

Гончарук-Хомин Мирослав Юрійович,
*PhD, доцент, доцент кафедри терапевтичної стоматології,
ДВНЗ «Ужгородський національний університет»
ORCID ID: 0000-0002-7482-3881
м. Ужгород, Україна*

Пальчиков Анатолій Володимирович,
*кандидат медичних наук, докторант ННІ стоматології та
лабораторної медицини,
ДВНЗ «Ужгородський національний університет»
ORCID ID: 0000-0001-5565-6224
м. Ужгород, Україна*

Крічфалушій Сергій Іванович,
*PhD, доцент кафедри ортопедичної стоматології,
ДВНЗ «Ужгородський національний університет»
ORCID ID: 0000-0002-2469-0347
м. Ужгород, Україна*

Бойчук Микола Михайлович,
*PhD, доцент кафедри ортопедичної стоматології,
ДВНЗ «Ужгородський національний університет»
ORCID ID: 0000-0001-9735-3651
м. Ужгород, Україна*

АНАЛІЗ ДАНИХ ЩОДО ТОЧНОСТІ МОБІЛЬНОЇ ТА ПЛАНШЕТ-БАЗОВАНОЇ ФОТОГРАМЕТРІЇ ДЛЯ РЕЄСТРАЦІЇ КООРДИНАТНОГО ВЗАЄМОПОЛОЖЕННЯ ДЕНТАЛЬНИХ ІМПЛАНТАТІВ

Вступ. Поява нових мобільних рішень для фотограмметрії, зокрема систем, котрі функціонують на основі смартфонів та планшетів, сприяє апроксимізації можливостей сучасних цифрових технологій у клінічну практику без необхідності покупки додаткової апаратної складової, а лише обмежуючись набором маркерів з каліброваним координатним кодуванням та програмною складовою у формі мобільного додатку. Узагальнення та опрацювання даних доказової бази щодо досвіду використання мобільної та планшет-базованої фотограмметрії сприятиме об'єктивізації показників точності даної технології з урахуванням умов, в котрих попередньо проводилась їх валідація, а також сприятиме ідентифікації потенційних методологічних джерел варіабельності описаних результатів різних досліджень.

Мета дослідження. Провести структурований аналіз даних доказової бази щодо метрологічної точності мобільних і планшет-базованих технологій фотограмметричної реєстрації координатного положення дентальних імплантатів та визначити методологічні особливості їх експериментальної й клінічної валідації з урахуванням використаних референтних систем, критеріїв оцінки правдивості та прецизійності, а також рівня стандартизації дослідницьких протоколів.

Матеріали та методи. Дослідження було реалізовано у форматі оглядово-аналітичного опрацювання доступних наукових даних, присвячених досвіду використання мобільної та планшет-базованої фотограмметрії для реєстрації координатного взаємоположення дентальних імплантатів в структурі цифрових протоколів ортопедичної реабілітації. Пошук наукових публікацій, релевантних меті та предметній спрямованості огляду, здійснювали з використанням трьох електронних бібліографічних та академічних інформаційно-пошукових ресурсів: бази даних PubMed, бази даних Scopus і пошукової системи Google Scholar. Для кожної релевантної публікації проводили структуровану екстракцію даних щодо дизайну дослідження, лабораторного або клінічного характеру апробації, типу та кількості імплантатів або мульти-юніт абатментів, типу застосовуваного мобільного пристрою, типу використовуваної мобільної фотограмметричної системи, типу порівняльної системи (компаратора), референтного методу, критеріїв оцінки правдивості та прецизійності, а також основних кількісних результатів.

Результати досліджень та їх обговорення. Сукупна кількість публікацій, присвячених аспектам мобільної та планшет-базованої фотограмметрії, ідентифікованих в наукометричних базах, була представлена 8 науковими роботами, з яких в 7 було проведено оцінку точності застосовуваного підходу з використанням різних верифікаційних критеріїв, і в 1 – детально описано алгоритм реалізації підходу з використанням системи PIC app®. На момент проведення даного огляду можна виокремити два комерційні рішення мобільної фотограмметрії для реєстрації положення дентальних імплантатів (система PIC app® та система T-Marker), а також одне експериментальне рішення із залученням можливостей мобільної відеозйомки з послідовною реконструкцією отриманих даних на основі алгоритмів глибинного навчання. Загальний рівень доказовості зазначених технічних рішень слід оцінювати як ранній і переважно доклінічний. Найбільш обґрунтованим показанням до використання систем мобільної фотограмметрії

© Гончарук-Хомин М. Ю., Пальчиков А. В., Крічфалушій С. І., Бойчук М. М., 2026



Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

у імплантологічній практиці на поточному етапі розвитку технології з урахуванням доступних даних доказової бази є реєстрація положення чотирьох-шести імплантатів на рівні мультиюніт-абатментів в умовах реабілітації беззубих щелеп, в умовах коли традиційне інтраоральне сканування може бути вразливим до розвитку кумулятивної похибки.

Висновки. Мобільна та планшет-базована фотограмметрія є перспективним напрямом цифрової реєстрації просторового положення дентальних імплантатів, який у лабораторних і первинних клінічних дослідженнях продемонстрував потенційно прийнятні показники лінійної та кутової точності, а за окремими параметрами – переваги порівняно з традиційним інтраоральним скануванням. Враховуючи гетерогенність дизайнів проаналізованих досліджень для оптимізації якості доказової бази щодо показників точності технології мобільної фотограмметрії у імплантологічній практиці доцільним є реалізація подальших цільових наукових робіт у відповідності до стандартизованих протоколів з чітко визначеним референтним методом порівняння та уніфікованими критеріями оцінки.

