна досягти швидшого навчання, ніж за допомогою FLS, завдяки тактильному зворотному зв'язку.

Щодо навчання телеопераційній хірургії, створили навчальну станцію для відпрацювання хірургічних навичок за допомогою тактильного пристрою Geomagic Touch. Симуляція була розроблена з використанням середовища операційної системи Robot та VTK. Вважалося, що симулятор має функціональність доповненої реальності. Додаток дозволяє користувачеві практикуватися в різних завданнях: досліджувати пухлину нирки в доповненій реальності (AR-сценарії), взаємодіяти з контуром ниркової артерії під час процедури нефректомії в віртуальному сценарії та виконувати додаткові базові

тести, такі як дослідження примітивних форм. Під час дослідження віртуальної анатомії надаються інструкції. Візуальна допомога дозволяє користувачеві знати відстань між органами та інструментом взаємодії як орієнтир для визначення шляху. Крім того, автори використовували контролер Fuzzy-PD для забезпечення допомоги з силою під час виконання завдань. Для підтвердження своєї роботи двадцять сім учасників, які не є медичними працівниками, протестували свій симулятор. Результати показують, що існує суттєва різниця між користувачами, які тестували середовище з допомогою з силою.

Ще однією сферою розвитку, яку розглядали дослідники, є недорогі симулятори лапароскопії. Розробили недорогий симулятор холецистектомії. Автори створили свою систему, використовуючи ноутбуки, камеру Microsoft Kinect та два контролери Nintendo Wiimote. Kinect використовувався для фіксації рухових дій користувача для відображення їх на віртуальній сцені. Wiimote використовувалися для забезпечення тактильного зворотного зв'язку під час процесу. Симулятор був побудований з використанням відеолапароскопічних записів реальних операцій. Створили базу даних експертних знань, щоб представити свій симулятор як інтерактивний відеоурок. Для оцінки використовуються HMM для порівняння дій, записаних Kinect, та порівняння їх з тими, що зберігаються в базі даних. Навіть якщо Wiimote не забезпечують суто тактильного зворотного зв'язку як такого, симулятор, можна розглядати як новий навчальний додаток для домашніх умов завдяки його низькій вартості, яка становить близько 180 доларів США.

Симулятор SINERGIA – це ще одна система, яка входить у сферу систем оцінки для лапароскопії. Створили SINERGIA для забезпечення віртуального рішення з освітнім підходом. SINERGIA дозволяє користувачам керувати камерою, захоплювати, тягнути, різати, препарувати та накладати шви у віртуальному середовищі. Він був створений за допомогою фреймворку Blender, а його робоча станція складається з монітора та двох тактильних пристроїв з хірургічними захоплювачами як обробниками. В області апендектомії створили віртуальну систему для оцінки рівня кваліфікації учнів. Симулятор надає віртуального консультанта, який інструктує користувачів, коли під час симуляції

відбуваються неправильні дії. Система записує дані навчання під час віртуальної процедури, щоб відстежувати процес навчання користувача. Ці дані використовуються для визначення рівня кваліфікації учнів, застосовуючи алгоритми машинного навчання. У цьому випадку використовуються HMM та FL.

Інші симулятори зосереджені лише на керівництві та допоміжному обслуговуванні. Розроблено симулятор резектоскопа, метою якого є допомогти користувачам зрозуміти маніпулювання інструментами та органами під час резекції міоми. Система спрямовує користувача під час симуляції. Користувачі повинні взаємодіяти з чотирма цілями, по одній за раз. Цільова точка залишається червоною, доки користувач успішно не торкнеться її. Симулятор зберігає час операції, результати цілей та помилки; однак ці дані не відображаються студенту. Додавши додаткові параметри оцінювання до системи, автори змогли забезпечити належну оцінку, щоб дати зворотний зв'язок про навчання після сеансів, що може покращити розуміння та знання користувача в цьому типі операцій. Розроблено відео-лапароскопічні навчальні вправи та розробили систему eLaparo4D. eLaparo4D був побудований як сервер додатків node.js, і він використовує HTML5 з плагіном двигуна Unity3D, щоб надати користувачам онлайн-платформу. Автори використовували фреймворк Blender для графічного рендерингу. Для тактильної взаємодії використовуються три тактильні пристрої Geomagic Touch. Два використовуються як обробники інструментів (захоплювач, гачок або ножиці), а третій використовується для переміщення камери у віртуальній черевній порожнині. Цей підхід намагається імітувати реалістичну взаємодію лапароскопічного обладнання. Використовували плату Arduino, підключену до вібраційного двигуна, для покращення тактильного зворотного зв'язку у вигляді вібрації. Крім того, eLaparo4D має модуль для дистанційного керування. Це керівництво може надаватися через Інтернет, щоб показати студентам правильний спосіб виконання критичного завдання; однак, необхідно використовувати інший симулятор eLaparo4D. Бали розраховуються таким чином, що кожна вправа має дозволені та недозволені дії, що додає або віднімає бали. Нарешті, у симуляторі

реалізовано профілі користувачів для перевірки прогресу користувача з плином часу.

Однією з найбільш використовуваних систем на комерційних станціях є станція da Vinci, виготовлена Intuitive Surgical. Її вартість становить близько 1,5-2 мільйонів доларів США. Оцінено, чи можна застосовувати систему в навчальній програмі. Використовували систему симулятора навичок da Vinci. Симулятор навичок da Vinci забезпечує оцінку виконання завдань за допомогою вікторин та показників оцінки під час симуляції. Крім того, симулятор скеровує користувачів, надаючи інструкції на екрані, візуальні підказки та маркери для прицілювання під час симуляції. Для цього курсу необхідно оцінювати такі завдання: керування камерою, стискання, рукоятка EndoWrist, введення голки, коагуляція енергії та дисекція. Результати виконання показали, що учасники отримали 80 або вище балів за завдання, а тестування користувачів після завершення підкреслило прийняття симуляторів у навчальних курсах.

Ще однією комерційною станцією для лапароскопії, яку можна знайти на ринку, є SimSurgery. Її розробила компанія Nissen. Оцінено цю систему, щоб перевірити її зручність використання для навчальних курсів. SimSurgery складається з екрана та двох лапароскопічних інструментів, які забезпечують зворотний зв'язок по силі, щоб забезпечити максимальний реалізм у симуляторі. Під час віртуальної процедури користувачеві надаються екранні інструкції. SimSurgery використовує методи виявлення зіткнень, які використовуються для оцінки виникнення зіткнень між інструментами. Якщо такий тип зіткнення трапляється під час сеансу, симулятор виводить на екран червоне попередження. Цей тип візуальної допомоги був впроваджений, щоб навчити користувачів правильно працювати під час реальних операцій. В кінці симуляції час, зіткнення інструментів та траєкторія руху наконечника використовуються для оцінки процедури та виставлення балів. Дослідження підтверджують, що користувачі, які виконують операції за допомогою традиційних, комп'ютерно-асистентних або робототехнічних підходів, повинні виконувати запуски у віртуальних середовищах, щоб забезпечити свій рівень попереднього досвіду в цьому завданні. Це твердження може бути підтверджено де виявили, що досвідчені

користувачі лапароскопії уповільнили свою роботу, щоб адаптуватися до нових методів або технологій у хірургії.

Що стосується комерційних станцій, які використовуються для навчання хірургів-початківців специфічним навичкам маніпулювання хірургічними станціями, RoSS дозволяє тренувати моторні та когнітивні навички, необхідні для роботи з хірургічним роботом da Vinci. Simulated Surgical Systems продають його. Використовували цю робототехнічну систему навчання для оцінки її здатності розвивати когнітивно-моторні навички. RoSS надає інтегровану систему управління, яка зберігає показники для всіх користувачів та завдань, що виконуються на цій платформі. У симуляторі запрограмовано шістнадцять модулів. Для допомоги симулятор надає візуальні підказки на екрані, щоб допомогти студентам під час виконання завдання. Для оцінки продуктивності користувачів враховуються спритність бімануального руху, критичні помилки, безпека в операційному полі та час виконання завдання. Оцінки генеруються за шестибальною шкалою (перескладання, погано, середній, хороший, експерт та чудовий). Переваги, які RoSS надає користувачам, полягають у можливості налаштування та в тому, що це портативна, автономна консоль.

Роботи, засновані на модифікаціях комерційних систем, також можна знайти в лапароскопії. Адаптовано симулятор лапароскопічної хірургії LS500 з тактильним зворотним зв'язком, що продається компанією Xitac. Модифікація була зосереджена на інтеграції навчального програмного забезпечення Lap Mentor, розробленого Simbionix, у систему LS500. Lap Mentor складається з двох режимів роботи: тренування навичок та процедурного навчання. Режим тренування навичок дозволяє користувачам практикувати фундаментальні навички в неанатомічному середовищі. Другий дозволяє стажерам практикувати лапароскопічну холецистектомію на віртуальному пацієнті. В обох режимах оцінюється рівень компетентності користувачів, і Lap Mentor надає бали за кожне завдання. Симулятор дозволяє користувачам переглядати відео, 3D-карти та навчальні посібники для покращення навчального процесу. Нарешті, Lap Mentor зберігає сеанси користувачів, щоб надавати графіки та часові шкали кривих навчання студентів.

Інша робота, заснована на модифікаціях існуючих середовищ. Автори адаптували симулятор FLS для педіатричних цілей. Новий підхід називається Педіатрична лапароскопічна хірургія (PLS). PLS – це багатопортовий бокс-тренажер. Модифікували його для використання в SILS-порті, виготовленому Covidien. Тестери виконали чотири завдання: перенесення штифтів, вирізання шаблону, освітлювальну петлю та внутрішньокорпоральне зшивання. Використовуючи SILS-порт, PLS можна адаптувати для недорогого та низькобюджетного навчання лапароскопічній хірургії з одним портом.

Більше того, у дослідженнях, пов'язаних з FLS, перевірили його корисність, адаптувавши та поєднавши його в середовищі магнітного резонансу (МРТ). Завдання в FLS оцінюються на основі швидкості та точності; однак, штрафні бали вираховуються, якщо в симуляції виникають помилки. У цьому експерименті замінили всі металеві частини FLS, щоб створити підхід МРТ. У цьому тесті для оцінки розумової активності користувача було проведено сприйняття глибини, перенесення кілочка та зав'язування вузла на мотузці. Результати вказали на взаємозв'язок між мозком та поведінкою під час виконання завдань. Це свідчить про те, що динамічні зміни в кортикальних мережах відбуваються внаслідок навчання. Цей нещодавно впроваджений додаток FLS може допомогти навчальним закладам зрозуміти, як розвивається навчання резидентів або новачків, та змінити або створити нові освітні курси чи курси з лапароскопії.

Розроблено модуль оцінки навичок та керівництва для комп'ютерного симулятора лапароскопічних процедур. Автори використовували комп'ютерний хірургічний тренажер (CAST). Симулятор забезпечує візуальне та тактильне керівництво завдяки раніше розробленим модулям, які реалізують віртуальні прилади та візуальні засоби. У цьому дослідженні автори використовували адаптивну нейро-нечітку систему логічного висновку для оцінки користувача. Вони використовували шість показників оцінки для оцінки продуктивності: середня швидкість, час виконання, довжина шляху, час простою, коефіцієнт відхилення та коефіцієнт профілю напрямку. Для тестування запропонованого модуля сорок два учасники протестували середовище. Завдання полягало в тому,

щоб рухатися по рекомендованій траєкторії та торкатися кількох цілей. Автори виявили, що модуль є доцільним для оцінки лапароскопічних навичок; однак вони досліджуватимуть кращий метод для оцінки виконаного завдання.

ЛОР-процедури. ЛОР процедури, також відомі як отоларингологія, – це хірургічна галузь, яка оцінює та лікує широкий спектр захворювань голови та шиї, включаючи області вуха, носа та горла. Зосереджено роботу на забезпеченні показників та зворотного зв'язку щодо ефективності в симуляторі мастоїдектомії. Цей симулятор навчає тактильним, анатомічним та когнітивним аспектам, що зустрічаються в цій операції. Тактильні пристрої використовуються для взаємодії та відчуття зворотного зв'язку по силі в симуляції. Автори вирішили використовувати фреймворк Chai3D, який є рішенням на C++, що включає тактильні бібліотеки. Допоміжні засоби та візуалізації, такі як кольорові маркери, використовуються для виділення відповідних частин сеансу. Сеанси оцінюються для забезпечення оцінки та записуються в базу даних. Дані сеансу використовуються для створення відео процедури. Надаючи відеопідтримку, симулятор дозволяє користувачам орієнтуватися в ньому, щоб визначити, де вони отримали низькі бали, та належним чином перевірити їх, щоб покращити свою продуктивність.

Інші рішення зосереджені на хірургії скроневих кісток. Комерційним симулятором для цієї операції є Voxel-Man Tempo. Оцінено цю систему, щоб оцінити її використання для репетицій. Voxel-Man Tempo надає можливості для самостійного навчання та пропонує сім попередньо визначених навчальних випадків середнього вуха з різною анатомією та патологією. Цікавою особливістю програмного забезпечення є те, що воно має модуль завантаження. Він дозволяє користувачам завантажувати дані КТ для розширення бази даних хірургічних операцій. Для взаємодії використовуються два тактильні пристрої Geomagic Touch для покращення тактильного досвіду. Що стосується візуалізації, програмне забезпечення надає функції руху камери, такі як різні вікна перегляду, які дозволяють користувачам правильно орієнтуватися під час віртуальної операції. Воно включає автоматичну оцінку навичок, де можна об'єктивно оцінити процес та знання учня. Оцінювання базується на попередньо

визначених завданнях, а звіт генерується в кінці кожного сеансу. Автори заявили, що оскільки Voxel-Man пропонує підхід до проблемно-орієнтованого навчання (PBL), він підходить для створення нових реалістичних сценаріїв.

Ще одне дослідження, зосереджене на хірургії скроневої кістки. Оцінено інший комерційний симулятор, Visible Ear. Він забезпечує 3D-симуляцію, яка використовує один тактильний пристрій Geomagic Touch для навчання дисекції в області скроневої кістки. Він дає об'єктивну оцінку, де бали ефективності розраховуються з урахуванням об'єму видаленої кістки, часу операції та зіткнень. Зіткнення з твердою мозковою оболонкою, лицьовим нервом, внутрішнім вухом, стременцем, молоточком та ковадлом є тими, що вважаються факторами, що знижують отриманий бал у завданні. Visible Ear керує процесом за допомогою інструкції у вікні. Ця інструкція пояснює користувачам дії, які вони виконують. Для допомоги використовуються спливаючі попереджувальні повідомлення під час свердління, щоб навчити студентів діям, яких слід уникати під час реальних операцій.

Навіть попри те, що комерційні симулятори забезпечують практичні середовища, їм все ще бракує педагогічних функцій, необхідних для належних медичних навчальних програм. Медичні заклади розробили як симулятор Voxel-Man Tempo, так і симулятор Visible Ear. Вони були змодельовані з урахуванням освітніх потреб студентів під час симуляцій. Тому дослідникам слід зосередити свою увагу не лише на створенні симуляторів, але й на впровадженні педагогічних підходів для забезпечення комплексних рішень у медичній науці.

ВФ також застосовуються в ЛОР-дослідженнях. Використовували їх для створення алгоритму, який буде задіяний у робот-асистованій хірургії для вставки кохлеарного імплантату. ВФ використовуються в цій роботі як обмеження під час процедури. Систему можна адаптувати для використання анатомії пацієнта шляхом введення даних оптичної когерентної томографії (ОКТ) до та під час операції. ОКТ отримують за допомогою сканера об'ємного сканування та зонда бічного огляду. За допомогою цього обладнання отримують зображення та реєстрацію кохлеарного просвіту. Робот-асистована система, яку вони використовували. Ця установка одночасно контролюється оператором та

роботом-маніпулятором, щоб вирішити, де будуть розміщені інструменти. Для візуалізації оператор використовує хірургічний мікроскоп під час операції. Щоб перевірити це рішення, використовували імплантат Nucleus 24 Contour Advance Practice Electrode, який продається компанією Cochlear. Процедуру порівнювали з ручними операціями та робот-асистованими підходами, які не використовують ВФ. Вілкенінг та ін. Результати показують, що, використовуючи віртуальні функціонали (ВФ), користувачі можуть підвищити свою точність та прецизійність.

Ендоваскулярні процедури. Ендоваскулярна хірургія була в центрі уваги багатьох недавніх досліджень завдяки своїм перевагам, таким як невеликі розрізи, менша крововтрата, швидше відновлення порівняно з традиційними операціями. У цій галузі розробили навчальну симуляцію на основі ВП для навігації по артеріях серця. Симуляція була розроблена за допомогою Chai3d, де тактильний пристрій Novint Falcon використовується для навігації кінчиком катетера всередині артерій серця. Катетер моделюється як навігаційна сфера, а артерії побудовані з використанням циліндричних та кутових елементів. Для забезпечення наведення ВП базується на траєкторії, згенерованій середньою точкою, з використанням наведення силового поля та обмежень забороненої області з візуальними підказками. Дванадцять учасників протестували середовище. Результати показують, що їхня продуктивність покращилася. Вони покращили точність виконання завдань, і було досягнуто коротких термінів виконання завдань у процедурах слідування за шляхом.

Розробили та впровадили систему ендоваскулярного симулятора. Автори використовували тактильний пристрій Geomagic Touch для розробки навчання навігації катетером. Використано Unity для розробки симуляції, і вони забезпечують візуальну допомогу під час навчання через модуль сповіщень. Крім того, автори додали телекомунікаційну систему для забезпечення функцій телеоперації або теленавчання. Протестували навчальний симулятор внутрішньо; тому не було повідомлено про результати експертної валідації чи сприйняття користувачами.