Ключові слова: дентальні імплантати, ортопедична реабілітація, фотограмметрія, цифрова стоматологія.

Goncharuk-Khomyn Myroslav Yuriyovich, PhD, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Restorative Dentistry, Uzhhorod National University; ORCID ID: 0000-0002-7482-3881, Uzhhorod, Ukraine

Palchykov Anatolii Volodymyrovych, Candidate of Medical Sciences, Doctoral Researcher at the Educational and Scientific Institute of Dentistry and Laboratory Medicine, Uzhhorod National University; ORCID ID: 0000-0001-5565-6224, Uzhhorod, Ukraine

Krichfalushii Sergii Ivanovych, PhD, Associate Professor at the Department of Restorative Dentistry, «Uzhhorod National University»; ORCID ID: 0000-0002-2469-0347, Uzhhorod, Ukraine

Boichuk Mykola Mykhaylovych, PhD, Associate Professor at the Department of Restorative Dentistry, Uzhhorod National University; ORCID ID: 0000-0002-2469-0347, Uzhhorod, Ukraine

ANALYSIS OF ACCURACY DATA ON MOBILE- AND TABLET-BASED PHOTOGRAMMETRY FOR RECORDING THE SPATIAL COORDINATE POSITION OF DENTAL IMPLANTS

Introduction. The emergence of new mobile photogrammetric solutions, including systems operating on smartphones and tablets, has facilitated the integration of contemporary digital technologies into clinical practice without the need to purchase additional dedicated hardware. Their implementation generally requires only a set of markers with calibrated coordinate encoding and a software component in the form of a mobile application. The synthesis and analysis of the available evidence regarding the use of mobile- and tablet-based photogrammetry may contribute to a more objective assessment of the accuracy of this technology, taking into account the conditions under which it has previously been validated, and may facilitate the identification of potential methodological sources of variability among the results reported in different studies.

Objective. To perform a structured analysis of the available evidence regarding the metrological accuracy of mobile- and tablet-based technologies for photogrammetric registration of the spatial position of dental implants and to determine the methodological characteristics of their experimental and clinical validation, considering the reference systems used, the criteria applied to assess trueness and precision, and the level of standardization of the study protocols.

Materials and Methods. Study was conducted as a review and analytical assessment of the available scientific evidence concerning the use of mobile- and tablet-based photogrammetry for recording the relative spatial positions of dental implants within digital protocols for prosthetic rehabilitation. Scientific publications relevant to the objective and scope of the review were identified using three electronic bibliographic and academic information-retrieval resources: PubMed, Scopus, and Google Scholar. For each relevant publication, structured data extraction was performed with regard to the study design, the laboratory or clinical nature of the validation, the type and number of implants or multi-unit abutments, the type of mobile device used, the mobile photogrammetric system evaluated, the comparison system, the reference method, the criteria applied to assess trueness and precision, and the principal quantitative outcomes.

Results and discussion. A total of 8 publications addressing mobile- and tablet-based photogrammetry were identified in the scientometric databases. Seven of these studies evaluated the accuracy of the investigated approach using different verification criteria, whereas one publication provided a detailed description of the workflow implemented with the PIC app system. At the time of this review, two commercially available mobile photogrammetric solutions for recording dental implant positions could be identified, which includes the PIC app system and the T-Marker system, together with one experimental approach involving video acquisition followed by data reconstruction using deep-learning algorithms. The overall level of evidence supporting these technical solutions should currently be regarded as preliminary and predominantly preclinical. Based on the presently available evidence, the most substantiated indication for the use of mobile photogrammetric systems in implant dentistry is the registration of the positions of four to six implants at the multi-unit abutment level during the rehabilitation of edentulous arches, particularly in situations in which conventional intraoral scanning may be susceptible to cumulative stitching errors.

Conclusions. Mobile- and tablet-based photogrammetry represents a promising approach to the digital registration of the spatial coordinate positions of dental implants. Laboratory investigations and preliminary clinical studies have demonstrated potentially acceptable levels of linear and angular accuracy, with certain parameters showing advantages over conventional intraoral scanning. Given the methodological heterogeneity of the studies included in the analysis, further targeted investigations should be conducted according to standardized protocols, with clearly defined reference methods and unified assessment criteria, to improve the quality of the evidence supporting the application of mobile photogrammetry in implant dentistry.

Key words: dental implants, prosthetic rehabilitation, photogrammetry, digital dentistry.

Вступ. Помилки у передачі істинного координатного взаємоположення дентальних імплантатів на етапах ортопедичної реабілітації пацієнтів з повною адентією конструкціями з опорою на дентальні імплантатах можуть провокувати розвиток ефекту кри-

тичної просторової невідповідності каркасу протезу щодо локалізації абатментів, що в свою чергу унеможливорює його пасивну посадку (внаслідок так званого ефекту «місфіту») та обґрунтовує необхідність проведення додаткових лабораторних корекцій або ж

і повних переробок [1, 2, 3]. В умовах, коли посадка конструкції на дентальні імплантати забезпечується завдяки величині прикладеного тиску, а не завдяки координатній взаємоузгодженості каркасу та абатментів, лабораторні дослідження продемонстрували формування ефекту концентрації напруг та деформацій, що в свою чергу можуть призводити до низки біологічних та технічних ускладнень [1, 3, 4, 5, 6]. Водночас клінічно значуща межа допустимої похибки точності посадки конструкцій на дентальні імплантати не є універсально стандартизованою: у різних роботах застосовуються відмінні лінійні, кутові та поверхневі показники у якості критеріїв, а розбіжності рівнів точності встановлені із використанням цифрових методів дослідження не завжди прямо відповідають фактичній величині «місфіту» ортопедичної конструкції в клінічних умовах [4, 5, 6, 7, 8].

Алгоритми класичного інтраорального сканування передбачають формування тривимірної моделі ділянки ротової порожнини шляхом послідовного зшивання певної кількості сканів-фрагментів з частковим перекриванням проєкцій таких між собою [9]. Попередні дослідження продемонстрували, що вища продовжуваність сканування асоційована з вищим ризиком накопичення похибок, а в умовах відсутності зубів чи інших стабільних фідуціарних маркерів, наявності ділянок рухомої слизової оболонки та значних міжімплантатних проміжків локальна похибка зшивання демонструє тенденцію до зростання та накопичення [9, 10]. Натомість метод фотограмметрії, адаптований для використання у стоматологічній практиці, дозволяє уникнути реконструкції всієї поверхні протезного ложа з встановленими імплантатами, і передбачає обрахунок лише взаємного положення кодованих оптичних маркерів, зафіксованих на імплантатах або мультиюніт-абатментах, за серією зображень, отриманих із різних вихідних позицій камери [11, 12, 13]. У результаті формується файл, котрий містить дані щодо координатного взаєморозміщення імплантатів, який надалі згідно концепцій протоколів цифрової реабілітації комбінують із інтраоральним сканом поверхні м'яких тканин, цифровим відбитком щелепи-антагоніста та реєстратом міжщелепного співвідношення.

До 2025 року метод фотограмметрії в практиці протезування з опорою на дентальні імплантатах переважно асоціювався з окремими спеціалізованими системами, котрі відрізнялися за дизайном застосовуваних камер, наборами маркерів та алгоритмами реконструкції координатних складових [14, 15]. Відтак попри повідомлені високі рівні правдивості та прецизійності таких фотограмметричних систем, для їх впровадження в клінічну практику необхідним було придбання вузькоспеціалізованого обладнання, а також реалізація навчальної складової для комбінування даних фотограмметрії та інтраорального сканування [14, 15]. Частково даний аспект був вирішений завдяки появі внутрішньоротової фотограмметрії, яка сприяла оптимізації роботи з цифровими відбитками через використання інтраорального сканера і як апарату для реєстрації профілю м'яких тканин,

і як апарату для реєстрації координат горизонтально-модифікованих абатментів з послідуною їх фотограмметрично-аналогічною реконструкцією [15, 16]. Водночас варто зазначити, що попри заявлений принцип внутрішньоротової фотограмметрії, суміщення координат в ході обробки таких технологією штучного інтелекту, все одно проводиться за певною вихідною кількістю фрагментів-сканів, скомпільованих між собою, в кількості мінімальної необхідній для подальшої автоматизованої фотограмметрично-аналогічної реконструкції [16, 17].

Поява нових мобільних рішень для фотограмметрії, зокрема систем, котрі функціонують на основі смартфонів та планшетів, сприяла апроксимізації можливостей сучасних цифрових технологій у клінічну практику без необхідності покупки додаткової апаратної складової, а лише обмежуючись набором маркерів з каліброваним координатним кодуванням та програмною складовою у формі мобільного додатку [18-24].

Стрімкість появи публікацій, присвячених тематичі мобільної фотограмметрії за 2025-206 рр., створює ризик некритичного ототожнення мобільної фотограмметрії з традиційними системами фотограмметрії [18-24]. Спеціалізовані фотограмметричні камери зазвичай характеризуються попередньо відкаліброваними та стабільними параметрами оптичної системи [13, 14, 15], проте камера смартфона чи планшета, на відміну від класичних фотограмметричних камер, характеризується змінною фокусною відстанню, опціями автоматичної активації функцій експозиції та стабілізації, наявністю внутрішніх алгоритмів обробки зображення та залежністю від конкретної моделі пристрою й версії встановленої операційної системи. Попри те, що програмний алгоритм мобільного додатку для фотограмметрії може компенсувати частину цих факторів шляхом розпізнавання фідуціарних маркерних координат, аналізу змін положення камери, фільтрації невдалих кадрів та багатокadroвої оптимізації, клінічну цінність даного підходу необхідно оцінювати не лише за фактом апаратної оптимізації, а за валідованою точністю системи в реальних клінічних умовах (рис. 1).