Урологія. Перевірено комерційний симулятор трансуретральної простатектомії (ТУРП). У цьому дослідженні було використано систему TURP Mentor. Вона розроблена Simbionix. TURP Mentor надає освітній контент та відео, що ілюструють основні процедурні методики. Вона надає звіти зі зворотним зв'язком та об'єктивну оцінку ефективності, використовуючи додаткові оцінки, визначені експертами. Як і інші комерційні рішення, програмне забезпечення може забезпечувати відтворення сеансів для подальшого обговорення та перегляду. Нарешті, для управління користувачами воно дозволяє викладачам візуалізувати статистику ефективності користувачів або груп, щоб зрозуміти, як працюють користувачі або класи; таким чином, вони можуть планувати уроки, щоб охопити певні теми для покращення індивідуальної або групової ефективності.

Колоректальні процедури. Колоректальний рак – це тип раку, який починається в товстій або прямій кишці. Ці види раку також можна назвати раком товстої або прямої кишки, залежно від того, де вони починаються. Більшість випадків колоректального раку починаються як наріст на внутрішній оболонці товстої або прямої кишки. Для покращення лікування колоректального раку слід проводити ректальне дослідження. У цій галузі розробили систему доповненої реальності для цифрової візуалізації прямої кишки. Додаток використовує датчики для відстеження рухів пальця та прикладеного тиску під час використання настільної моделі та Microsoft HoloLens. Система може відображати продуктивність та основні показники на реальній настільній моделі за допомогою пристрою доповненої реальності. HoloLens використовується для візуалізації внутрішніх компонентів настільної моделі та накладання відповідної віртуальної анатомії.

Для колоректальної хірургії ринок зосереджується на симуляторі PROMIS, який продається компанією CAE Healthcare. Це віртуальний симулятор, який забезпечує точний та вичерпний зворотний зв'язок щодо продуктивності. Апаратна модель PROMIS є реплікою черевної порожнини. Її можна модифікувати за допомогою одноразових та багаторазових компонентів, розміщених всередині моделі. Вона має функції віддаленого доступу, що

дозволяє проводити спільне навчання в PROMIS. Використовували станцію PROMIS для оцінки ручної лапароскопії (HAL) порівняно з типовим підходом (TA). Звичайна лапароскопічна хірургія проводилася з використанням PROMIS у звичайній конфігурації; однак для HAL вона була адаптована з камерами, встановленими всередині черевної порожнини. Результати показують, що тести HAL проводилися швидше без різниці у внутрішньоопераційних помилках, ніж тести TA.

2.2 Програмні рішення для хірургічних і спеціалізованих роботизованих систем

Ортопедія. Моделювання в цій галузі охоплює стандартні процедури. Наприклад, у дослідженні використовувалися комп'ютерні томографи (КТ) реальних пацієнтів для фіксації педикулярними гвинтами в хірургії хребта. Було використано власне програмне забезпечення для комп'ютерної томографії, розроблене авторами в їхньому попередньому дослідженні. Ці КТ-скани, у співпраці з програмним забезпеченням, використовуються для створення флюороскопічних зображень поперекового відділу хребта в режимі реального часу. Цей підхід був застосований для створення інструкцій у віртуальній операції. Результати в симуляторі Рамбані та ін. базуються на часі операції, точності введення педикулярних гвинтів та кількості експозицій, зроблених користувачем для завершення процедури.

У сфері фізичного застосування, продовжили виконувати операції на плечовому поясі та плечовому сплетенні за допомогою роботоасистованих процедур. Вкористовуючи Intuitive Surgical da Vinci Si. Метою було створити малоінвазивну методику, яка дозволила б провести більш раннє дослідження та можливе відновлення протягом восьми днів після травми. Експеримент було проведено в лабораторії Intuitive Surgical. Під час цієї операції було зроблено чотири розрізи шкіри. Два з них були використані для введення роботизованих рук з відповідними хірургічними інструментами. Два інші розрізи були створені для додавання подвійної ендоскопічної 3D HD-камери. Дисекції були проведені

за допомогою робота da Vinci Si, і отримані результати можуть підтвердити, що ендоскопічний параліч надключичного плечового сплетення можливий за допомогою роботоасистованих операцій.

Інший підхід до операцій на коронарній артропластикі (КА). Оцінено, чи може система КА діяти як інтраопераційна лінійка при високій остеотомії великогомілкової кістки (ВГО). Було проліковано п'ятдесят одного пацієнта з артритом. Вони використовували техніку направляючої системи Tomofix Osteotomy System, розроблену Synthes у співпраці з модулем VectorVision Osteotomy, створеним BrainLAB. У цьому типі операції малоінвазивні одиниці розміщувалися в медіальній корі великогомілкової кістки та вентральній медіальній або вентральній латеральній стороні стегнової кістки. Використовуючи анатомічні орієнтири, система обчислює всю інформацію, необхідну хірургам для цієї операції. Екран використовується для відображення ноги та параметрів вирівнювання. Пацієнти, яких лікували за допомогою цього підходу, показали точне інтраопераційне вирівнювання кінцівок. Тому дійшли висновку, що КА ВГО забезпечує кращі результати, ніж використання поточних передопераційних планів.

Перевірено доцільність та точність систем КА для встановлення гвинтів у таз. Вони використовували навігаційну систему BrainLAB VectorVision та внутрішньоопераційну систему 3D-візуалізації ARCADIS Orbic, створену Siemens Medical Solutions. Тести були проведені на п'яти людських трупах, збережених за допомогою рішення Джоре. Обидва програмні засоби використовувалися, щоб допомогти хірургам розмістити сорок гвинтів у перший та другий хребці. Тести на точність були проведені після операції за стандартизованими протоколами КТ двома незалежними рентгенологами. Неправильне позиціонування визначалося як будь-яке проникнення гвинта в кісткові кори, незалежно від напрямку. Система КА отримала позитивні результати; іншими словами, було досягнуто повного та успішного внутрішнього припливного позиціонування гвинтів у всіх різних ділянках таза з нульовим відсотком неправильного розміщення.

Підходи можуть підтвердити необхідність використання комп'ютерної діагностики (КА) або робототехнічних технологій в хірургічних операціях. Ці системи слід вважати цінними ресурсами, оскільки вони можуть підвищити продуктивність, зменшуючи кількість неправильних позицій або помилок під час медичних операцій. Крім того, їх можна розглядати як спосіб забезпечення безпеки, коли завдання в операційних виконують менш досвідчені хірурги.

Розроблено ортопедичний навчальний симулятор для проведення хірургічного накладання пластин за допомогою малоінвазивної системи стабілізації (LISS). Симулятор може використовувати як функції віртуальної реальності, так і тактильного зворотного зв'язку. Симулятор можна застосовувати за допомогою налаштування HTC Vive для віртуального занурення. Користувач взаємодіє для виконання процедури за допомогою портативних контролерів або його можна використовувати з тактильним пристроєм Geomagic Touch. Симулятор був створений за допомогою Unity, а для реалізації можливостей віртуальної реальності було використано інструментарій Steam VR. Крім того, симулятор надає веб-функції, а для керівництва автори реалізували текстові та аудіовізуальні підказки. Симулятор пропонує навчальну станцію, де користувач може практикувати шість навчальних середовищ на основі хірургічного етапу накладання пластин за допомогою LISS.

Нарешті, у сфері видалення пухлини, зосередилися на розробці процедури комп'ютерної томографії (КА) для злоякісних пухлин кісток. Вона використовує систему КТ-навігації хребта, розроблену Stryker. КТ та МРТ аксіального, коронального та стрільцевого зображень вводяться в програмне забезпечення, яке об'єднує їх для створення даних, пов'язаних з операцією, для цілей планування. 3D-моделі, такі як моделі без пухлини, можна створювати за допомогою КТ- та МРТ-зображень. Двадцять пацієнтів з 21 злоякісною пухлиною опорно-рухового апарату лікували за допомогою КА-підходу. Аналізуючи отримані дані, автори можуть зробити висновок, що було досягнуто точної резекції пухлини в уражених кістках.

Відкрита хірургія. Накладання швів – одна з фундаментальних навичок, яку всі лікарі повинні належним чином виконувати. Почали створювати власні

рішення, щоб допомогти стажерам навчитися накладати шви. Їхня платформа використовує тактильний пристрій Geomagic Touch, пару 3D-окулярів Crystal Eyes, що продаються StereoGraphics, стереосинхронізуючий випромінювач, напівпрозоре дзеркало та металеву оправу. Для забезпечення реалістичного підходу під час моделювання можна використовувати голки різних форм. Програмне забезпечення було розроблено з використанням API Reachin, користувацьких класів та об'єктів. Для оцінки користувача враховуються час виконання завдання, площа вхідного та вихідного розриву, проникнення, кути виходу, рухи інструменту, середня кількість захоплень та плавність руху, що дозволяє розрахувати оцінку завдання, яка зберігається в базі даних продуктивності. Система також надає негайний зворотний зв'язок та об'єктивне вимірювання продуктивності під час моделювання, щоб дозволити стажерам порівнювати та вдосконалювати свої методи.

Веніпункція – ще одна типова процедура. Це процес отримання внутрішньовенного доступу для забору венозної крові або внутрішньовенної терапії. Неправильні техніки збільшують дискомфорт пацієнтів і можуть затримати терапевтику або тестування. Тому на ринку з'явилися рішення для покриття витрат на навчання венепункції. Оцінено комерційну клінічну навчальну систему на основі тактильної терапії, виготовлену UK Haptics Limited. Система складається з дисплея Reachin, пари 3D-окулярів StereoGraphics CrystalEyes та одного тактильного пристрою Geomagic Touch. Цей симулятор складається з двох модулів – управління навчанням (Clinical Skills Trainer) та навчального рішення (Virtual Veins). Кожен користувач має персоналізований обліковий запис, який дозволяє симулятору відстежувати його прогрес у часі. Після практичного або тестового сеансу створюється звіт. Звіт дозволяє користувачеві проаналізувати свою роботу, а також дозволяє користувачеві та викладацькому складу переглянути роботу студента після тестування.

Інновації в галузі мобільного навчання зазвичай представлені у формі додатків або курсів. Одним із нових застосувань на ринку є Touch Surgery. Kinosis LTD розробила цей додаток для iOS та Android. Це безкоштовне програмне забезпечення, яке дозволяє користувачам імітувати понад 30

поширених операцій на мобільному пристрої. Воно забезпечує орієнтацію та інструкції під час виконання користувачем імітованої операції. Це дозволить стажерам когнітивно впливати на кожне завдання; таким чином, студенти підвищують обізнаність про потенційні ускладнення та досвід процедури. Додаток враховує прогрес за допомогою модуля, який надає бали та оцінює знання користувачів під час їхньої роботи.

Низькозатратні рішення для навчання шукалися в усіх сферах. У хірургії кореня аорти створили портативний, недорогий симулятор багаторазового використання. Вартість всього симулятора трохи перевищує 1 долар США. Симулятор складається з тонкої коробки діаметром 9,5 см та висотою 4 см з отворами для розміщення силіконової репліки кореня аорти. Симулятор також керує навчанням, встановлюючи кругле кільце. Це кільце було розроблено з використанням картону, і воно має від п'ятнадцяти до двадцяти надрізів, щоб допомогти користувачеві під час процесу. Розробили рішення для виконання всіх видів реконструкції кореня аортального клапана, зазначених у класифікації. Процедури, які можна виконати, включають видалення ураженого аортального клапана, визначення розміру клапана та заміну різних типів аортальних клапанів (перерваних, напівбезперервних, безшовних та нержавіючих) за допомогою кругової або косої аортотомії.

Поширеною галуззю в хірургії є видалення пухлини. На печінці це зазвичай лікується за допомогою резекції печінки; проте радіочастотна абляція є ще однією гарною альтернативою. Вона вимагає точного введення голки та точної координації рук і очей. Щоб вирішити цю проблему, створили кооперативну роботизовану станцію, яка використовує керування жестами рук та доповнену реальність (AR). Доповнена реальність (AR) використовується як механізм наведення. Вона генерується за допомогою проектора, що продається ProCam, для створення накладання на тілі пацієнта , де відображається до- та під час операції інформація. Графіка підтримувалася за допомогою OpenGL 3D. Для підтримки жестів рук система використовує камеру Kinect. Симулятор також використовує власного робота, щоб допомогти хірургу під час завдання введення голки. Це новий підхід до інформації, що надається користувачеві; однак слід

провести оцінку доповнених реальностей, щоб оцінити, чи порушує цей вид допомоги сприйняття хірургами під час операцій.

Розроблено систему хірургічного навчання для перкутанної біопсії нирок. Система включає два тактильні пристрої Touch та Microsoft HoloLens для відображення голографічних зображень на основі комп'ютерної томографії. Додаток показує модель пацієнта та симуляцію тактильної пункції. Система також може записувати сеанс користувача для оцінки хірургічних навичок. У дослідженні взяли участь вісім експертів та двадцять чотири студенти. Параметри, які вони оцінювали, - це час процедури, довжина шляху ін'єкції, кумулятивний кут та кількість влучень. Нарешті, автори провели опитування щодо сприйняття. Результати дослідження показують, що система забезпечує вищий рівень занурення, ніж традиційні підходи, і група новачків покращила свої результати після періоду навчання.

Нарешті, щодо наведення за траєкторієюрозробили спільну систему практичного навчання. Автори розробили симулятор, де тренер може керувати стажером, використовуючи підхід подвійного контактного наведення для керування підлеглим інструментом. У дослідженні використовувалися три тактильні пристрої Geomagic touch, а метою було направити стажера по траєкторії та взаємодії з органами. Для забезпечення повного взаємозв'язку з n ступенями свободи використовувалися внутрішньопасивні контролери. Вони використовувалися для забезпечення кращої прозорості під час силової взаємодії та обміну енергією. Середовище було реалізовано в Matlab, і воно використовує бібліотеку Open Haptics для підключення до тактильних пристроїв. Результати цього дослідження показують, що точність та зворотний зв'язок по силі були достатніми для керівництва стажерів під час виконання завдань хірургічної навігації.

Нейрохірургія. Нейрохірургія є однією з хірургічних спеціальностей з найвищими операційними ризиками. Розробили NeuroTouch, віртуальний симулятор для навчання мікрохірургії черепа. Наразі він відомий як CAE NeuroVR. Нейрохірургічний симулятор був розроблений з використанням фізичного двигуна, системи 3D-графіки для рендерингу, пари пристроїв

Geomagic Touch Hamitic, елементів керування процедурами та двох екранів. NeuroTouch був розроблений, щоб дозволити резидентам відпрацьовувати свої навички у завданнях видалення пухлини та припікання пухлини. Ця система обчислює деформацію тканин та зміни топології відповідно до розриву, розрізу або видалення тканини. Оцінка технічних навичок, необхідних для процедур краніотомії, розраховується з використанням часу операції, помилок, сили інструментів та обсягу віртуального видалення тканини.

Створено нейрохірургічний навчальний симулятор доповненої реальності з тактильним зворотним зв'язком. Симуляція забезпечує голографічне керівництво для передопераційного навчання з використанням Microsoft HoloLens під час резекції пухлини головного мозку. Органи були реконструйовані за допомогою МРТ та воксельної залишкової мережі *VoxResNet*. Симулятор також забезпечує функції різання, деформації та кровотечі. Microsoft HoloLens забезпечує накладання інформації про приховані цільові органи за допомогою настільної 3D-друкованої моделі черепа. Використовували два сенсорні пристрої Geomagic, а симуляція була реалізована в Unity та модулі UNET. Нарешті, провели дослідження користувачів з десятьма учасниками, використовуючи анкету сприйняття для перевірки системи. Результати цього дослідження показують, що симуляція була реалістичною, вона забезпечила захопливе навчальне середовище, а взаємодія інструментів була точною.

Ще одну роботу в галузі неврології було проведено. Вони розробили нейрохірургічну навчальну програму для відновлення аневризм головного мозку в області Сільвієвої щілини. Автори використовували бібліотеку SOFA, NVIDIA Flex та Open Haptics Toolkit для розробки свого симулятора. Один тактильний пристрій Geomagic Touch використовується для забезпечення тактильного зворотного зв'язку під час процедури. Анатомічні моделі були побудовані за допомогою коронарної ангіокомп'ютерної томографії. У їхньому дослідженні користувачів просять виконати кліпування аневризми в області сонної артерії. Симулятор був перевірений досвідченим нейрохірургом, який заявив, що реалістичність деформації та візуалізації є правильною; однак необхідні додаткові валідаційні тести, щоб продемонструвати, що симулятор допомагає

студентам або резидентам покращити свої хірургічні навички.

2.3 Технології візуалізації, діагностики та інтеграції клінічних даних у AR-середовищі

Стоматологія. Методи TEL набувають поширення в усіх галузях науки, де симулятори та середовище для спільної роботи можна назвати найбільш репрезентативними підходами. У стоматології лікування карієсу є однією з найпоширеніших процедур, з якими стикаються стоматологи. Тому Косукі та Окада впровадили колаборативний симулятор з інструкціями. Симулятор був створений за допомогою IntelligentBox, фреймворку. У цьому стоматологічному симуляторі були запрограмовані такі дії, як свердління та дотик. Симулятор використовує тактильний пристрій Geomagic Touch для забезпечення зворотного зв'язку по силі. Спільне навчання розгортається завдяки модулям під назвою *RoomBox* , які розподіляють операції користувача між симуляторами. У цьому режимі симулятор постійно збирає та поширює дії на інші *RoomBox* . Ця функція дозволяє симулятору застосовувати всі дії в симуляторі в момент їх виникнення, дозволяючи користувачеві продовжувати з інструкціями в режимі реального часу та співпрацювати в рамках процедури . Незважаючи на те, що методи спільної роботи керують навчанням, вони все одно потребують присутності користувача, який може варіюватися від резидента до експерта. У випадку студентів, їм все ще бракує досвіду під час виконання завдань, а для лікарів такий підхід є трудомістким. Отже, дослідження повинні зосередитися на розробці автоматизованих або комп'ютеризованих ресурсів для забезпечення якісного та здійсненного навчання в освіті.