Актуальність аналізу даних щодо точності мобільної та планшет-базованої фотограмметрії для реєстрації координатного взаємоположення дентальних імплантатів також обґрунтована тим, що за перше півріччя 2026 року було опубліковано лабораторні порівняння мобільних систем фотограмметрії із класичною фотограмметриєю, інтраоральним скануванням та горизонтальними некаліброваними скан-маркерами, а також перші клінічні дослідження-апробації даного підходу [18-24], проте критерії щодо оцінки точності мобільної фотограмметрії у вищезгаданих дослідженнях не були стандартизованими та уніфікованими, як і застосовані підходи референтного порівняння. Відтак узагальнення та опрацювання цих даних сприятиме об'єктивізації показників точності технології та підходу мобільної та планшет-базованої фотограмметрії з урахуванням умов, в котрих попередньо проводилась їх валідація, та сприятиме ідентифікації потенційних методологічних джерел варіабель-

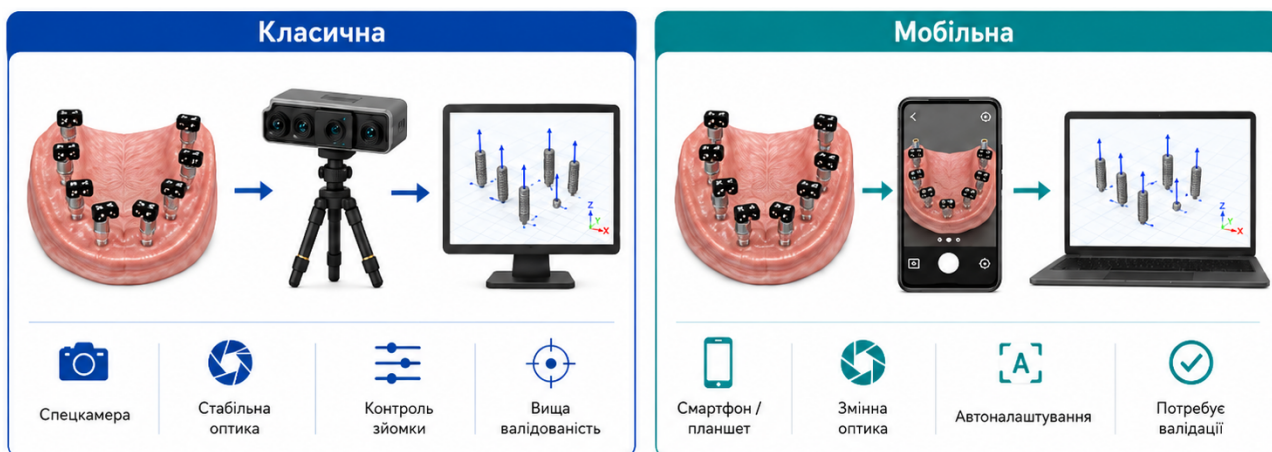


Рис. 1. Принципові відмінності класичних систем позаротової фотограмметрії та мобільної фотограмметрії

ності описаних результатів. З практичної точки зору такий аналіз також дозволить визначити потенційне місце мобільної та планшет-базованої фотограмметрії у структурі сучасних цифрових протоколів ортопедичної реабілітації конструкціями з опорою на дентальних імплантатах, зокрема як більш доступної та портативної альтернативи спеціалізованим фотограмметричним системам.

Мета. Провести структурований аналіз даних доказової бази щодо метрологічної точності мобільних і планшет-базованих технологій фотограмметричної реєстрації координатного положення дентальних імплантів та визначити методологічні особливості їх експериментальної й клінічної валідації з урахуванням використаних референтних систем, критеріїв оцінки правдивості та прецизійності, а також рівня стандартизації дослідницьких протоколів.

Матеріали та методи. Дослідження було реалізовано у форматі оглядово-аналітичного опрацювання доступних наукових даних, присвячених досвіду використання мобільної та планшет-базованої фотограмметрії для реєстрації координатного взаємоположення дентальних імплантів в структурі цифрових протоколів ортопедичної реабілітації. Пошук та подальший відбір публікацій проводили з орієнтацією на ідентифікацію робіт, у яких смартфон або планшет виступав основним оптичним пристроєм для реєстрації положення спеціалізованих маркерів, зафіксованих на встановлених інтраосальних опорах безпосередньо або ж через систему мульти-юніт абатмента, із подальшим програмним відтворенням їх просторових координат.

Пошукову стратегію формували із застосуванням комбінацій термінів (ключових слів): «dental implant photogrammetry», «mobile photogrammetry», «smartphone photogrammetry», «tablet-based photogrammetry», «approximated photogrammetry», «implant position», «implant scan accuracy», «complete-arch implant scan» та «implant coordinate registration». Додатково проводили аналіз бібліографічних списків ідентифікованих публікацій та пов'язаних робіт із метою виявлення досліджень, потенційно релевантних сформованому предмету огляду.

Пошук наукових публікацій, релевантних меті та предметній спрямованості огляду, здійснювали з вико-

ристанням трьох електронних бібліографічних та академічних інформаційно-пошукових ресурсів: бази даних PubMed (<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/>), бази даних Scopus (<https://www.scopus.com/>) і загальнодоступної академічної пошукової системи Google Scholar (<https://scholar.google.com/>) (рис. 2) [25, 26].

До основного масиву аналізу включали оригінальні дослідження, в яких: 1) був описаний досвід застосування мобільного телефону або планшета для фотограмметричної або ж фотограмметрично-подібної реєстрації положення дентальних імплантів у відповідності до координатного взаєморозміщення зафіксованих на них фідуціальних маркерів; 2) використовували спеціалізовані фідуціальні, кодовані або інші маркери, позиціоновані на рівні імплантів чи мульти-юніт абатментів; 3) було наведено результати лабораторної чи клінічної апробації технології мобільної фотограмметрії та/або її порівняння з класичною фотограмметриєю, інтраоральним скануванням чи альтернативними методами цифрової реєстрації положення дентальних імплантів, незалежно від типу використовуваних критеріїв оцінки точності.

Для кожної включеної публікації проводили структуровану екстракцію даних щодо дизайну дослідження, лабораторного або клінічного характеру апробації, типу та кількості імплантів або мульти-юніт абатментів, типу застосовуваного мобільного пристрою, типу використовуваної мобільної фотограмметричної системи, типу порівняльної системи (компаратора), референтного методу, критеріїв оцінки правдивості та прецизійності, а також основних кількісних результатів. Особливу увагу приділяли типу використовуваної референтної технології, оскільки у різних роботах еталонні координатні дані були отримані із застосуванням координатно-виміральної машини, промислового або лабораторного сканера, класичної екстраоральної фотограмметричної системи чи іншого цифрового методу, відтак з огляду на це результати досліджень із різними референтними системами не розглядали як безпосередньо взаємопорівнювані.

Кількісні результати систематизували відповідно до використаних авторами метрологічних критеріїв

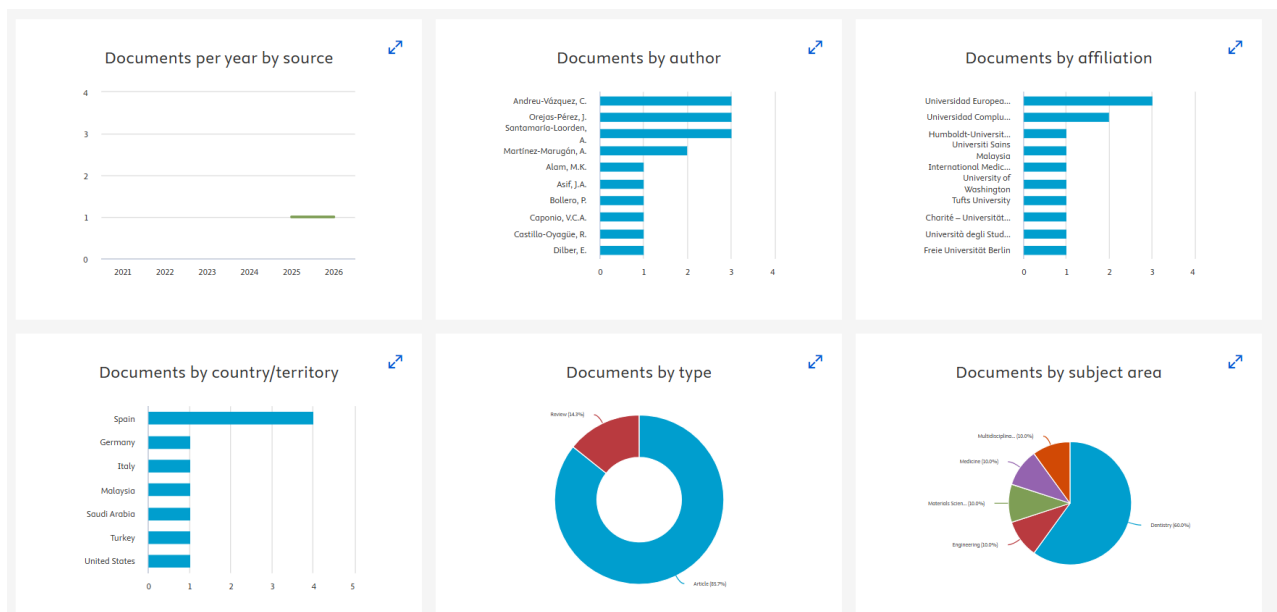


Рис. 2. Результати пошуку за комбінаціями ключових слів у базі даних Scopus

оцінки (лінійні евклідові відхилення, кутові відхилення, показники середньоквадратичного відхилення положення центрів, показники середньоквадратичного відхилення геометрії скан-маркера або скан-абатмента, показники правдивості та прецизійності), при цьому лінійні значення уніфікували до мікрометрів, а кутові – до градусів. Показники представляли у тому статистичному форматі, в якому вони були наведені у первинних роботах, переважно як середнє значення $\pm$ стандартне відхилення, із додатковим урахуванням 95% довірчих інтервалів та рівнів статистичної значущості за їх наявності.

Після завершення відбору та вилучення необхідної інформації з включених публікацій усі отримані відомості об'єднували в єдиний масив даних для подальшого аналізу. Упорядкування та групування даних здійснювали в середовищі Microsoft Excel 2019 (Microsoft Corporation, США) у відповідності до структури розробленої адаптованої таблиці, в якій окремі дослідження реєстрували як самостійні одиниці спостереження, тоді як відповідні поля таблиці відображали заздалегідь установлені категорії даних (відомості про публікацію, характеристики дизайну та організації дослідження, особливості застосованих методів, а також ключові кількісні й описові результати). Прямого статистичного порівняння результатів різних досліджень не проводилось через виражену методологічну гетерогенність включених наукових робіт, зумовлену відмінностями застосовуваних референтних систем, типів досліджуваних моделей, кількості та просторового розташування імплантатів, конструкції маркерів і застосованих критеріїв оцінки точності [25, 26]. Відтак синтез результатів, описаних у попередніх дослідженнях, проводили переважно на описово-порівняльному рівні з урахуванням умов, у яких була валідована технологія мобільної фотограмметрії.