Ще один симулятор, знайдений у цій галузі. Створили віртуальний симулятор з підтримкою тактильної візуалізації під назвою Orthognathic Surgery System (OSSys). OSSys можна використовувати для навчання, оцінки або навіть планування ортогнатичних процедур. Система відображає три типи візуалізації - 2D, 2.5D та 3D. Симулятор був розроблений з використанням класів Microsoft Foundation Classes (MFC) Visual Studio 2010, бібліотек Visualization Toolkit

(VTK) для графічного рендерингу та H3DAPI для тактильного рендерингу. У цьому дослідженні можна використовувати Falcon, виготовлений Novint Technologies, або тактильний пристрій Geomagic Touch. Для планування OSSys розраховує відстань між визначеними користувачем маркерами, що допомагає хірургам створювати можливе розташування процедури. Він також надає ортогональні зображення для врахування всіх можливих кутів під час операції. З іншого боку, для навчання було реалізовано симуляцію шести процедур, а звіти про оцінку надаються як зворотний зв'язок. Звіти створюються з використанням часу виконання завдань та методології.

У стоматології методи КА також використовуються в імплантології. Використовували систему КА для імплантації верхньої щелепи при беззубій формі. Використовувалася система КА Simplant, розроблена DENTSPLY Implants. Були зроблені зліпки верхньої та нижньої щелеп. Планування імплантації, положення та кути були розраховані програмним забезпеченням з урахуванням кінцевого положення титанового стрижня. Ці дані були перенесені в головну модель, і автори продовжили імплантацію. Під час операції для досягнення повного контакту були потрібні лише мінімальні корекції. Результати після імплантації показали середнє апікальне відхилення 2,31 мм та середнє кутове відхилення 3,72 градуса. Цей підхід також забезпечив негайну реабілітацію нижньої та верхньої щелепи в той самий день операції.

Щодо віртуальних симуляцій, Лю та ін. оцінили систему навчання з підготовки керамічних коронок віртуальну навчальну мережеву. Симулятор надає візуальні посібники для розуміння користувачем процедури (основні положення роботи, попередньо визначені критерії та відео). Крім того, система надає інструкції за допомогою Системи навчання та оцінки стоматологічних послуг у реальному часі (RDTES) та збирає навчальні дані для оцінки роботи користувачів. У цьому дослідженні взяли участь п'ятдесят сім студентів-стоматологів, і результати показали значне покращення їхніх клінічних навичок.

Нарешті, провели дослідження для валідації комерційного стоматологічного симулятора Simodont Dental Trainer Симулятор забезпечує зворотний зв'язок. Шістдесят три учасники протестували середовище. Учасники

виконували п'ять різних завдань з використанням геометричних фігур. Вони повинні були видалити цільову зону та уникати заборонених зон під час виконання завдання. Виявили, що самої лише наявності пристроїв віртуальної реальності недостатньо для оптимального тренування моторних навичок і має поєднуватися з експертним керівництвом. Більше того, користувачі, які використовували лише зворотний зв'язок від пристрою, отримали найнижчі результати протягом усього експерименту. Це може означати, що система має простір для вдосконалення для збільшення педагогічних ресурсів на своїй платформі.

Офтальмологія. Офтальмологічні симулятори були раніше проаналізовані. Однак деякі з цих навчальних середовищ не пропонують ні модулів оцінки, ні модулів керівництва. Хірургія катаракти передбачає заміну помутнілого кришталика всередині ока штучним. У міру дорослішання людей кришталики ока починають матуватися, що порушує зір. Досліджено можливість створення віртуального хірургічного симулятора з можливостями оцінки. Він запрограмував додаток для факоемульсифікації в хірургії катаракти. Рішення складається з монітора для візуальної орієнтації та використовує тактильний пристрій Geomagic Touch для цілей взаємодії. Цей додаток можна розглядати як інструмент для моніторингу прогресу навчання та оцінки компетентності навичок. Він збирає такі дані, як час завершення створення хрестоподібної канавки, кількість тканин, видалених з кришталика, ширина та глибина розрізу та кут перетину, а також шлях фако-кінчика та сили, що застосовуються під час формування, для вимірювання операції.

У дослідженні, було розроблено симулятор екстракапсулярної екстракції катаракти. Розробили власний тактильний пристрій у формі ручки. Цей пристрій використовується з моделлю дисплея, що кріпиться на голові, електромагнітним пристроєм відстеження Aurora, ножною педаллю та фізичною моделлю штучної лінзи для навігації у віртуальному 3D-середовищі, реалізованому за допомогою Unity. У симуляторі користувач спостерігає за сценами через дисплей, що кріпиться на голові, та керує своїм зором за допомогою ножної педалі. Модель ока була створена за допомогою 3DMax, а 3D-віртуальна модель шприца із

загнутим кінчиком голки мала взаємодіяти з віртуальним оком.

З іншого боку, розробили 2D-середовище для хірургії катаракти. Програмне забезпечення Virtual Mentor Training Program (Програма навчання віртуальних наставників) забезпечує інтерактивний когнітивний симулятор для навчання гідродисекції. Прийняття рішень та розпізнавання помилок – це функції, які віртуальний наставник надає як зворотний зв'язок студентам. Крім того, він надає допомогу та посилання під час уроку. Серед студентів курсу були проведені попередні та подальші тести, а також опитування щодо задоволеності. Ці дані показали, що резиденти насолоджувалися досвідом і зазначили, що цей тип дидактичних ресурсів заохочує самостійне навчання та може покращити їхню успішність.

У цій галузі також є практичні інструменти для навчання та оцінювання. Хірургічний симулятор Eyesi, виготовлений компанією VRMagic, є одним із них. Використовували цей симулятор для вимірювання ефективності стажерів під час внутрішньоочних операцій. Було проведено пробне тренування, а потім три оцінювані спроби. Часовий ліміт кожного завдання становив двадцять хвилин, що вважається нормальним для цього типу хірургії. Eyesi рахує за допомогою системи відстеження, яка фіксує рух інструментів та ока, а також біомеханічну реакцію тканини. Eyesi надає користувачам можливість маніпулювати налаштуваннями інструментів, що дозволяє їм відчути реальну налаштування операції. Він має станцію інструктора, яка дозволяє контролювати ефективність у режимі реального часу. Система забезпечує запис сеансу та відтворення відео для перегляду віртуального процесу. Нарешті, Eyesi також може генерувати звіти для оцінки індивідуальних даних про ефективність.

У системі, розробленій цими авторами, в офтальмологічній хірургії було застосовано робототехнічну техніку. Вона складається з вібраційних обертань (ВЧ), що обертаються навколо віддаленого центру руху (ВЦР), який є точкою розрізу в цьому типі операції. П'ять субмікронних прецизійних п'єзоелектричних актуаторів забезпечують ВЧ. Новизна системи полягає в тому, що ВЧ можна регулювати до або під час процедури, що покращує орієнтацію та безпеку під час операцій. Однак, один з моментів, який слід враховувати в системах, що

використовують регулювання, полягає в тому, що ця дія повинна виконуватися автоматично під час процесу, щоб уникнути відволікання хірурга.

Педіатрія. Видалення пухлини печінки, головним чином гепатобластоми, у дітей не є стандартною процедурою; однак, вона становить 0,2% від кількості операцій при дитячих злоякісних новоутвореннях. Лікарі в цій галузі зараз обговорюють найкращий підхід до її хірургічного лікування. Відповідно, дослідники зосередили свою увагу на розробці технологічних рішень. Однією з робіт у цій галузі є робота, де використовували технологію комп'ютерної томографії (КА) для планування складних операцій на пухлинах печінки. Використовували комерційне допоміжне програмне забезпечення під назвою LiverAnalyzer, створене Fraunhofer MEVIS. LiverAnalyzer використовується для обробки даних з поперечних КТ-зображень. Цей аналіз надає індивідуалізовану анатомічну інформацію про печінку, включаючи пухлини, судинні структури та залишки печінки після завдання. Шістдесят три дитини були обстежені для цієї КА-хірургії, і результати показали, що КА-системи можуть відігравати важливу роль у процесі прийняття рішень щодо хірургії гепатобластоми.

Ще однією галуззю педіатрії, яка демонструє досягнення в симуляторах, є фетальна терапія. Одним з найсерйозніших методів лікування, що проводяться в цій галузі, є синдром близнючої трансфузії (СФТТ). СФТТ – це серйозне ускладнення, яке зазвичай лікується за допомогою фетоскопічної лазерної хірургії. Його рівень успішності становить від 60% до 70% для порятунку обох близнюків і від 80% до 90% для порятунку принаймні одного близнюка. Розробили високореалістичний симулятор, щоб хірурги могли практикувати фетоскопічну лазерну хірургію. Система була побудована шляхом адаптації симулятора. У цьому симуляторі було вставлено реалістичну модель монохоріальної плаценти близнюків та моделі плодів близнюків. Крім того, силіконовий інтерфейс у верхній частині моделі використовувався для імітації черевної стінки. Всі ці модифікації дозволили симулятору забезпечити реально орієнтовану архітектуру. Як показник оцінки використовувався консенсус Дельфі, де два незалежні спостерігачі оцінювали процес. Результати, отримані в

цьому дослідженні, можуть вказати на те, що це реалістичне середовище покращує ефективність процедури в стандартизованій моделі.

Радіологія. Віртуальні середовища пропонують нові альтернативи навчанню в променевій терапії (РТ). Створили MITIE, середовище для імерсивного навчання візуалізації. Додаток дозволяє студентам РТ практикувати рентгенографічні процедури поза межами звичайної радіографічної лабораторії. MITIE використовує бібліотеку Quest3D для візуалізації віртуальної сцени. Використовуючи золотий стандарт, визначений викладачем, MITIE дозволяє студентам порівнювати свою ефективність та знання за допомогою педагогіки PBL. Система забезпечує автоматизований зворотний зв'язок, такий як відтворення. Крім того, відео використовується для виділення помилок та вказівки на потенційні покращення. З іншого боку, запрограмували віртуальну процедурну кімнату RTStar, яка надає низку симуляцій та візуалізації, що використовуються в радіології. RTStar був створений з використанням C++ та OpenGL для графічного рендерингу. Спочатку RTStar використовувався для навчання та інтерактивної, наразі RTStar надає візуальне попередження, коли під час симуляції може статися зіткнення між гентрі лінійного прискорювача, кушеткою та пацієнтом.

2.4 Висновки по розділу

У другому розділі було досліджено методи та інструменти розробки AR-систем для хірургічного навчання та робототехніки. Розглянуто методи реалізації AR-систем для ендоскопічних та малоінвазивних процедур, що дозволяють забезпечити точну візуалізацію та підтримку навчального процесу. Проаналізовано програмні рішення для хірургічних і спеціалізованих роботизованих систем, які забезпечують інтеграцію апаратних та програмних компонентів. Також досліджено технології візуалізації, діагностики та інтеграції клінічних даних у AR-середовищі. У результаті визначено ефективні підходи до створення сучасних AR-рішень для медичної освіти та робототехніки.

РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА, ІНТЕГРАЦІЯ ТА ОЦІНЮВАННЯ AR-СИСТЕМИ ДЛЯ НАВЧАННЯ ХІРУРГІЇ

3.1 Методи та метрики оцінювання ефективності AR-систем

Збір даних для хірургічних симуляторів віртуальної реальності залежить, перш за все, від датчиків положення пристрою тактильного зворотного зв'язку, які повертають дані про переміщення та обертання на основі 3D-положення обробника тактильного пристрою. Коли положення обробника тактильного пристрою відоме, можна виконати відображення з фізичного простору у віртуальний простір. Після того, як положення обробника тактильного пристрою у віртуальному просторі відоме, можна розрахувати, яку силу слід встановити, який кут різання, чи було розрізано здорові тканини тощо. Отримані необроблені дані - це положення обробника тактильного пристрою. Розробники повинні правильно інтерпретувати ці значення та виводити з них метричні значення.

Дизайн метрик оцінювання. Розробка адекватних показників оцінки передбачає тісну співпрацю між інженерами та хірургами. Досвід та практичні знання хірургів необхідно перетворити на цінні показники оцінки. Окрім цієї взаємодії, самі розробники повинні отримати базові знання про хірургічну процедуру, для якої буде розроблено хірургічний симулятор. Описують загалом три різні підходи до створення показників продуктивності. По-перше, існує можливість співпраці з медичними експертами для імітації показників, які зараз використовуються для вимірювання експертизи. Другим варіантом було б ознайомлення з літературою про хірургічні симулятори та використання показників, описаних у цих публікаціях. Нарешті, існує можливість розробки нових показників для розрізнення різних рівнів експертизи. Звичайно, також можливо використовувати комбінацію згаданих вище підходів. Показники продуктивності також можна групувати на основі завдання, яке потрібно оцінити, як це стосується iDental, стоматологічного симулятора. Загалом за допомогою iDental можна навчити три процедури. Перше завдання - перевірка зондування кишені. Під час цього завдання реєструється глибина кишені,

максимальна контактна сила та кут зондування. Ці показники можна отримати за допомогою пристрою тактильного зворотного зв'язку. Другим завданням є виявлення каменів, де показниками є кількість виявлених каменів та повідомлене значення положення та розміру каменю. Для останнього завдання вимірюється видалення каменю, кількість видалених каменів, пошкодження сусідньої ясен та кут операції зонда. Розроблено показники оцінки для базових та просунутих нейрохірургічних навичок для п'яти різних завдань. Ці завдання включають правильне введення шлуночкового катетера, локалізацію та ідентифікацію клиноподібного отвору, видалення пухлини, проведення гемостазу та дисекції павутинної оболонки для видалення менінгіом конвексної форми. Застосовані показники ефективності поділяються на три категорії: результат, ефективність та помилки. Показники ефективності результату включають розміщення кінчика катетера в шлуночковій системі, локалізацію клиноподібного отвору, відсоток резекції пухлини, досягнуто чи ні гемостазу та відсоток перерізаних смуг. Метрики ефективності включають кут перфорації на поверхні, час, необхідний для виконання завдання, відстань, пройдена для досягнення гирла, час, необхідний для досягнення гирла, довжину шляху, об'єм крововтрати та довжину шляху кінчика інструменту. Для метрик похибки ефективності перевіряється, чи отвір від жерна знаходиться за межами допустимої області, кількість разів, коли було застосовано надмірну силу, відсоток видаленої здорової тканини, кількість розірваних смуг, відхилення від довжини шляху кінчика інструменту, заданої експертом, та об'єм пошкодженої здорової тканини. Нарешті, запропонували ряд метрик для резекції пухлини головного мозку. Ці метрики - відсоток видаленої пухлини головного мозку, об'єм видаленої змодельованої нормальної тканини головного мозку, довжина шляху кінчика інструменту, час, необхідний для резекції пухлини головного мозку, частота активації педалі, сума прикладених сил і, нарешті, смуга пропускання сили.

Генерація показників оцінювання. Метрики оцінювання хірургічних симуляторів можна розділити на дві категорії: якісні та кількісні. Щоб хірургічний симулятор вважався прийнятним, його ключові компоненти повинні бути оцінені позитивно. Визначено ці компоненти як точність візуального та

тактильного зворотного зв'язку, стабільність, продуктивність у режимі реального часу та зручність використання. Загальним підходом до оцінювання хірургічного симулятора щодо цих компонентів є проведення якісної оцінки. Під час такої оцінки формується група користувачів, що складається з новачків з обмеженим хірургічним досвідом та хірургічних експертів. Група користувачів має час ознайомитися з хірургічним симулятором та виконати хірургічну процедуру, коли вони звикають до симулятора. Після цього вони заповнюють анкету, щоб оцінити кожне питання за шкалою Лайкерта. Наразі немає єдиного підходу до суб'єктів, які повинні бути включені до анкети, або до обсягу питань. Як наслідок, якісні валідаційні дослідження різняться за кількістю питань, обсягом питань, кількістю учасників, часткою медичних експертів, стажерів тощо. На відміну від якісних метрик, існують також кількісні метрики. Ці показники можна виміряти та вони можуть варіюватися від оцінки покращення, отриманої за результатами попередніх та подальших тестів, до часу операції, пошкодження кровоносних судин, пошкодження ребер, перфорацій чашечно-тазової системи, пошкодження воронки та кількості проколів голкою. Ці показники можна використовувати для оцінки як хірургічного симулятора, так і прогресу стажера, і вони змінюються залежно від цільової хірургічної процедури. Для кількісного методу важливо покладатися на визначення критичних параметрів з цільового завдання та специфікацію кількісних показників для цих параметрів. Нарешті, продуктивність симулятора також можна оцінити, провівши порівняльне дослідження між розробленим симулятором та комерційно доступними симуляторами [6]. Порівняно з VR-симуляторами, існують додаткові показники для AR- та MR-симуляторів щодо точності реєстрації зображень та відстеження. За даними, помилка реєстрації опорних точок (FRE), помилка локалізації опорних точок (FLE), помилка реєстрації цілі (TRE), помилка накладання (OR) та помилка інструменту (OR) є ключовими характеристиками AR-системи та їх необхідно враховувати під час оцінки AR-систем. Через тісну схожість між системами доповненої реальності (AR) та магнітно-резонансної томографії (MR), ці показники також можна використовувати для оцінки MR-систем.