Виклад основного матеріалу дослідження. Сукупна кількість публікацій, присвячених аспектам

мобільної та планшет-базованої фотограмметрії для реєстрації координатного положення дентальних імплантатів, ідентифікованих в наукометричних базах була представлена 8 науковими роботами, з яких в 7 було проведено оцінку точності застосовуваного підходу з використанням різних верифікаційних критеріїв, і в 1 – деталізовано описано алгоритм реалізації підходу з використанням системи PIC app®.

На момент проведення даного огляду можна виокремити два комерційні рішення мобільної фотограмметрії для реєстрації положення дентальних імплантатів (система PIC app® (PIC dental, Torrelodones, Іспанія), в якій смартфон дозволяє зареєструвати положення кодованих маркерів-прапорців, а програмний алгоритм реконструює отримані дані щодо координатного положення імплантатів [18, 19, 20, 21, 22] – 5 досліджень (62,5%); система T-Marker (T-Marker™, TruAbutment Inc., Irvine, США), в якій планшет iPad Pro використовується для послідовної реєстрації положення маркерів, встановлених на мультиюніт-абатментах, після чого система формує цифровий файл імплантатних позицій [23, 24] – 2 дослідження (25%)), а також одне експериментальне рішення із залученням можливостей відеозйомки з послідовною реконструкцією отриманих даних на основі алгоритмів глибинного навчання [27] – 1 дослідження (12,5%) (рис. 3-4).

Для усіх проаналізованих рішень застосовуваний мобільний пристрій (смартфон чи планшет) не можна інтерпретувати ні у якості самодостатнього «інтраорального сканера» (оскільки він реєструє переважно координатну інформацію положення маркерів, тоді як поверхня слизової, антагоністи і оклюзійне співвідношення потребують додаткового джерела даних від власне інтраорального сканера), ні в якості повного відповідника спеціалізованої фотограмметричної камери, оскільки камери смартфона та планшета працюють на принципах частково відмінних від таких, закладених в основу класичних систем фотограмме-

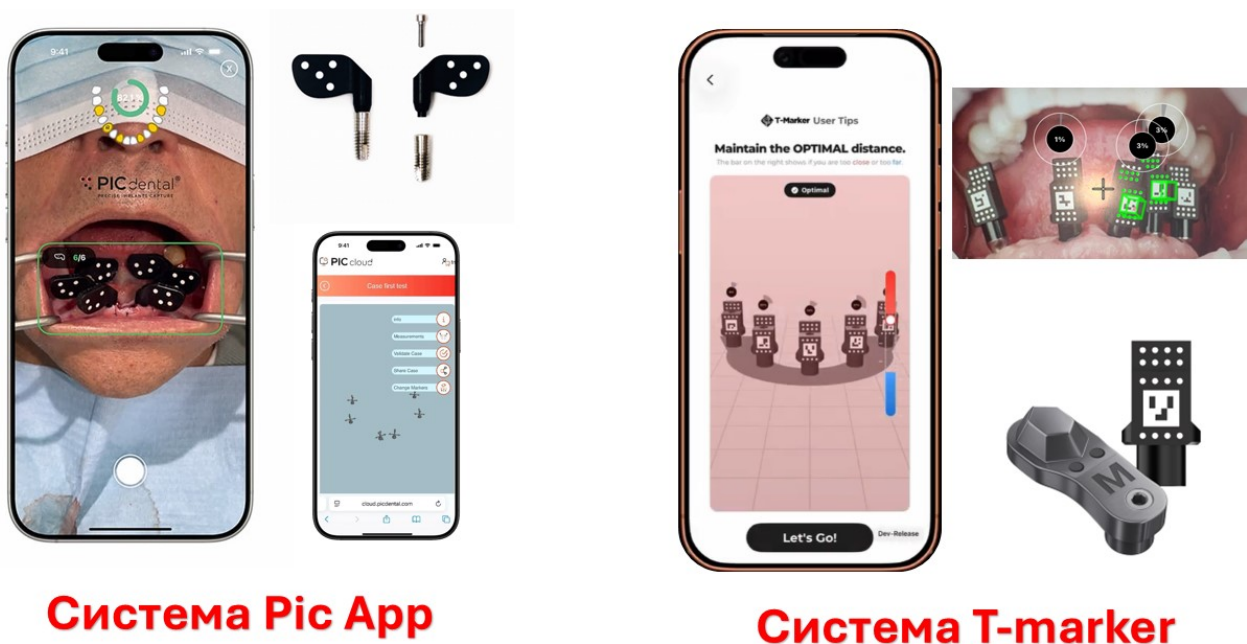


Рис. 3. Приклади комерційних зразків мобільної фотограмметрії: системи PIC app® та T-Marker™