Автоматизовані платформи зворотного зв'язку. Сьогодні дослідження

вийшли за рамки генерації метрик і поширилися на автоматизовані платформи зворотного зв'язку. Такі автоматизовані платформи зворотного зв'язку для хірургічних симуляторів віртуальної реальності були представлені. Використовують алгоритми машинного навчання з учителем, щоб навчити систему розрізняти новачків та експертів у галузі нейрохірургії на основі попередньо вибраних метрик. Вони навчили лінійну машину опорних векторів (SVM) на базі даних з 50 учасників. Кожен учасник був віднесений до однієї з двох категорій, тобто новачок або експерт. Група експертів складалася з 28 учасників, група новачків - з решти 22 учасників. Чотири метрики були вилучені з записаних даних та використані для класифікації. Ці метрики були відібрані шляхом комбінування прямого та зворотного вибору ознак. Включення штучного інтелекту в оцінку метрик продуктивності хірургічних симуляторів віртуальної реальності та класифікацію їх користувачів відповідно до їхньої продуктивності також розглядалося в низці недавніх досліджень. Хірургічні симулятори віртуальної реальності знаходяться на перехресті медицини, науки та освіти. Вінклер-Представлено контрольний список Машинного навчання для оцінки хірургічної експертизи (MLASE) для оптимізації звітності досліджень хірургічного моделювання у віртуальній реальності та штучного інтелекту в цих дисциплінах. Використовували контрольний список MLASE для свого дослідження з ідентифікації хірургічних та оперативних показників, вибраних алгоритмами машинного навчання, щоб отримати точну класифікацію фахівців з хірургічного моделювання у віртуальній реальності за рівнем їхньої експертизи. У дослідженні 50 учасників були розділені на чотири рівні експертизи (тобто експерти, старші, молодші та студенти-медики). Кожен виконав нейрохірургічну резекцію пухлини у віртуальній реальності та повторив представлений сценарій п'ять разів. Були використані чотири різні алгоритми машинного навчання: алгоритм K-найближчих сусідів, наївний алгоритм Байєса, алгоритм дискримінантного аналізу та алгоритм машини опорних векторів. Алгоритм K-найближчих сусідів досяг найвищої точності з 90% та шістьма показниками продуктивності. У дослідженні, де вони проводили операції на хребті на хірургічному симуляторі віртуальної реальності. Метою дослідження

було виявлення нових показників хірургічної ефективності, які допомагають класифікувати дві групи з різним рівнем підготовки та перевірити, чи можуть різні алгоритми машинного навчання класифікувати рівень хірургічної підготовки людини як старшого або молодшого. Загалом було обрано дванадцять показників для класифікації старших та молодших учасників. Оскільки ці показники були отримані за допомогою методу опорних векторів, вони, ймовірно, найкраще працюють для методів опорних векторів. Таким чином, чотири інші алгоритми (тобто лінійний дискримінантний аналіз, K-найближчі сусіди, наївний байєсівський аналіз та дерево рішень) були навчені на цих метриках. З цих алгоритмів лінійний дискримінант та K-найближчі сусіди показали прийнятну точність. Нарешті, використали штучну нейронну мережу для класифікації користувачів на основі їхньої ефективності процедури передньої шийної дискектомії та спондилодезу на хірургічному симуляторі віртуальної реальності. Загалом було 21 учасник, розділений на три групи: післярезидент, старший та молодший. Метрики, що використовувалися для навчання нейронної мережі, були отримані шляхом консультацій з хірургічними експертами з опублікованих робіт, що стосуються поперекової дискектомії. Зрештою, автори розробили нові метрики на основі різних компонентів хірургічних навичок. Загалом було використано шістнадцять метрик. Їхня штучна нейронна мережа може класифікувати учасників на одну з трьох груп (тобто резиденти, старші та молодші) з точністю 83,3%.

3.2 Апаратне забезпечення та сенсорні компоненти AR-комплексів

У хірургічних навігаційних системах сцени на основі доповненої реальності (AR) вимагають безперебійної взаємодії між реальним та цифровим світами, що збільшує потребу в точному відстеженні руху за допомогою механізмів на основі маркерів або місцезнаходження. Часто оцінка пози за допомогою відстеження руху дозволяє користувачеві виконувати точні маніпуляції з інструментами та геометрично позиціонувати кінцеві ефектори для вирізання, окреслення та вилучення анатомічних орієнтирів, таких як плечова

лопатка або внутрішні органи. Тригери на основі місцезнаходження можуть використовуватися разом із, серед іншого, датчиками оцінки пози, такими як IMU, які забезпечують кілька вимірювань, таких як прискорення, сила географічного розташування конкретного клінічного персоналу через екрани доповненої реальності, такі як смартфони, HMD та навіть розумні окуляри [33]. Ці маркери забезпечують основу для початкового вирівнювання віртуального світу з реальним світом відносно загальної системи відліку, що знаходиться поруч із цільовим об'єктом.

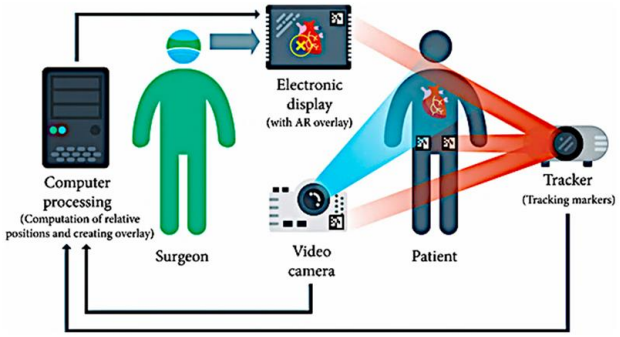

Рисунок 3.1 - Процес відстеження під час вирівнювання AR між пацієнтом і пристроєм.

На відміну від систем калібрування AR на основі маркерів, які використовують попередньо визначені маркери відстеження, такі як QR-коди, для впровадження об'єктів у реальну сцену, безмаркерні системи, як правило, дозволяють використовувати зручні орієнтири для позиціонування об'єкта в просторі. Вони працюють, експериментуючи з різними текстурами шкіри людини, внутрішніми структурами судин та геометричними особливостями медичних зразків пацієнта. Користувач може задавати розташування моделі та переміщатися по скануванню, не обов'язково порушуючи зовнішні аспекти своїх орієнтирів, зіставляючи ретрансльовані дані з акселерометрів та візуальних, тактильних та нюхових датчиків, а також систем GPS. Такі моделі AR залежать від алгоритмів комп'ютерного зору, таких як згорткові нейронні мережі (CNN), для сприйняття цільових об'єктів без опорних маркерів, які іноді навчаються за допомогою програмного забезпечення під назвою TenrorFlow API. Конкретні

точки прив'язки передаються через такі нейронні мережі в режимі реального часу, завдяки чому точні позиції використовуваного автомобіля можуть бути перевірені та валідовані в інших експериментальних процедурах.

Існує безліч датчиків, інтегрованих у роботизовані платформи для шин. Виявлення точних місць розташування під час хірургічної процедури, починаючи від ультразвукових датчиків [35], механічних датчиків [36] та електромагнітних (EM) датчиків [36] до оптичних датчиків відстеження [37]. Сьогодні найвідоміші датчики для систем хірургічної навігації з візуальним керуванням включають оптичні та мікро - датчики відстеження. Системи відображення доповненої реальності (AR) вимагають інтегрованого механізму відстеження камери, який включає реєстрацію положення та напрямку голови. Цей процес може виконуватися за допомогою різних окремих датчиків або їх комбінації, з широким спектром застосування в клінічному секторі, наприклад, таких пристроїв, як Polaris та MiniBird, які кріпляться до голови хірурга для точної одночасної локалізації та картографування (SLAM). Це процес, за допомогою якого хірургічний роботизований інструмент може створювати та генерувати карту без зіткнень та одночасно визначати своє точне місце розташування за допомогою карти. Він використовує різні методи фільтрації, такі як фільтри Калмана (KF), фільтри частинок та SLAM на основі графіків. Ряд алгоритмів машинного навчання [38] використовується в розробці навігаційної структури в дискретному часовому просторі станів, таких як неароматизований KF, який апроксимує розподіл станів за допомогою гаусової випадкової величини, де апостеріорне середнє та коваріація фіксуються для поширення через нелінійну систему; розширений KF для подолання припущення лінійності для наступного ймовірнісного стану; та послідовні алгоритми Монте-Карло для фільтрації шляхом оцінки зразків траєкторії. Інші графічні методи SLAM використовують метод формулювання графів від вузла до вузла, де бекенд дозволяє коригувати позу робота для створення незалежної топології робота, як пояснюється в [39]. Найпоширеніший алгоритм SLAM, що використовується в хірургії, включає візуальний SLAM, заснований на монокулярних та тринокулярних зображеннях RGB-D камер, які використовують інформацію з

навколишнього хірургічного середовища для відстеження 3D-орієнтирних точок за допомогою баєсівських методів, як зазначено в літературі [40]. У цьому підрозділі зосереджено на застосуванні хірургічних SLAM, де наведено кілька прикладів хірургічних систем відстеження, типових для роботизованих платформ з інтеграцією доповненої реальності (AR): спеціалізовані роботизовані маніпулятори для хірургії, алгоритми керування для AR-візуалізації та алгоритми прийняття рішень машинним навчанням, серед іншого.

Електромагнітні системи стеження (EMT). На відміну від механічного відстеження, яке залежить від положення кінцевих ефекторів для забезпечення високої швидкості оновлення за допомогою обертових енкодерів або потенціометрів, електромагнітне (EM) відстеження використовує стаціонарне джерело з ортогональними магнітними котушками в робочому діапазоні 1-3 м. На сьогодні єдиною технікою доповненої реальності (AR), яка обмежує звичайні межі оклюзії, є EM відстеження, яке працює на основі генерації поля, розміщеного поблизу пацієнта та з'єднаного з останнім котушковими проводами. Орієнтація та положення датчиків відстеження базуються на ослабленні сигналу згенерованого EM поля, що дозволяє здійснювати рух на 360°. Нещодавній патент описує розробку HMD, оснащеного EM випромінювачами для відстеження рухів голови користувача у віртуальному 3D-сценарії. Такі технології можна використовувати в хірургічній сцені для виявлення віртуальних 3D-об'єктів, що проектуються на тіло пацієнта під час роботизованої хірургії, таким чином, що портативний хірургічний інструмент випромінює електромагнітні поля під час зв'язку з HMD для розширеної візуалізації органів. Крім того, тактильна система AR калібрується для отримання точних координат інструменту в рамках глобальної системи позиціонування (GPS). Для підвищення рівня точності на сантиметр необхідні вдосконалення супутникових технологій, такі як кінематика в реальному часі (RTK) та висока продуктивність акумулятора, а також алгоритми машинного навчання. Як і в більшості поширених методів відстеження, на працівників швидкої медичної допомоги впливають проблеми з видимістю, оклюзія та складність алгоритмів, що використовуються для реєстрації координат робочого простору з системою

координат робота. Ця форма відстеження передбачає обернену пропорційність відстані між датчиком та генератором та його феромагнітною чутливістю, що, як правило, знижує точність виведення. Цю проблему можна вирішити за допомогою систем електромагнітного відстеження де RoboTracker виконує автоматичне позиціонування та орієнтацію пацієнта, не покладаючись повністю на рентгенівські промені та звичайну оптику для забезпечення точності.

Оптичні системи стеження (OTS). Оптичні системи відстеження (OTS) широко використовуються в хірургічній навігації, що стало першим підтвердженням концепції, що використовувалася під час Другої світової війни, коли оптичні прицільні системи та детектори гармат були обов'язковими для стратегічного планування. Розроблено інфрачервону систему з опорними маркерами, інтегровану зі стереооб'єктивом камери Bumblebee2 для зменшення оптичних перешкод під час доповненого перегляду. За даними, OTS складається з генератора сигналів, детектора сигналів та системи керування, яка обробляє сигнал для точної оцінки пози. Принцип роботи оптичного пристрою відстеження включає визначення положення віртуального 3D-об'єкта в просторі шляхом з'єднання щонайменше трьох видимих і розсіяних точок для формування відомого геометричного візерунка. Для відстеження кількох кінцевих ефекторів у шести ступенях свободи, для полегшення оцінки пози, потрібні три неколінеарні опорні маркери. Подвійні маркери використовуються для визначення кутів позиціонування та напрямку кінчика хірургічного інструменту, коли значення не залежать від орієнтації. Під час клінічної процедури опорні точки жорстко реєструються на хірургічних інструментах та ділянках інтересу для отримання даних про місцезнаходження в діапазоні 40-60 Гц, що є найпоширенішою частотою кінестезії людини. Зібрана інформація потім реконструюється методами тріангуляції або зворотної проекції з використанням математичних алгоритмів, таких як геометрична конфігурація, порядок активації світлодіодів та зміщення між датчиками. У відеометричних пристроях оцінка пози визначається шляхом обробки послідовностей зображень з каліброваних відеокамер, хоча й стикається з фоновими перешкодами через механічні або оптичні стимули. Однак оптичні системи відстеження на основі ІЧ можуть

виконувати багатофункціональне відстеження, використовуючи до шести активних бездротових інструментів, що вимагає тривалих обчислень та періодів реєстрації. Це призводить до збільшення вартості OTS, що також відіграє ключову роль у загальній вартості виробництва системи та її ринковій вартості.

Виявлення об'єктів та вирівнювання доповненої реальності для роботизованої хірургії

Поряд із численними досягненнями в інших галузях, таких як спритність та точне отримання зображень, комерційні хірургічні роботи наразі оснащені технологією доповненої реальності (AR) для маніпулювання інструментами резекції. Їхня здатність візуалізувати анатомію пацієнта під час екстракції уражених тканин дозволяє їм працювати в межах безпечного робочого простору. Хоча точне відображення медичних зображень малоймовірне через постійну деформацію тканин до та після операції, багато дослідницьких присвячені дослідженню можливості роз'єднання віртуальних об'єктів та їх сенсорних стимулів від реального світу за допомогою алгоритмічних підходів , адаптованих з репозиторію DL. Серед найвідоміших методів, AR на основі проекції, AR на основі маркерів, AR без маркерів та AR із накладанням широко використовуються в роботизованих платформах, що використовуються в операційній та дистанційно. Нижче наведено приклади типів відстеження AR та способів, якими вони сприяють роботоасистованій хірургії.

Інтраопераційне планування для хірургічних роботів. Доповнена реальність на основі маркерів

У технології доповненої реальності (AR) на основі маркерів головною метою залишається керування роботизованою системою під час оцінки координат з камер відносно маркерів. Безліч розмірів і типів маркерів, серед яких Vuforia та ArUco є найпопулярнішими, використовуються в робочому середовищі серверної частини, що дозволяє реєструвати коливання інформації про маркери від робота за допомогою інтерфейсу доповненої реальності. Цей тип доповненої реальності корисний у хірургії, яка вимагає тріангуляції кінцевих ефекторів для розрахунку їхнього положення на основі доданого або рухомого опорного маркера відносно точки відліку (див. Рисунок 3.2 для прикладу біопсії

пухлини з використанням передопераційного відстеження маркерів за допомогою КЛКТ).

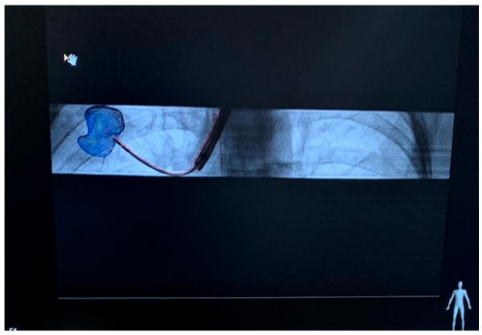

Рисунок 3.2 - Інтраопераційна КЛКТ-сканування, що показує заздалегідь заплановане розташування та положення пухлини.

У наявній літературі використовували нейронавігацію на основі доповненої реальності (AR) з використанням оптичного відстеження камер, таких як LIDAR та AR-детектор світла. Використовуючи маркери в робочій сцені, успішно виконується 3D-передопераційна реєстрація та суперпозиція з орієнтованими елементами між 0,5 та 3,5 мм, з полегшеним розміщенням опорного маркера. Це застосування було розширено створено симуляції проведення дротом через кульшові та грудні гвинтові установки за допомогою флюороскопічних тренажерів візуалізації, вбудованих у ортогональні камери, для відстеження віртуальних опорних маркерів.

Ще одне широке використання AR на основі макетів у передопераційному плануванні та навчанні включає роботизовані симулятори з тактильним зворотним зв'язком для акушерок та акушерів-початківців для сприйняття необхідної сили під час пологів, яку потрібно застосувати під час тріангуляції грудей. У роботизованих системах серцево-судинної підтримки як новачки, так і хірурги можуть виконувати передопераційну серцево-легеневу реанімацію (СЛР) за допомогою високочастотних тренувальних вправ на доповненому робот-симуляторі, таким чином навчаючи їх виконувати основні кроки, які можна виконати, коли серце пацієнта зупиниться.

Безмаркерна доповнена реальність. У своїй еволюції від виявлення відчутних маркерів у навколишньому середовищі, безмаркерна реєстрація AR не

вимагає тригера для виявлення об'єктів інтересу в робочому просторі. Користувачі можуть виділяти певні області під час візуалізації, оцінювати відповідне перетворення з посилання на координатну систему зображення та накладати згенероване зображення на реальний орієнтир. Наприклад, про корисність системи наведення на основі AR для видалення пухлини язика під час трансоральної роботизованої хірургії, де робот-захоплювач daVinci використовував алгоритми уникнення зіткнень для визначення областей інтересу та коригування області екстракції в його голографічному вигляді. Було представлено кілька пристроїв для перевірки концепції з недорогими цифровими платформами для визначення місцезнаходження вен. Вони складаються з високоінтенсивних ІЧ-світлодіодів для віртуального посилення судинної дифузії на доповненому HMD або смартфоні, такому як Google Nexus. Нарешті, описано платформу візуалізації на основі доповненої реальності (AR) для визначення розташування вен за допомогою ультразвуку, використовуючи голографічне наведення голкою без використання матриці для підвищення точності канюляції. У комерційному застосуванні використовуються такі пристрої, як AccuVein та ihe NextVein Vein Idnder позиціонуються як носимі окуляри високої чіткості, що забезпечують інтелектуальну 3D-візуалізацію вен та артерій у режимі реального часу в окремих шарах. Ця властивість знижує ризик внутрішньої кровотечі, - дискомфорту пацієнта та ризику взаємодії пацієнт-лікар на 45% завдяки постійному моніторингу за допомогою аналогічних методів tR. Всі ці пристрої використовують безмаркерну доповнену реальність (AR) за принципом цифрового лазерного сканування, що покращує перспективи успішного націлювання на вени в 3,5 рази. Застосувано метод безмаркерного калібрування в роботизованій системі на основі HoloLens , яка працювала з використанням даних хмари точок, отриманих від датчика глибини. Незважаючи на повільний час обробки модифікованої нейронної мережі, що контролює рух робота, було успішно досягнуто точної локалізації та доповненої візуалізації, хоча й погіршивши враження користувача. Можливість навігації згинального стрижня через спинний мозок пацієнта після встановлення педикулярного гвинта за допомогою методів виявлення об'єктів за допомогою CNN та аксіальної

орієнтації на основі доповненої реальності.

Доповнена реальність на основі HMD для хірургії та реабілітації

У хірургічній системі NAVIO, яка вбудована на HoloLens HMD, хірург виконує інтраопераційну індивідуальну підготовку кістки та підтвердження правильних розмірів напрямних розрізів шляхом накладання доповнених малюнків, створених інструментами хірургічної резекції. Більше того представлена концепція полегшення фантомного болю для пацієнтів, який здебільшого виникає у людей з ампутацією, після втрати кінцівки або після травми спинного мозку. Рендеринг двох здорових кінцівок у режимі реального часу в HMD дозволяє користувачеві виконувати певні дії в ігровому сценарії, тоді як кутові вимірювання обертань надсилаються на роботизовану платформу з інерційних датчиків. Дослідження показали, що два учасники, які використовували цю недорогу систему реабілітації AR для зменшення болю, одразу відчули легший біль до та після сеансу. Подальші дослідження зображують повторне використання AR для знеболення уражених ділянок за допомогою процедури, яка називається терапією дзеркальної коробки. Під час цих вправ люди з ампутованими кінцівками можуть спостерігати відображення ураженої кінцівки як цілої через аватар подібного вигляду. Під час процедури вони носять HMD та можуть імітувати рухи відповідно до функціонуючого під час використання інвалідних візків та роботизованих екзоскелетів. Ці експерименти є поворотним моментом у способах проведення реабілітації фізіотерапевтами, завдяки чому пацієнти можуть виконувати рухові дії за допомогою програмного забезпечення на основі доповненої реальності, маючи підтримку екзоскелетної структури.

Передопераційне планування для хірургічних роботів. Доповнена реальність на основі суперпозиції

Існує широкий спектр застосувань для пристроїв доповненої реальності (AR) у галузі хірургічної робототехніки, які працюють на основі суперпозиції. Перевага розширення поля зору хірурга реконструйованими медичними зображеннями та інтерфейсами комп'ютерного зору полягає, перш за все, у можливості накладання корисної інформації на реальні сценарії. Це дозволить

підвищити ефективність хірургічної налаштування та клінічних процедур. Технології на основі доповненої реальності, що отримали широке визнання в хірургічній спільноті, включають відеодисплеї, які доповнюють поле зору хірурга за допомогою потокового відео, прозорі дисплеї, які накладають додаткові віртуальні об'єкти на поверхню прямого зору цільового користувача та проекційні дисплеї, які дозволяють накладати моделі, специфічні для пацієнта, на шкіру пацієнта, хоча й знижуючи геометричну точність та оцінку глибини. Описано використання системи відстеження на основі суперпозиції, яка використовується для налаштування та реєстрації цифрової системи відліку черепно-лицьового скелета. Платформа також складалася з оптичної системи відстеження та робочої станції для завантаження даних у режимі реального часу, які передаються на HMD для візуалізації. Розроблено систему біопсії нирок для відстеження голки через тканину, що цікавить, шляхом накладання голографічних зображень уражень з відповідних КТ-сканів (рис. 3.3)

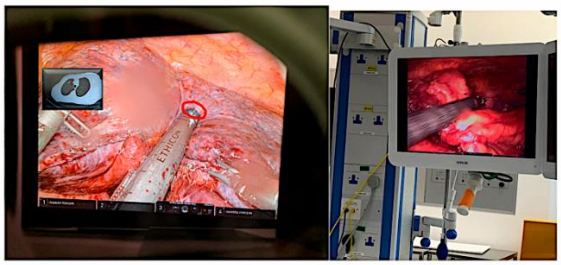

Рисунок 3.3 - Навігація за допомогою інструменту AR на основі суперпозиції під час сегментектомії та біопсії правої VATS з використанням екранів HD-моніторів.

. Більше того успішно впровадили мініатюрну оптичну трубку на основі доповненої реальності (AR) через черевну порожнину пацієнта для візуалізації ендоскопічних структур, які не видно в прямому полі зору камери, але видно на передопераційних зображеннях. Цей тип 3D-візуалізації є першим кроком у розробці повнофункціональної AR-системи, завдяки якій анатомія пацієнта прозора для ока хірурга, а важливі структури, такі як поліпи, пухлини та кровоносні судини, можуть бути ідентифіковані під час передопераційного

планування. Це означає, що система керування, якою керує хірург, може фіксувати зворотний зв'язок по силі, а також сприймати приблизну глибину, досягнуту з навігаційних каналів, результати якої можна проаналізувати для створення інтерактивної AR-системи як для хірургів, так і для новачків. Описано подібний підхід до навігації вздовж спинного мозку та сусідніх хребців, дисків та нервів, використовуючи накладання реконструйованих 3D-моделей на тіло пацієнта.

Досліджено використання роботизованої системи з доповненою реальністю (AR) для виконання точних розрізів та виявлення області розрізу під час роботизованої сегментектомії печінки. Високо оцінено керівництво інструменту під час роботизованої хірургії завдяки можливості візуалізації деформацій у реальному часі за допомогою геометричних допоміжних засобів, таких як опорні лінії, у стереоскопічному зображенні.

Досліджено використання роботизованої системи з доповненою реальністю (AR) для виконання точних розрізів та виявлення області розрізу під час роботизованої сегментектомії печінки. Високо оцінено керівництво інструменту під час роботизованої хірургії завдяки можливості візуалізації деформацій у реальному часі за допомогою геометричних допоміжних засобів, таких як опорні лінії, у стереоскопічному зображенні.

Червоний маркер вказує на правильне положення степлера для продовження дирекції. Використовували AR для реконструкції зовнішнього слухового проходу та барабанної перетинки порожнини середнього вуха у вигляді 3D-зображення з передопераційних КТ-сканів. Ця процедура вимагає делікатної навігації для запобігання кровотечі в середньому вусі або перфорації кісточок, тому потрібна точна локалізація та загальний доповнений огляд. Таким чином, ірландські хірурги можуть виявляти та впливати на конкретні тканини, які може бути важко визначити або змінити константу. Новий підхід до проведення біопсій раку, розроблений у партнерстві з KUKA Robotics та SIEMENS, був реалізований у рамках проекту MURAB, що дозволяє створити робочий процес без зчитування пальців для магнітно-резонансної томографії (МРТ) та ультразвукового дослідження (УЗД). Користувачі можуть реєструвати

деформацію хвиль цільових ділянок за допомогою зворотного зв'язку по відносній силі та об'ємних даних. Такі процедури забезпечують точне націлювання та екстракцію мініатюрних уражень з точним контролем під керівництвом навігаційної системи на основі доповненої реальності (AR) також використовувалася для визначення місцезнаходження підшкірних вен у передопераційній хірургії, де запропонований прототип має USB-камеру, підключену до смартфона Android, для захоплення лімфатичних знімків вени за допомогою інфрачервоних датчиків. Вроджена здатність гемоглобіну в крові поглинати великі обсяги інфрачервоних (ІЧ) хвиль запускає це явище. Потім отримані зображення посилюються контурним заповненням, сегментуються за допомогою техніки порогового визначення, а потім відтворюються на екрані для накладання на реальний анатомічний орієнтир. Крім того, розроблено механізм для відстеження розташування сигналів на людському тазі шляхом накладання голограми останнього на себе за допомогою HMD під назвою nVisor ST60.

Було представлено використання AR-систем для подальшого передопераційного планування перед встановленням педикулярного гвинта: у хірургії мозкової артерії процедура включала використання ультразвуку для створення 3D-зображень з КТ-сканів та їх подальшого накладання на області інтересу. Використовували зв'язок HoloLens з HoloLens для визначення місцезнаходження кістки в тілі користувача; пристрої були встановлені на С-подібній дузі флюороскопа та пацієнта відповідно. У дослідженнях подібні - методи попереднього планування використовувалися для керування траєкторіями свердління для транспедикулярного встановлення гвинтів за допомогою крос-модальної системи, яка називається AR-хірургічною навігацією (ARSN). Після отримання 3D-КТ-сканів навколишніх структур хребта вихідні дані DICOM перетворюються на 3D-реконструкцію хребта, що дозволяє відстежувати зі зворотним зв'язком для визначення місцезнаходження областей введення гвинтів. Цього досягають завдяки оснащенню системи чотирма камерами, які здатні записувати ширше поле зору з різних кутів і, своєю чергою, відображати на моніторі 3D-зображення, що накладаються одна на одну, протягом передбачуваної траєкторії свердління. Більше того, система довела

свою надійність навіть під час малоінвазивних операцій з перкутанним розміщенням кінчиків голок Джамшіді в зонах інтересу для розрахунку точки введення гвинта та відповідних кутів введення .

Проекційна доповнена реальність (AR)

У проекційній (або просторовій) доповненій реальності (AR) області інтересу в людському тілі відображаються у віртуальному світі без використання HMD та екранів високої чіткості. За допомогою проекційного картування доповнена модель орієнтира може бути накладена та витягнута з екрана за допомогою стежучого пера для реалістичного дослідження анатомії серця. Доступні набори даних КТ були використані для реконструкції серцевих судин та пов'язаного з ними розділення між, наприклад, легеневими судинами воріт серця та порожнистої вени, а також для візуалізації поведінки типового серця під час пересадки. Цей метод може бути поєднаний з перехресним дослідженням з використанням обчислювальної моделі Total Artificial Heart у його віртуальній формі для точного прийняття рішень, особливо з точки зору біосумісності каркасного серця у пацієнтів молодшого віку. Описано використання системи доповненої реальності (AR-навігації) для дослідження деформації навколишніх тканин, нервів і судин у реальному часі через проекції хребта на спину пацієнта, які були підкріплені опорними маркерами для точного накладання зображення на пацієнта. Представлено використання AR-платформ на основі проектора для керування спеціальним роботом з голковим наведенням за допомогою жестів рук над передопераційною моделлю абляції, що проектується на область інтересу. Проект представив подібну структуру взаємодії для планування розташування хірургічних портів шляхом проектування точок тріангуляції на тулуб пацієнта.

Доповнена реальність на базі HMD. Методи хірургічної навігації з доповненою реальністю (ARSN) були застосовані в автоматичному відстеженні положення певного інструменту для встановлення петлі зворотного зв'язку щодо його місцезнаходження в режимі реального часу, що призводить до покращеної ідентифікації віртуальної цільової точки кісткового гвинта та кута нахилу. Після проведення кількох експериментів було досягнуто точності 97,4% під час екстраполяції координат вихідних даних. Крім того, ще однією роботизованою

платформою, розробленою для хірургії хребта, є MicroOptical, яка складається з HMD для доповненої інтраопераційної флюороскопії, що виконується поблизу внутрішніх переломів та встановлення спинномозкового педикулярного гвинта. З п'ятдесяти тематичних досліджень, проведених на різних пацієнтах, час операції був значно скорочений завдяки зменшенню відхилення зору від пацієнта. Це також зменшує швидкість випромінювання, що поглинається медичними працівниками в операційній від генератора флюороскопії. Крім того, описано альтернативу проекційній доповненій реальності (AR) з використанням екрана монітора, що дозволяє візуалізувати відеопослідовність при тиреоїдектомії, щоб відокремити тактильний стимул зворотного зв'язку від системи зворотного зв'язку робота під час резекції різних анатомічних структур. У дослідженні HoloLens використовувався для виконання доповненої візуалізації розміщення та введення голок через фантом пилкоподібної форми хребта, виготовлений з непрозорого агару, як симуляцію пункцій поперекового суглоба. Після реконструкції вихідних КТ-сканів фантома дані були зібрані, завантажені на гарнітуру та проектовані на поле зору хірурга у вигляді голограми для точного наведення голки під час процедур, з яких 97,5% були успішними. Проведено експерименти з відображення та бачення внутрішньої судинної системи пацієнта у 3D під час реконструктивної хірургії за допомогою HoloLens. Пристрій оснащений функцією розпізнавання жестів рук, що дозволяє фіксувати, реєструвати будь-які рухи рук і зрештою перетворювати їх на голограму, що накладається на існуючі нижні кінцівки людського тіла.

3.3 Інтеграція програмного забезпечення та реалізація AR-платформи для навчання хірургії

Від випробувального стенду «головний-підлеглий» до операційної, доповнена реальність (AR) відіграє ключову роль у візуалізації анатомічних орієнтирів, зокрема вуха, носа та горла, а також шлунково-кишкових ділянок. Роботизована хірургія за допомогою AR полегшила завдання хірурга у зменшенні тремору рук та втрати тріангуляції під час складних процедур.

Дослідження показують, що перехід від інвазивної відкритої хірургії до непрямої, керованої сприйняттям хірургії призвів до меншої кількості випадків перфорації тканин, крововтрати та післяопераційної травми. На відміну від відкритої хірургії, яка передбачає пряме маніпулювання тканинами, операції під візуальним контролем дозволяють хірургу просторово відображати медичну інформацію про зображення, віртуальну чи іншу, на реальні структури тіла. Зазвичай віртуальне пристосування визначається як суперпозиція доповнених сенсорних даних на поле зору користувача з програмно- генерованої платформи, яка використовує опорні маркери для реєстрації розташування анатомічного відділу в реальному часі та просторі відносно реальної сцени користувача. Використання загальнодоступних наборів даних, отриманих за допомогою передових технологій, таких як КТ та магнітно-резонансна томографія (МРТ), у таких сценаріях дозволяє мінімізувати людські помилки під час обробки даних і, отже, підвищити рівень успішності операцій.

Реєстрація пацієнта на зображення. Попередні кроки діагностики проблемної ділянки у пацієнта включають використання комп'ютерного програмного забезпечення для візуалізації внутрішніх анатомічних орієнтирів. Втрата безпосереднього відчуття внутрішньої анатомії, зниження сприйняття глибини через монокулярність камер та спотворені зображення були вирішені за допомогою нових методів, таких як сегментація тканини в медичних сканах та 3D-моделювання для розширеного 360-градусного поля зору (FoV). Тематичні дослідження біопсій нирок розглядають розробку систем доповненої реальності (AR) для накладання голограм на експериментальні фантоми. Дослідження показують, що передопераційні КТ-сканування з положення лежачи на боці призводять до деформації тканини всередині, на додаток до розбіжностей між передопераційними та інтраопераційними скануваннями. Точна хірургія під візуальним контролем значною мірою залежить від суміщення передопераційних медичних сканів з відповідними в межах інтраопераційної анатомії. Під час процедури вирівняні системи координат відображаються на вихідному зареєстрованому зображенні. Необхідність компенсації часової затримки під час реєстрації означає, що для покращення якості зареєстрованого

зображення потрібно кілька часових кадрів у різних областях інтересу.

Зазвичай, бажаний вибір методу реєстрації залежить від типу робототехнічного середовища, в якому працює хірург, де реєстрація на основі ознак привертає найбільшу увагу в академічній спільноті. Ці методи є менш обчислювально важкими та можуть бути використані для ефективного зіставлення опорних точок між доопераційними та інтраопераційними - зображеннями, переважно з деформованими методами реєстрації поверхні. Через використання виключно 2D-параметрів можливість отримання високоточної 3D-інформації є низькою, що спонукає дослідницьку спільноту до розробки нових технологій сенсорного відстеження 3D-маркерів. Такі методи реєстрації, як точкова реєстрація, реєстрація на основі ознак, реєстрація на основі сегментації та реєстрація на основі флюороскопії, широко використовуються в обробці зображень медичних сканувань. Геометричні перетворення деформованих об'єктів обчислюються за допомогою опорних маркерів, які діють як орієнтири позиціонування та можуть бути проаналізовані на наявність помилок локалізації опорних точок (FLE). У випадках, коли зображення мають різні рівні сірого, алгоритми DL здатні розділяти різні ознаки за допомогою таких параметрів, як сума квадратів або абсолютних різниць (SSD), коефіцієнти кореляції та середньоквадратична різниця (MSD). Для обробки рентгенівських зображень у реальному часі використовується контрастний матеріал, такий як барій або йод, для створення менш помітних відмінностей контрасту, які клініцисти можуть аналізувати. Процес реєстрації 2D-3D-зображень включає вирівнювання відповідних доопераційних та інтраопераційних ознак, які можна реконструювати в доповненій реальності (AR) та накласти на живе флюороскопічне зображення відносно опорних точок у послідовності зображень 3.4.