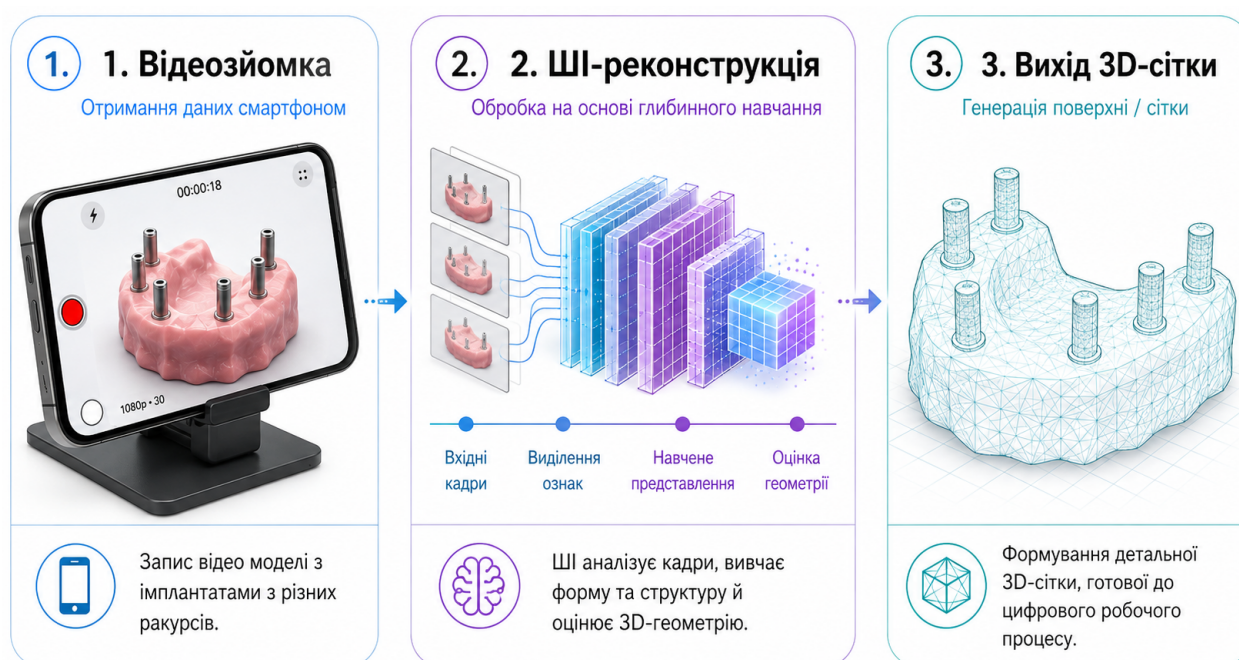


Рис. 4. Принцип реалізації експериментального підходу Li J. та колег щодо реконструкції положення скан-абатментів на основі опрацювання даних відеозйомки, зробленої смартфоном, із застосуванням моделі глибинного навчання [27]

трі. Короткий опис технологічних рішень мобільної фотограмметрії, описаних в спеціалізованій медичній літературі представлений у таблиці 1.

Важливим також є розмежування мобільної фотограмметрії для реєстрації положення специфічних фідуціальних маркерів, а відтак – і асоційованих з ними внутрішньокісткових опор, від мобільної фотограмметричної реконструкції поверхні беззубої щелепи чи інших анатомічних ділянок. Роботи, у яких за допомогою смартфонних застосунків або LiDAR

створювали полігональну модель беззубої щелепи не ґрунтуються на мобільних рішеннях, які орієнтовані на метрологічно контрольоване визначення положення скан-маркерів, зафіксованих на імплантатах [28–31]. Такі підходи демонструють потенціал мобільної оптики, але не можуть безпосередньо замінювати системи з валідованими фідуціальними маркерами [28–31].

Gomez-Polo M. та співавтори описали робочий процес з використанням PIC app®, який ілюструє, що мобільна фотограмметрична реєстрація є лише одним

Короткий опис технологічних рішень мобільної фотограмметрії, описаних в спеціалізованій медичній літературі

Клас	Приклад	Пристрій	Маркер	Основний результат	Додаткові дані	Рівень доказовості
Смартфонна мобільна фотограмметрія	PIC app®	Камера смартфона; у дослідженнях застосовували сучасні версії iPhone	Кодовані фідуціарні маркери-прапорці	Координати й осі імплантатів у цифровому файлі	Окремий скан м'яких тканин, антагоніста та міжщелепових співвідношень	Порівняльні лабораторні та клінічні дослідження; аналіз впливу дизайну застосованих маркерів
Планшет-базова фотограмметрія	T-Marker	Камера iPad Pro (описані варіанти застосування iPhone)	Спеціальні T-маркери	Координати й осі імплантатів у цифровому файлі	Окремий скан м'яких тканин, антагоніста та міжщелепових співвідношень	Порівняльні лабораторні та клінічні дослідження
Трьохмірна реконструкція на основі даних відеозйомки зі смартфона	Експериментальний зразок в дослідженні Li J. та колег	Камера iPhone 15 Pro Max та модель високоточного нейромережевого відтворення тривимірної поверхні об'єкта	Скан-абатмента CARES Mono Scanbody (Institute Straumann AG, Базель, Швейцарія)	Stl-файл моделі з встановленими скан-абатментами	Не уточнено	Порівняльне лабораторне дослідження