Калібрування камери для оптимального вирівнювання. Автоматичне калібрування камери та відповідне вирівнювання зображень в інтраопераційному ультразвуковому дослідженні використовується для визначення внутрішніх структурних характеристик, таких як фокусна відстань та анатомія поверхні різних органів. Аналіз, візуалізація та попереднє

планування з використанням зареєстрованих ультразвукових зображень дозволяють розробляти моделі відповідної анатомії, специфічні для пацієнта. Створено крос-модальну AR-модель для корекції змін положення за допомогою голограми ураження . генеруються під час процесу реконструкції КТ-зображення. Ультразвуковий датчик отримує двовимірні скани з ділянки інтересу та об'єднується з даними магнітного трекінгу для створення результуючого 3D-скану відповідно до алгоритму CNN.

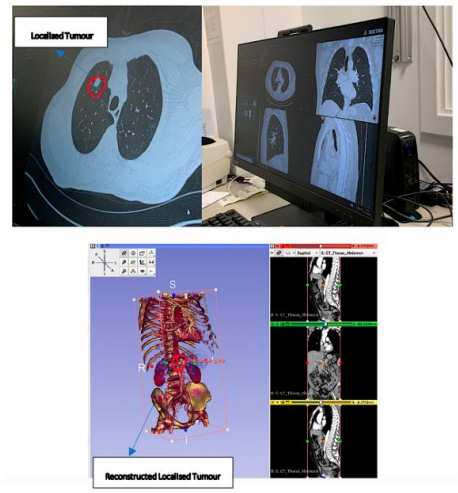

Рисунок 3.4 - КТ-скани легені з відповідною 3D-реконструкцією та локалізацією маркерів, що використовуються хірургами для визначення місцезнаходження пухлин, позначених червоним маркером.

Це зменшує ймовірність появи негативних зображень у наборі даних, особливо при відображенні магнітно-тренованих ультразвукових сканів на нежорстко зареєстровані 3D-скани для виявлення невідповідностей у деформації. Крім того, цей метод також використовується для далекого наведення голки для прогнозування трансопераційних шляхів під час навігації, а також для виявлення ділянок екстракції для уражень на Unity3D за допомогою системи уникнення зіткнень. Реєстрація від точки до точки оптимізується шляхом розміщення маркерів, достатньо далеко один від одного в нелінійній конфігурації, таким чином, щоб їхній сумарний центр збігався з проекцією цілі в робочій області.

3D-візуалізація за допомогою прямого об'ємного рендерингу. Наступні

кроки у створенні AR-моделі включають методи обробки зображень, такі як пряме об'ємне рендеринг, які використовуються для видалення викидів та розмежувачів із необроблених даних DICOM. Метод включає коригування контрастності вокселів та мультимодальну реєстрацію об'єму вокселів на КТ-зображеннях шляхом заміни їхньої існуючої щільності певним кольором та посилення їхньої контрастності за допомогою порогового регулювання, що виконується передаточною функцією. Ручне порогове регулювання інтенсивності видаляє всі артефакти низької інтенсивності та фоновий шум із зображення, готуючи його до жорсткого приєднання до органу у віртуальності. Функція прозорості застосовується для фільтрації екстремальних контрастів в анатомічних або патологічних 3D-орієнтирах, і будь-які виявлені контури, подібні до крапель, можуть бути використані при початковій реєстрації КТ-сканів за допомогою таких методів, як топологічний структурний аналіз. Деформаційні властивості органів моделюються за допомогою програмного забезпечення, такого як Osirix 12.0, 3D Slicer 5.2.2 або VR-Render IRCAD2010, а висока контрастність, що застосовується до вихідних зображень, робить такі структури, як пухлини, кістки та судини, схильні до аневризм, більш видимими неозброєним оком.

Рендеринг поверхні після сегментації попередньо оброблених даних. Методи поверхневого рендерингу зображують перетворення анатомічних структур у сітку для розмежування та сегментації. Використано принцип епіполярної геометрії для отримання зображень з лівої та правої стереокамер. Потім автори застосували підхід відповідності точок для повторної дискретизації та побудови 3D-трикутної сітки з локальних точок даних у її околицях. Сучасні методи, що використовуються в AR, розроблені за допомогою програмного забезпечення під назвою Unity3D та вимагають специфічних для пацієнта полігонів, таких як трикутники, для швидкої обробки. Крім того, анатомічні сцени, виявлені за допомогою ультразвукових датчиків, можуть бути реконструйовані за допомогою багатовидового стерео (MVS), яке аналізує фрагменти тканини, вилучені з області, переробляє їх шляхом деформації необроблених даних DICOM та відображає їх з відповідними текстурами за

допомогою методів прискореної робустної рендерингу (SURF). У більшості випадків сегментація може призвести до втрати важливої інформації у вихідних об'ємних даних. Тому, прагнучи покращити якість сегментованих зображень, запроваджено швидшу та надійнішу систему реєстрації УЗД на КТ з використанням реєстрації кісток за допомогою тіньового піку (SP).

Обчислювальна структура шляхів для навігації та планування

Використання механізмів відстеження для наведення біопсії на основі маркерів отримало широку схвалення та застосовується в хірургії, такій як хірургія середнього вуха та нирок. Фідуціальні сигнали реєструються в різних місцях на тілі пацієнта, використовуючи надійне зіставлення поверхні сферичних маркерів зі стандартною моделлю, поряд з лапароскопічними відеопотоками. Реєстрація зображення пацієнта виконується шляхом порівняння отриманих зображень у реальному часі з доступними наборами даних пацієнта та зображення, що є вирішальною операцією для усунення помилок під час автоматичної корекції. Використано запити на близькість для виявлення внутрішніх змін в анатомії під час маніпуляцій континуальним роботом для хірургії навколо кісткової порожнини. У цьому випадку використовується коваріаційне дерево як алгоритм моделювання в реальному часі для підтримки явного запасу безпеки між стінками анатомічного орієнтира під час маніпулювання хірургічними інструментами. У випадках малоінвазивної хірургії запобіжні заходи, такі як накачування тіла пацієнта CO2 та виділення цільових ділянок контрастними кольорами (наприклад, за допомогою ICG), полегшують завдання хірурга, особливо під час виконання крос-модальних втручань з використанням AR-систем, таких як гарнітури. Механізми відстеження, що використовуються в ультразвукових процедурах для інтраопераційного використання. Зонд був оснащений системою відліку HoloLens, яка містила кілька відбивних сфер на органі. Щодо відстеження біопсійної голки, запровадили концепцію зареєстрованого наведення стилуса відповідно до імітованої 3D-репліки, реконструйованої з КТ-зображень тулуба. Під час передопераційної хірургічної навігації калібрований зонд використовується для збору даних з внутрішніх органів для надсилання до

програмного забезпечення 3D Slicer через OpenIGTLink, одночасно поєднуючи відстежені дані з вхідних інструментів. Кінчик стилуса калібрується навколо осі повороту та може переміщуватися в різні положення в анатомічну площину, відстежуючи її над системою відліку зонда за допомогою ітеративного алгоритму виявлення на основі найближчої точки (ICP). Проекційний вигляд для пункційної хірургії також покращує ефективність навігації на основі сприйняття, використовуючи накладені маркери для вирівнювання кінчика голки з пурпуровим колом. Дослідники у вищезгаданому дослідженні створили точний метод позиціонування AR, використовуючи методи DL для створення оптимізованої матриці проекцій. Будь-яка проекція виконується у напрямку цільового розташування тіла, що зменшує ймовірність помилок паралакса.

Застосування комп'ютерного зору в роботі хірургічних роботів (на основі DL)

Завдяки новаторському розвитку штучного інтелекту (ШІ) в допоміжних хірургічних роботах, сектор охорони здоров'я сьогодні спостерігає стрімке зростання обсягів даних, що збираються та зберігаються в базах даних, таких як NHS. Під час пандемії COVID-19 технології зменшили навантаження медичних працівників за лаштунками, мінімізуючи необхідність сортування, збору та зберігання даних вручну, а також скоротивши витрати на прийняття рішень. Навчальні набори даних для раннього розпізнавання симптомів, оцінки рівня смертності пацієнтів та виявлення аномалій на певних зображеннях тканин дозволили дослідникам уникнути схильних до помилок концепцій під час навчання роботів та підготувати новачків до неочікуваних помилок. Хірургічна спільнота визнала ключову роль, яку відіграє інтеграція доповненої реальності (AR) у робототехніку на основі цифрової діагностики (DL), включаючи підвищення прозорості пацієнта, вищу точність, меншу кровотечу та коротший час відновлення. Можливість зменшення впливу шкідливого -випромінювання та патогенів також виявилася корисною для загальної хірургічної ефективності в клініках, особливо в постпандемічний світ. Незважаючи на безліч переваг, які надає AR, все ще існує ряд проблем, які були виявлені, як у таблиці. 3.1 , такі як неправильне взаєморозташування та зіставлення між реальним та віртуальним

світами, неточна візуалізація органів, що цікавлять, через труднощі в оцінці їхнього положення та відсутність відповідності між реальною тканиною та віртуальною тканиною. Проекції реконструкцій на основі доповненої реальності (AR) можуть бути часом неточними через різні фактори реального часу, такі як невизначені структури внутрішніх органів та їх межі, коливання життєво важливих показників та ледь помітні рухи людського тіла, такі як аспірація та та артеріальний тиск.

Застосування оптимізації роботи хірургічних роботів на основі глибокого навчання, забезпечує інтелектуальне планування завдань та виконання операцій, на відміну від ручної роботи, яка використовує лише заздалегідь визначені рефлекси. Ці інтелектуальні роботи враховують особливості навколишнього середовища та здатні здійснювати навігацію з урахуванням перешкод на основі сприйняття, що дозволяє приймати рішення щодо найкоротшого шляху переміщення в обмеженому просторі. Фізичні роботи, оснащені вбудованими лазерами, інфрачервоними камерами та надширокосмуговими радіоприймачами, можуть бути навчені за допомогою алгоритмів глибокого навчання відстежувати взаємодію людини та робота в доповнених середовищах. Описано використання AR для контролю фізичних взаємодій, досягнення навігації на основі датчиків та виконання складного планування траєкторій за допомогою методів DL за умов мінливих зовнішніх стимулів.

Таблиця 3.1

Технічні перешкоди у сфері доповненої реальності згідно з теорією Роджера.

Технічні вузькі місця (Technical Bottlenecks)	**Опис (Description)**
Сумісність із соціальними нормами	Носимі пристрої, такі як Google Glass, можуть створювати проблеми з конфіденційністю.
Складність (зручність для користувача або навчання)	AR (доповнена реальність) легко засвоюється хірургами-початківцями та може прискорити процес навчання.
Недостатня точність вирівнювання	Сучасні алгоритми глибокого навчання (DL), такі як глибоке навчання з переносом (transfer learning), а також навчання з учителем і без учителя, використовуються для вирішення проблем відображення реального світу у віртуальний. Умови освітлення можна налаштувати для кращого вирівнювання.
Можливість апробації широкою громадськістю	Технологія легко розгортається, але її тестування одночасно в кількох регіонах може бути дорогим.

Реєстрація медичних зображень. Було описано реалізацію алгоритмів глибокого нейронного зв'язку (DL), таких як CNN, для забезпечення реєстрації зображень на основі маркерів у межах заданих параметрів. Для ефективного виявлення об'єктів та вилучення хмар точок відповідно до архітектури ComplexYOLO пропонується AR-модифікована нейронна мережа. Пропонується інша нейронна мережа, відома як мережа PointNet, для семантичної сегментації, а також локалізації 3D-об'єктів у необроблених даних хмар точок. Зображують масив архітектур глибоких нейронних мереж для навчання великих наборів даних без необхідності інженерії ознак. Методи DL, такі як CNN на основі регіонів (RCNN), метод "ви дивитеся лише один раз" (YOLO) та детектори одного знімка (SSD), були застосовані в кількох роботах, що стосуються реєстрації хірургічних зображень. Розширюючи цю концепцію, популярний алгоритм SLAM, класифікований як операції на основі ознак та прямі операції, може бути використаний для локалізації анатомічних дефектів. Методи на основі ознак зосереджені на основних локаторах або ознаках зображення, тоді як прямий метод використовує дані з кожного пікселя зображення для визначення параметрів пози цільового зображення. Дослідження описують використання монокулярного відстеження на основі ознак за допомогою системи оцінки пози в реальному часі під назвою Parallel Tracking and Mapping (PTAM), а також альтернативи під назвою ORB-SLAM. Ці алгоритми скорочують період пакетної обробки та створюють велику систему координат в межах обмежень ключових кадрів для точнішої оцінки пози.

Підвищена оптимізація орієнтації робота за допомогою планування руху та проекції камери

Положення та орієнтація хірургічних роботів визначаються розташуванням з'єднань та їх відносними ступенями свободи. У кожному робочому просторі конфігурація маніпулятора задається для кожного суглоба, щоб дозволити висновок про положення будь-якої змінної. Концепція AR може бути застосована для визначення ступеня свободи маніпулятора відповідно до його конфігураційного простору, використовуючи систематичний метод

позиціонування хірургічних роботів з високими значеннями n для оптимізації їхньої продуктивності. Нещодавні експерименти показали використання оптимального розміщення камери для ширшого кутового охоплення певного робочого простору з використанням моделі проекції камери, двоетапних стратегій для роботизованої мінімально інвазивної хірургії (RAMIS) та алгоритмів глибокого навчання, таких як бездротові відеосенсорні мережі. Аналогічно, використовували Microsoft HoloLens як інтерфейс для візуалізації цільової кривої для реального робота Baxter. Крім того, використовували датчики Kinect у своїй експериментальній установці для реєстрації зображень свого робота з різних ракурсів, які були використані для визначення точності вирівнювання AR. Використання DT робота KUKA в русі дозволило хірургу оцінити правильне положення та орієнтацію під час операції за допомогою відбивного AR-дзеркала. Параметри точності сильно залежали від точності, досягнутої під час реконструкції медичних зображень, з показником успіху 33,7%.

Виявлення зіткнень під час руху хірургічного кінцевого ефектора. Після досягнення топології робота перевіряється профіль орієнтації на об'єм без колізій (CFV) за допомогою процесу візуалізації об'єму з розгортанням. На контурі вихідного профілю вибирається послідовність координат керування для визначення положення руки робота в кожній контрольній точці. Використання інтерфейсу AR дозволяє ефективно відображати CFV та виявляти колізії серед зареєстрованих віртуальних моделей. Перевірки виявлення самостійних колізій виконуються за допомогою V-COLLIDE, де зв'язки робота перетворюються у формат STL. Кінцевий ефектор вважається безколізійним лише тоді, коли контрольні точки з розгортанням знаходяться в діапазоні CFV, який візуалізується користувачем за допомогою проекційних пристроїв AR. Визначення діапазону CFV особливо важливе для точного розміщення порту в роботизованій лапароскопічній хірургії, де уникнення колізій забезпечує максимальний доступ до порту та візуалізацію областей інтересу. Щоб зменшити кількість кубоїдів у кожній реконструйованій сітці перед початком процедури виявлення зіткнень, застосовуються кілька алгоритмів, такі як алгоритми щільно

прилягаючих орієнтованих обмежувальних коробок (OBB) та обмежувальних коробок, вирівняних по осях (AABB).

Таблиця 3.2

Типи методів виявлення зіткнень та відповідні методи навчання, що застосовуються під час планування траєкторії руху

Техніка уникнення зіткнень (Collision Avoidance Technique)	**Метод навчання (Learning Method)**	**Точність (Accuracy)**
Програмування робота з нульовим зусиллям для взаємодії людини та робота на основі зору, що з'єднує два сенсори Kinect для отримання пози робота в 3D з сіткової моделі робота.	Фреймворк Wise-ShopFloor використовується для визначення початкової та кінцевої пози.	Н/Д
Швидке планування шляху з використанням віртуальних потенційних полів, що представляють перешкоди та цілі, а також сенсори Kinect.	Відстеження людини за допомогою нецентрованого фільтра Калмана (unscented Kalman filter) для визначення середнього значення та дисперсії набору сигма-точок.	Менший час уникнення (>689.41 Гц).
Попередня фільтрація сіткових моделей для зменшення кількості паралелепіпедів в експерименті. Віртуальні фікстури, відомі як активні обмеження, що використовуються для створення резистивної сили. Автоматичне розбиття кубів на фрагменти для виявлення 3D-точок та уникнення зіткнень.	Використання орієнтованих обмежувальних рамок (OBB) та алгоритмів фільтрації: тест розділових осей (Separating Axis Test) та метод «замітання і обрізки» (Sweep and Prune). Використання ПЛІС (FPGA) для проектування швидшої системи на базі GPU.	Частота кадрів 17.5 тис. OBB при розрядності 20, частота оновлення 25 Гц порівняно з 1 кГц.
Планування руху OPML з використанням стандартних геометричних засобів перевірки зіткнень, таких як проксі-детектори зіткнень.	Алгоритм Fastron на основі навчання використовується для генерації руху робота в складних умовах, схильних до перешкод.	У 100 разів швидше виявлення зіткнень, ніж моделювання C-простору.
Телеоперація робота з концентричними трубками з використанням автоматичних карт уникнення зіткнень.	Алгоритм швидко досліджуваного випадкового графа (RRG) допомагає побудувати карту доріг у максимальному досяжному робочому просторі введення.	Помилка наконечника від 0.18 мм до 0.21 мм ширини наконечника.
Уникнення зіткнень мультикоптера шляхом перенаправлення дрона на запланований шлях; з'єднує випадкові вузли в межах пошукового простору на віртуальній лінії.	Використання імовірнісного алгоритму RRT для виявлення зіткнень.	Швидкість до 6 м/с.

Вони використовуються для розрахунку найкоротшої відстані зіткнення в моделях опуклих багатогранних зіткнень. Описано якісні результати реконструкції тканин від поверхневих сіток хмар точок до анатомічної межі інтересу. Експеримент довів, що метод швидкого зіткнення, який використовується на OBB після автоматичної теселяції куба, досяг частоти зворотного зв'язку приблизно 1 кГц, що дозволяє забезпечити неперевершений контроль під час роботизованої хірургії. Описано можливість виявлення зіткнень на основі доповненої реальності (AR) та підвищену точність розміщення віртуального інструменту в межах плоті, ребер та цільових місць. Використання теплової карти, накладеної на тіло пацієнта, для розрахунку значення якості площини. Обговорено оцінку та калібрування таких роботизованих систем, які показали відносно високий ступінь точності, хоча й з деякими перешкодами щодо віртуального вирівнювання ЕЕ з інструментами взаємодії з кафедрою через обмежену глибину свободи. Однак ці методи є дуже успішними в контурному трасуванні та профілюванні, створюючи віртуальний гладкий та безколізійний робочий простір вздовж вихідної кривої. Список існуючих методів виявлення колізій наведено нижче в таблиці для порівняння найефективніших методів навчання, що використовуються для досягнення точного планування траєкторії (таблиця 3.2).

Реконфігурація та візуалізація робочого простору хірургічних роботів

Більшість роботів, що піддаються ковзанню, в хірургічних умовах вимагають точного розміщення портів та позиціонування кінцевого ефектора, адаптуючись до бажаних вимог користувача в межах певної реконфігурації робочого простору. Кожен обертовий шарнір робота можна вирівняти та позиціонувати за допомогою доповнених візуальних підказок, що спрямовує користувача до необхідної топології робота. Цей метод набуває популярності в хірургії завдяки легкості відстеження руху та калібрування, з продемонстрованою точністю до ±2 мм. Реалізовано роботизовану систему з доповненою реальністю та датчиками OptiTrack для плавної генерації віртуального кінцевого ефектора, який розміщується в максимально досяжному

просторі. Обчислення конфігурацій робочого простору можна виконувати індивідуально, що генерує віртуальну підказку в полі зору користувача. Раніше VR-платформа, під назвою Baxtor's Homunculus, представила проміжний віртуальний сценарій для відображення системи відліку робота на систему відліку користувача, відокремлюючи стимул у датчика від переміщень кінцевих ефекторів. Однак, було помічено, що відображення системи відліку робота на систему відліку користувача може бути проблематичним через неточності у вирівнюванні кінцевого ефектора у віртуально-реальних сценаріях. З метою підвищення точності такого відображення, використовували вилучення хмари точок для прогнозування зіткнення робота з кінцевим ефектором під час візуалізації об'ємного зображення та профілювання орієнтації робота. Алгоритми, що використовуються для відображення кінцевих ефекторів P3-5 маніпулятора робота, підкреслюючи точність висновків та віртуального зворотного зв'язку від HoloLens відносно початку координат. Користувач отримує зворотний зв'язок у режимі реального часу щодо похибки вирівнювання між поточним та бажаним положеннями на основі генерації сітчастої моделі зв'язку та переміщення навколо опорного кінцевого ефектора. Інші застосування доповненої реальності (AR) у плануванні орієнтації кінцевих ефекторів, які досліджують оптимальні кути нахилу з'єднання робота, слідуючи візуальній підказці відносно певного шляху. Взаємодія людини та робота є плавнішою за оптимальних кутів, оскільки можна зменшити нерівність дисплея та елементів керування, а також вибрати точне розташування порту під час операції без ризику для безпеки пацієнта.

Покращений тактильний зворотний зв'язок для віртуального керування сценою

Повідомляється, що застосування дослідницького комплекту daVinci є широким в академічній спільноті, починаючи від спільних досліджень у RAMIS до незалежних хірургічних маніпуляцій з використанням стереоскопічної системи. Розробка інтерфейсу ROS стала кроком у створенні нової системи планування руху відповідно до тактильного зворотного зв'язку. Це головним чином спирається на Movelt та бібліотеку швидких зіткнень (FCL), які наразі

використовуються для завантаження певного сітчастого об'єкта в симуляцію та перевірки на зіткнення в середовищі панорамованого PSM. Змодельовані PSM створюють відхилення, які подаються як вхідні дані та створюють зворотний зв'язок від датчиків в основній системі маніпулятора. Напрямок швидкості для кожного кінцевого ефектора PSM, нормальний до поверхні v, використовується та математично описується в рівняннях нижче: коли поверхні U та V наближаються до точкової координати таким чином, що Δ (U,V) сходиться до нульового значення, нормаль до поверхні стає колінеарною, і ця особливість може бути розширена, щоб створити сферичну область-проксі (SPR) на кінцевому ефекторі, яка є цільовою областю для взаємодій.

Запропоновано безліч тактильних датчиків для забезпечення високошвидкісної попередньої обробки та візуалізації даних. Явища стереотаксії в хірургічних сценаріях, таких як операції з гамма-ножем, створюють ілюзію зареєстрованих та відтворених 3D-даних тактильного зворотного зв'язку у вигляді сенсорного стимулу. Досліджувався ефект візуального розташування маркерів, що дозволило встановити кореляцію між сприйняттям зворотного зв'язку сигналів та фактичним тактильним зворотним зв'язком, отриманим від об'єкта. Текстури конкретних об'єктів, візуалізованих у віртуальному світі були вивчені, щоб дозволити створення текстурованих поверхонь, згенерованих тангенціальною силою тертя, відповідно до методики, яка називається bump mapping. Крім того, була описана поведінка кількох полігональних твердих тіл під час тактильної взаємодії, а також проблеми їх прямого зіткнення з навколишніми силами. Зовсім недавно дослідження створили симульоване середовище для анатомічної тканини, використовуючи метод довгих елементів для оцінки деформації об'єкта в гравітаційному полі. Такі теорії можуть бути широко використані у світі AR-асистованої хірургії для кращого розуміння поведінки кінцевих ефекторів у судинах тіла як у режимі реального часу, так і віртуально.

Представлено новий носимий пристрій, який може забезпечувати точний гаптичний зворотний зв'язок, адаптувано цю конструкцію для застосування методу псевдогаптичного зворотного зв'язку (PHF) для безапаратного

експериментування з використанням візуальних підказок. Галуззю хірургії, яка вимагає значної тактильної реалізації, є пластична хірургія, яка вимагає накладання віртуальних зображень для хірургічного керівництва, які використовували гаптичний пристрій для здування виступаючої виличної кістки та для позиціонування імплантату під час контурування обличчя. 3D-візуалізація використовувалася для хірургічного планування та маніпулювання моделями шкіри пацієнта для операції з відновлення розщеплення губи відповідно до результатів тактильних пристроїв. Застосування доповненої реальності (AR) для репозиції складних черепно-щелепно-лицьових переломів, де генеруються моделі кісткової сітки пацієнта та створюється захопливий досвід за допомогою такого програмного забезпечення, як Unity3D 2023.1.2, для точного керівництва кінцевим ефектором у навчальній програмі.

Покращена комунікація та безпека пацієнтів. Роботизована хірургія покращила спосіб доступу хірургів до складних внутрішніх анатомічних структур, що призвело до значного зниження затримки передачі сигналу порівняно з першою трансатлантичною роботизованою лапароскопічною холецистектомією, виконаною наприкінці 20 століття. З появою технології мобільного зв'язку 5G сфера доповненої реальності (AR) у хірургії зазнала революції, завдяки розширеній можливості виконання міокардіоаналізу (MIS) через волоконно-оптичну технологію, наприклад, за нижчою ціною та більш поширеною в клініках по всьому світу. Використання додатків для смартфонів для телеконференцій широко рекомендується хірургами, які працюють на роботизованих платформах, для миттєвого доступу до веб-ресурсів, а також для майже повсюдного спілкування між лікарями та колегами. Це особливо корисно в постпандемічний період, коли потрібна негайна консультація персоналу поза межами клініки, наприклад, у випадках, коли візуальний огляд був би корисним для оцінки травм. Розробка інтелектуальних портативних пристроїв, таких як системи на базі HMD, дозволяє користувачеві отримувати надійні аудіовізуальні дані з мінімальною затримкою під час втручання завдяки швидкій передачі даних через мережі 5G. Ці пристрої також допомагають хірургам проводити симуляції та використовувати сценарії розширеної реальності під час наставництва

новачків та віддалених колег під час різних хірургічних процедур, використовуючи моделі хірургічних зразків та тематичні дослідження. Нещодавні дослідження показали, що будь-яка затримка, що виникає під час роботизованої хірургії, дистанційної чи іншої, збільшує ризик кровотечі та неправильного розміщення інструментів, що може призвести до ускладнень. Крім того, технологія 5G дозволяє передавати тактильний зворотний зв'язок хірургу в режимі реального часу за допомогою гіроскопічного пізнання всіх рухів, а також тактильних датчиків. Це забезпечує відчуття реального дотику для визначення глибини, точності, текстури та контурів тканин та органів. Технологія доповненої реальності (AR) може сприяти навчанню та симуляції методів опору тканин, таких як визначення ваги та сили, необхідних для введення та видалення голки. Існують також можливості включення алгоритмів навчання на основі навчання (DL) до бази даних навчання, щоб адаптувати систему для аналізу продуктивності з контрольованою пам'яттю під час навчання та оцінювання на основі симуляції.

Зв'язок між комунікацією та безпекою пацієнтів був підкреслений, де різні типи хірургічних небезпек, такі як неправильна оцінка траєкторії та відхилення, електричні несправності та часові затримки, можуть становити серйозні ризики для пацієнта. Отже, AR-дисплеї відіграють ключову роль у подоланні ефекту затримки між віддаленим оператором та робототехнічною платформою, забезпечуючи миттєвий візуальний зворотний зв'язок для користувача. Як було встановлено клінічним випробуванням, ефективність дистанційного контролю в управлінні імплантацією медичних пристроїв значно підвищується. Поєднання AR-козирів, телекомунікацій 5G та багатоканальних периферійних обчислень (MEC) дозволяє хірургу отримувати доступ до медичних зображень у реальному часі та голографічної моделі людського серця безпосередньо з операційної через мережу 5G з низькою затримкою. Використання стереоскопічного AR-прогнозного дисплея (SARPD) для відображення передопераційних зміщень в межах анатомічних меж, усуваючи ризик перевищення та коливань під час навігації. Використання розширеної системи фільтрації Калмана (EKF) дозволило візуально узгодити передбачувані

та фактичні рухи за допомогою кінематичних калібрувань. Описано експериментальну установку, яка сприяла безпомилковій координації рук і очей під час розміщення кінцевого ефектора, одночасно успішно відтворюючи доповнені об'єкти, такі як системи підлеглих інструментів та геометричні опорні точки. Попереднє стиснення хірургічних зображень вимагає прийнятного рівня затримки перед непоправною втратою анатомічних даних. Як правило, час затримки до 140 мілісекунд може встановити достатній зв'язок для мінімальної втрати даних та стиснення зображень. Незважаючи на досягнення у сфері роботизованих платформ, таких як DaVinci, що досягають частоти до 36 кадрів/с на AR-дисплеях, ми наголошуємо на необхідності подальшого дослідження точності вимірювань, а також конвеєра рендерингу для зменшення когнітивного навантаження під час маніпулювання інструментами.

Цифрові двійники (ЦД) для керівництва кінцевими виконавцями

У постпандемічному світі медична цифрова хірургія (ДТ) забезпечує інтегровану та віртуальну візуалізацію даних пацієнтів, створюючи таким чином зручну програмну платформу для хірургів, що дозволяє їм отримувати доступ до складної інформації, такої як фізичні, фізіологічні та когнітивні характеристики. ДТ може відігравати ключову роль у дистанційному моніторингу пацієнтів за допомогою передових діагностичних інструментів, одночасно включаючи доповнену реальність (AR) для точної медицини, для більш пацієнтоорієнтованого методу лікування. Основною метою ДТ у роботизованій хірургії на основі доповненої реальності (AR) є персоналізована медицина з використанням індивідуального моделювання пацієнта з баз даних глибокого навчання для точного визначення причини та лікування захворювання.

Завдяки високим показникам успішності інтеграції промислових роботів, створено AR-інтегровану систему для хірургічних втручань, що базується на ROS та Unity3D, для перевірки концепції. Робота базувалася на легкому роботу KUKA, яким можна маніпулювати за допомогою програмного забезпечення TMFlow паралельно з попередньо визначеними програмами. Робот керувався за допомогою Python, де скрипти, такі як MqttOmronMovePublisher**,** упаковують кути суглобів та публікують їх у темі MQTT /omron/command, яка потім

отримується /omron/move/command на стороні ROS після перетворення та десеріалізації JSON. Потім цю інформацію отримує MqttOmronMoveSubscriber, який приєднує ці кути суглобів до відповідного маніпулятора робота та дозволяє контролеру DT досягти бажаної конфігурації. Таким чином, робот OMRON може виконувати кілька рухів, візуалізуючи їх на роботі-привиді на задньому плані. В іншому дослідженні аналогічний метод віртуального відображення в реальне було використано для моделювання операції на черевній порожнині, оцінюючи вирівнювання віртуального робота з 6 ступенями свободи в середовищі доповненої реальності. Інтеграція відбивних дзеркал доповненої реальності дозволяє одночасний перегляд сцени з різних ракурсів, тоді як зображення захоплюються датчиком камери на HMD для аналізу точності вирівнювання. Евклідова відстань між опорною системою центру камери відображається на відстань кожного суглоба шляхом зіткнення курсора з робочим простором доповненої реальності. Похибки, досягнуті між цими суглобами, порівнювалися за допомогою фіксованих, відбивних та одновидових дисплеїв з похибкою вирівнювання 16,5 +/- 11,0 мм, що було менше, ніж без використання відбивних дзеркал.

Сьогодні більшість технологій цифрового моделювання (DT) дозволяють інтеграцію доповненої реальності (AR) для підтримки налаштування моделі на основі відгуків користувачів, занурення та інтуїтивності. Наприклад, прототип ARAILIS надає каліброване цифрове програмне забезпечення для AR-картографування та сегментації зображень за допомогою алгоритму SLAM для виявлення об'єктів. Проміжне програмне забезпечення ROS2 забезпечує зв'язок через модульну архітектуру, що забезпечує безпеку та конфіденційність шифрування. Крім того, вихідні дані процесу калібрування підвищують точність алгоритму ORBSLAM для навчання з учителем координатного картографування реального світу у віртуальний. Співпраця людини в циклі з роботизованими DT є вирішальною вимогою для динамічного моделювання та анотації даних, наприклад, для локалізації пухлин, виявлення невідповідностей та транспонування 3D-моделей. Це дозволяє налаштувати багатокористувацьку систему, до якої інші медичні установи можуть звертатися як до постійної бази

знань, через спільну інтелектуальну платформу «людина-машина».

Незважаючи на поширені прориви в доповненій реальності (AR) для роботизованої хірургії, користувачі таких технологій повідомляють про кілька підводних каменів, які потребують вирішення. В існуючій літературі було розглянуто кілька статей, що стосуються основних прогалин у цій галузі та потенційних покращень ефективності роботизованих платформ. Ці статті були класифіковані за апаратним забезпеченням, програмним забезпеченням та застосуванням DL, загалом 170 статей. Ми зрозуміли, що кільком статям бракувало уваги до точності систем зворотного зв'язку, вирівнювання під час взаємодії, методів реєстрації та безпеки пацієнтів для роботів різної глибини дії (LoA). Ми також виявили труднощі з відхиленням зору під час координації рук і очей для хірурга, що означає, що замість перемикання між реальними та віртуальними сценами для експериментів можна використовувати інтегровану кафедру або платформу. Використання віртуальних моніторів через HoloLens зменшує дискомфорт від постійного відхилення зору та забезпечує кращу ситуаційну обізнаність, які використовували кольорове кодування країв для оптимізації країв резекції. У випадку оклюзії пропонується оптимізувати поле зору оперуючого хірурга та просторове співвідношення окремих орієнтирів таким чином, щоб одночасно була видна лише одна площина. Це значно зменшить когнітивне навантаження клініциста під час операції, а також покращить сприйняття глибини внутрішніх органів та зменшить візуальне засмічення та затримку всієї хірургічної системи. Будь-яке візуальне засмічення, спричинене надмірною кількістю даних у полі зору хірурга, може поставити під загрозу безпечне розміщення кінцевих ефекторів робота навколо чутливих анатомічних стінок. Прозора модель доповненої реальності з різними рівнями вікон забезпечує успішну навігацію інструментів від шарів шкіри до кістки.

Інтеграція доповненої реальності (AR) у хірургію вимагає точного калібрування кінцевих ефекторів для локалізації координат об'єктів інтересу в робочому просторі. Фідуціальні маркери переважно використовуються для локалізації об'єктів на медичних сканах, особливо при попередньому плануванні складних навігаційних процедур. Такі методи, як жорстка та нежорстка

реєстрація таких маркерів, що використовують методи деформації зображення для переміщення тканин, дозволяють точно реконструювати неструктуровані роботизовані середовища, що дозволяє створювати історичну карту траєкторії. На етапі реєстрації зображення, точне перенесення відповідних ознак з доопераційних на інтраопераційні зображення вимагає віртуальних потенційних полів для визначення розташування областей інтересу, таких як пухлини або кровоносні судини. Використання методів ручної реєстрації перед повністю автономною процедурою навігації дозволяє певною мірою усунути будь-які помилки, які можуть бути спричинені оманливою ситуаційною обізнаністю, як у двосторонній реєстрації робота DaVinci. Інтеграція методів DL на цьому етапі перевірки та тестування допомагає системі вивчити правильне положення дефекту у вичерпній базі даних, тим самим забезпечуючи вищу повторюваність.

Незважаючи на безліч переваг, які надає розробка баз даних CNN для AR-навігації, наші дослідження показали, що здійсненність багатьох процедур ускладнюється людськими помилками, такими як рух пацієнта, швидка деформація тканини, такої як легені, та нестабільність клінічного обладнання, а також високий рівень фонового шуму на захоплених медичних зображеннях. Тому вкрай важливо, щоб дослідники подолали розрив у подоланні цих проблем, використовуючи ефективніші алгоритми глибокого навчання, такі як методи деформації зображень, для параметризації зон без ризику в анатомічному просторі. Алгоритми реєстрації, такі як алгоритм голови та капелюха та ітеративний алгоритм найменшої точки (ICP), сприяють вилученню та геометричному перетворенню певних 2D або 3D поверхонь на деформованих мультимодальних зображеннях на основі архітектур нейронних мереж (CNN, RNN та LTSM).

Здатність виявляти зони без зіткнень для точного розміщення кінцевого ефектора вимагає складних розрахунків реконфігурацій робочого простору з одночасним побудовою координат вихідної кривої в межах безпечної межі інтересу. Існує потреба в подальшому розвитку таких алгоритмів, щоб забезпечити кореляцію між зображеннями динамічних органів, таких як серце та легені, у режимі реального часу, з дефляцією, відносно їх маркерних аналогів на

завищених медичних зображеннях. У цих випадках інтеграція цифрового двійника (DT) може стати корисною для відображення та візуалізації руху робота під час виконання операції. Робот-привид дозволяє користувачеві переглядати остаточну конфігурацію робота в RoboDK на етапі попереднього планування, що дозволяє вносити корективи, якщо необхідно, як у змодельованому середовищі, так і через міст MQTT LAN, який з'єднує Unity3D з колаборативним роботом.

Правові та етичні аспекти доповненої реальності (AR) у хірургії обговорювалися в кількох судах через скептицизм, пов'язаний з проведенням операцій на відстані або навіть через межі території. Процес клінічної оцінки та валідації хірургічних роботів на основі доповненої реальності (AR) залишається на ранніх стадіях розробки, і експерименти, проведені на фантомах, таких як органи, надруковані на 3D-принтері, а потім на трупах та пацієнтах, як стверджується, мають найвищі показники точності. Однак, через відсутність доказів підвищення комфорту хірурга або клінічної ефективності таких методів валідації, подальші дослідження, зосереджені на більших наборах даних пацієнтів, вищій точності 3D-реконструкції та сприйнятті глибини, можуть покращити результати клінічної оцінки, готової до доповненої реальності. Незважаючи на постійну критику, поточний успіх AR у хірургічній освіті також може спонукати до подальших досліджень швидшої та точнішої роботи роботів. Хоча це застосування знаходиться на ранніх стадіях через відсутність об'єктивних показників для оцінки його впливу, воно може ще більше покращити продуктивність різних роботів 1-го та 2-го рівнів відповідно до рекомендацій щодо безпеки пацієнтів та етичних норм. Ми також помітили збільшення кількості дозволів FDA щодо маркування CE пристроїв, що використовують доповнену реальність (AR) у хірургії, що є перспективним аспектом розгортання роботів з доповненою реальністю (AR) у лікарнях.

У цій роботі наведено загальний огляд різних хірургічних роботизованих платформ, доступних на ринку та в існуючій літературі, з акцентом на їхні системні архітектури, програмні платформи та методи навчання. Загалом було відібрано та систематично проаналізовано 170 статей з метою визначення відповідної літератури, яка описує типи AR-технологій, що використовуються в

хірургії. AR залишається перспективним інструментом для полегшення завдання хірурга, від стикування станції до розміщення порту та керування кінцевим ефектором. Щоб протидіяти труднощам, що виникають при ручному управлінні, AR-візуалізація допомагає хірургам ефективно виконувати втручання за допомогою HMD, просторових проекторів та інтерфейсів на основі маркерів або без маркерів. Цей огляд зосереджений головним чином на безлічі AR-інтерфейсів, що використовуються в хірургії, зосереджуючись на трьох основних аспектах: «апаратне забезпечення», «програмне забезпечення» та «застосування». Були розглянуті перешкоди на шляху до досягнення оптимальної інтеграції AR, і було представлено широкий спектр рішень для підвищення ефективності існуючих роботів. Здатність усунути візуальний захаращення та оклюзію в полі зору хірурга відкриває двері до нових доповнених моделей з різними шарами та вікнами, які можна вибирати залежно від ступеня важливості. У таких галузях, як торакальна хірургія, гінекологія та пластична хірургія, де система тактильного зворотного зв'язку забезпечує індикацію типу сили, необхідної для втручання, ми виявили, що використання інтеграції доповненої реальності (AR) з датчиками зворотного зв'язку по силі, як у консолі DaVinci master-slave, збільшує сенсорний стимул хірурга, з прямою кореляцією між опорними сигналами та зворотним зв'язком у режимі реального часу від об'єкта інтересу.

Завдяки своїй популярності серед хірургів, доповнена реальність (AR) широко схвалюється дослідницькою спільнотою для операцій, починаючи від виявлення пухлини до визначення місцезнаходження вен за допомогою опорних маркерів, незважаючи на обмеження щодо просторового усвідомлення та оклюзії. Щоб зменшити ризик кровотечі в умовах, коли хірург повинен координувати рухи рук і очей, ми представляємо нову концепцію рефлективних технологій доповненої реальності (AR) та діафрагми (DT), які перебувають на стадії пілотного проекту. Рівень точності в таких областях, як накладання швів, зав'язування вузлів та операції "пік-енд-пласт", значно зріс порівняно з ручними операціями, що надихає на подальші дослідження в цьому секторі. На момент написання цього огляду літератури, наскільки нам відомо, існує обмежена

кількість спеціалізованих статей у галузі доповненої реальності (AR) для хірургічних роботів, що містять детальний огляд нових платформ доповненої реальності з алгоритмічними підходами до цифрового навчання (DL). Робота має на меті виявити прогалини в дослідженнях у таких областях, як апаратні компоненти, специфікації програмного забезпечення та застосування DL на різних хірургічних етапах. Ми вважаємо, що заклали основу для майбутнього AR (доповненої реальності) в хірургії, яка буде корисною не лише для дослідників, але й для хірургів та новачків, які бажають дізнатися про хірургічні втручання за допомогою доповненої реальності з точним розміщенням інструментів, не обмежуючи читача попередніми традиційними тенденціями в цьому секторі.

3.4 Висновки по розділу

У третьому розділі було розглянуто розробку, інтеграцію та оцінювання AR-системи для навчання хірургії. Досліджено методи та метрики оцінювання ефективності AR-систем, що дозволяють визначити якість навчального процесу та рівень взаємодії користувача із системою. Проаналізовано апаратне забезпечення та сенсорні компоненти AR-комплексів, необхідні для забезпечення точного відстеження та відображення об’єктів у реальному середовищі. Також реалізовано інтеграцію програмного забезпечення та розроблено AR-платформу для навчання хірургії. Отримані результати підтверджують ефективність використання технологій доповненої реальності для підготовки фахівців у сфері хірургії та медичної робототехніки.

ВИСНОВКИ

У ході виконання дипломної роботи було досліджено принципи програмування систем доповненої реальності для навчання хірургії та робототехніки, а також розглянуто сучасні підходи до створення інтерактивних медичних навчальних середовищ. Робота охопила аналіз теоретичних основ доповненої та віртуальної реальності, дослідження методів інтеграції AR-технологій із роботизованими хірургічними системами та вивчення особливостей програмної й апаратної реалізації таких комплексів. У процесі дослідження було визначено ключові переваги використання AR-систем у медичній освіті, зокрема підвищення рівня візуалізації, безпечність відпрацювання практичних навичок та можливість інтерактивної взаємодії з віртуальними моделями.

На початковому етапі роботи було проведено аналіз предметної області та сучасних технологій доповненої реальності, які застосовуються у сфері медичного навчання та робототехніки. Розглянуто принципи функціонування AR-систем, методи тривимірної візуалізації, технології комп'ютерного зору та засоби відстеження рухів користувача. Особливу увагу приділено дослідженню взаємодії між системами доповненої реальності та роботизованими хірургічними комплексами, що дозволяє інтегрувати цифрові моделі у реальний простір і забезпечувати підтримку прийняття рішень під час навчання та виконання хірургічних процедур.

У процесі роботи було досліджено методи та інструменти створення AR-систем для ендоскопічних, малоінвазивних і роботизованих хірургічних процедур. Проведено аналіз програмних платформ і середовищ розробки, які забезпечують побудову інтерактивних AR-додатків, інтеграцію медичних даних та підтримку роботи з тривимірними моделями. У роботі досліджено методи інтеграції клінічних даних та візуалізації анатомічних структур у режимі реального часу, що є важливим елементом підготовки майбутніх спеціалістів.

Важливим етапом дослідження стало вивчення методів оцінювання

ефективності AR-систем у навчальному процесі. Було проаналізовано підходи до визначення точності відображення віртуальних об’єктів, швидкодії системи, рівня інтерактивності та якості взаємодії користувача з програмним середовищем. Аналіз показав, що застосування доповненої реальності у навчанні хірургії дозволяє значно зменшити ризики під час підготовки фахівців, забезпечити багаторазове відпрацювання складних процедур та підвищити ефективність засвоєння практичних навичок.

У результаті виконаної роботи встановлено, що системи доповненої реальності мають значний потенціал для використання у сфері медичної освіти та робототехніки. Вони забезпечують інтерактивність навчального процесу, покращують візуалізацію медичних даних, сприяють підвищенню точності виконання хірургічних операцій і дозволяють інтегрувати роботизовані технології у сучасні навчальні комплекси. Перевагами використання AR-технологій є гнучкість програмних рішень, можливість адаптації до різних сценаріїв навчання, підтримка симуляцій складних операцій та підвищення рівня безпеки навчального процесу.

Подальший розвиток таких систем може бути пов’язаний із використанням технологій штучного інтелекту, вдосконаленням алгоритмів комп’ютерного зору, інтеграцією хмарних сервісів і підтримкою колективного дистанційного навчання у віртуальному середовищі.

Отже, поставлена мета роботи була досягнута, а проведене дослідження підтвердило доцільність використання систем доповненої реальності для навчання хірургії та робототехніки. Отримані результати можуть бути використані для подальшого розвитку медичних навчальних платформ, створення інтерактивних симуляторів і вдосконалення сучасних роботизованих систем у сфері медицини.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА

1. AR Foundation Documentation. (2025). docs.unity3d.com. https://docs.unity3d.com/Packages/com.unity.xr.arfoundation@latest

2. Augmented Reality in Surgery. (2024). nature.com. https://www.nature.com/articles/s41746-024-01021-5

3. Azuma, R. (1997). A Survey of Augmented Reality. Presence: Teleoperators and Virtual Environments, 6(4), 355–385. https://doi.org/10.1162/pres.1997.6.4.355

4. Barfield, W. (2015). Fundamentals of Wearable Computers and Augmented Reality. crcpress.com. https://www.routledge.com/Fundamentals-of-Wearable-Computers-and-Augmented-Reality/Barfield/p/book/9781482243529

5. Billinghurst, M., Clark, A., & Lee, G. (2015). A Survey of Augmented Reality. Foundations and Trends in Human–Computer Interaction, 8(2–3), 73–272. https://doi.org/10.1561/1100000049

6. Cai, Y., & Sankaranarayanan, G. (2023). AR-based surgical simulation systems for medical education. IEEE Access, 11, 45821–45837. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3278452

7. C# Documentation. (2025). learn.microsoft.com. https://learn.microsoft.com/en-us/dotnet/csharp/

8. Chen, X., & Zhang, Y. (2024). Augmented reality visualization in robotic-assisted surgery. Journal of Medical Systems, 48(6), 112–126. https://doi.org/10.1007/s10916-024-02098-7

9. Computer Vision for Medical Applications. (2024). opencv.org. https://opencv.org/

10. da Vinci Surgical System Overview. (2025). intuitive.com. https://www.intuitive.com/en-us/products-and-services/da-vinci

11. Digital Twins in Healthcare and Surgery. (2024). ieee.org. https://ieeexplore.ieee.org/document/10458763

12. HoloLens 2 Documentation. (2025). learn.microsoft.com. https://learn.microsoft.com/en-us/hololens/

13. IEEE Standards for Augmented and Virtual Reality. (2024). ieee.org. https://standards.ieee.org/

14. Kim, S., & Park, H. (2023). Real-time AR navigation for minimally invasive surgery. Computers in Biology and Medicine, 163, 107142. https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2023.107142

15. Kirner, C., & Siscoutto, R. (2007). Fundamentals, Technology and Applications of Virtual Reality. books.google.com. https://books.google.com/books?id=qTHvAAAAMAAJ

16. Kumar, R., & Lee, D. (2025). Interactive AR platforms for robotic surgery training. ACM Transactions on Multimedia Computing, Communications, and Applications, 21(1), 1–22. https://doi.org/10.1145/3698712

17. Medical Augmented Reality Conference Proceedings. (2024). springer.com. https://link.springer.com/conference/mar

18. Mixed Reality Toolkit Documentation. (2025). learn.microsoft.com. https://learn.microsoft.com/en-us/windows/mixed-reality/mrtk-unity/

19. Murphy, R. (2019). Introduction to AI Robotics. mitpress.mit.edu. https://mitpress.mit.edu/9780262534642/introduction-to-ai-robotics/

20. OpenXR Specification. (2025). khronos.org. https://www.khronos.org/openxr/

21. OpenCV Documentation. (2025). docs.opencv.org. https://docs.opencv.org/

22. OpenGL Documentation. (2025). opengl.org. https://www.opengl.org/documentation/

23. Park, J., & Kim, T. (2024). 3D visualization methods in augmented reality surgical systems. Sensors, 24(5), 1845. https://doi.org/10.3390/s24051845

24. Python Documentation. (2025). python.org. https://docs.python.org/3/

25. Robotics and Autonomous Systems Journal. (2025). sciencedirect.com. https://www.sciencedirect.com/journal/robotics-and-autonomous-systems

26. Rosenberg, L. (1992). The Use of Virtual Fixtures as Perceptual Overlays to Enhance Operator Performance in Remote Environments. NASA Technical Report. https://ntrs.nasa.gov/citations/19920016940

27. ROS Documentation. (2025). docs.ros.org. https://docs.ros.org/

28. Schmalstieg, D., & Hollerer, T. (2016). Augmented Reality: Principles and Practice. pearson.com. https://www.pearson.com/en-us/subject-catalog/p/augmented-reality-principles-and-practice/P200000003420

29. Singh, P., & Roy, A. (2023). Immersive AR environments for medical training. Virtual Reality, 27(3), 2211–2225. https://doi.org/10.1007/s10055-023-00789-2

30. SteamVR Documentation. (2025). developer.valvesoftware.com. https://developer.valvesoftware.com/wiki/SteamVR

31. Surgical Robotics: Systems Applications and Visions. (2011). springer.com. https://link.springer.com/book/10.1007/978-1-4419-1126-1

32. Three.js Documentation. (2025). threejs.org. https://threejs.org/docs/

33. Unity Documentation. (2025). docs.unity3d.com. https://docs.unity3d.com/

34. Unreal Engine Documentation. (2025). dev.epicgames.com. https://dev.epicgames.com/documentation/en-us/unreal-engine

35. Unity Learn: AR Development. (2025). learn.unity.com. https://learn.unity.com/

36. Vuforia Engine Developer Library. (2025). developer.vuforia.com. https://developer.vuforia.com/library/

37. Wang, L., & Zhao, H. (2024). Machine learning integration in AR-assisted robotic surgery. IEEE Transactions on Medical Robotics and Bionics, 6(2), 310–322. https://doi.org/10.1109/TMRB.2024.3378124

38. WebXR Device API. (2025). developer.mozilla.org. https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/API/WebXR_Device_API

39. XR Interaction Toolkit Documentation. (2025). docs.unity3d.com. https://docs.unity3d.com/Packages/com.unity.xr.interaction.toolkit@latest

40. Zhou, F., Duh, H., & Billinghurst, M. (2008). Trends in Augmented Reality Tracking, Interaction and Display. Human-Computer Interaction, 17(2), 193–202. https://doi.org/10.1201/9780203887875.ch10

БІБЛІОГРАФІЧНА ДОВІДКА

Тема бакалаврської роботи: "Програмування систем доповненої реальності для навчання хірургії та робототехніки"

Обсяг пояснювальної записки: 104 аркушів

Дата закінчення дипломної роботи 10 червня 2026р.

Підпис студента _____