із складових компонентів ортопедичної цифрової реабілітації пацієнтів повнодуговими конструкціям з опорою на дентальних імплантатах [18]. Автори чітко визначили, що смартфонний застосунок формує лише файл з визначеним координатним положенням імплантатів на основі фотограмметричної реконструкції, в той час як інтраоральне сканування дозволяє перенести в цифрове середовище поверхню м'яких тканин із видимими орієнтирами, скан щелепи-антагоніста та реєстрат статичних міжщелепових співвідношень [18]. В структурі CAD-середовища координатний файл суміщають із анатомічним сканом і використовують для подальшого дизайну конструкції. Практичний протокол, деталізований Gomez-Polo M. та співавторами, може бути структурований у шість послідовних етапів, які включають: 1) перевірку стабільності мульти-юніт абатментів й очищення платформ; 2) встановлення маркерів із контрольованим торком відповідно до інструкції системи; 3) фотограмметричну реєстрацію з усіх необхідних ракурсів зйомки для належної реконструкції; 4) перевірку програмного індикатора щодо повноти реєстрації та проведення повторних записів за наявності невизначених маркерів; 5) інтраоральне сканування проекції м'яких тканин, щелепи-антагоніста та статичних міжщелепових співвідношень; 6) CAD-суміщення, візуальний контроль суперімпозиції бібліотечних компонентів і клінічна верифікація пасивності посадки виготовленої конструкції [18].

Першим прямим лабораторним дослідженням опції мобільної фотограмметрії стало порівняння PIC app® із класичною фотограмметрією PIC system® на досліджуваній моделі беззубої щелепи з шістьма встановленими аналогами мульти-юніт абатментів [20]. Особливість даного дослідження полягає в тому, що кожену

із апробованих систем валідували по відношенню до координатно-вимірювальної машини, як еталонного методу [29]. Для класичної позаротової фотограмметрії PIC system® середні лінійна та кутова розбіжності реєстрації положення дентальних імплантатів в порівнянні із параметрами, зареєстрованими координатно-вимірювальною машиною, становили $18,21 \pm 12,21$ мкм і $0,10 \pm 0,07^\circ$ відповідно, тоді як для PIC app® – $30,92 \pm 20,88$ мкм і $0,16 \pm 0,09^\circ$ [20]. Різниця правдивості отриманих показників була статистично значущою щодо лінійних та кутових параметрів при порівнянні системи на користь класичної екстраоральної фотограмметрії PIC system®, крім того класична фотограмметрія також характеризувалася кращою лінійною прецизійністю, проте ангулярна прецизійність обох методів не відрізнялася [20]. Середні відмінності правдивості між PIC app® та PIC system® становили 12,70 мкм (95% довірчий інтервал [ДІ]: 10,47–14,94; $p < 0,001$) для евклідових лінійних вимірювань та $0,07^\circ$ (95% ДІ: 0,05–0,07; $p < 0,001$) для кутових вимірювань [20]. Водночас отримані результати не слід трактувати як доказ клінічної еквівалентності двох апробованих систем, оскільки порівняння таких проводилося в лабораторних умовах без відтворення впливу значущих клінічних факторів (варіації позиціонування дентальних імплантатів, проблематика накладання м'яких тканин язика, губ та щік на координатні маркування маркерів, змінне клінічне освітлення).

В іншому лабораторному дослідженні, присвяченому порівнянню смартфонної фотограмметрії PIC app® та традиційного інтраорального сканування вертикальних скан-маркерів на моделі верхньої щелепи з чотирма встановленими імплантатами було встановлено, що показники середньоквадратичного відхилення положення центроїдів становили $54,8 \pm 6,57$ мкм

для мобільної фотограмметрії та $244,13 \pm 162,65$ мкм для інтраорального сканування (в якості референтних даних використовувалися показники високоточного індустріального сканера) [19]. Показники середньоквадратичного відхилення множини точок поверхні скан-абатмента/скан-маркера також були меншими у групі мобільної фотограмметрії в порівнянні із інтраоральним сканування ($31,70 \pm 14,15$ мкм проти $67,62 \pm 40,52$ мкм) [19]. Проте кутове відхилення у розрізі оцінки правдивості було меншим у групі використання внутрішньоорального сканування в порівнянні із групою використання мобільної фотограмметричної системи ($0,39 \pm 0,13^\circ$ проти $0,54 \pm 0,03^\circ$), хоча при оцінці прецизійності ангулярні девіації критично не відрізнялися. Варто відмітити, що час реєстрації становив приблизно 97 секунд для мобільної фотограмметрії PIC app® і 50 секунд для інтраорального сканування [19].

Два вищеописані дослідження демонструють залежність результатів порівняння від обраної метрики та референтного методу валідації. Отримані дані демонструють, що мобільна система може забезпечувати кращу передачу положення центрів скан-маркерів, а також їх поверхонь в цілому в порівнянні із інтраоральним сканером, але при цьому точність лінійних та кутових параметрів мобільної фотограмметрії була нижчою за таку у класичній позаротовій фотограмметрії. Потребує уваги той факт, що дані щодо правдивості системи PIC app® у двох проаналізованих лабораторних дослідженнях частково не узгоджуються щодо ангулярних параметрів, проте такий результат може бути зумовлений різницею у дизайні дослідження, відмінностями застосованих метричних критеріїв та референтного методу валідації (координатно-вимірювальна машина та індустріальний сканер).

У клінічному дослідженні Santamaría-Laorden A. та співавторів до досліджуваної вибірки було включено 8 пацієнтів із 10 повністю беззубими щелепами, на кожній з яких було встановлено по шість дентальних імплантатів та мульти-юніт абатменти [21]. Для кожної досліджуваної щелепи виконували п'ять реєстрацій з використанням системи PIC app® і один запис PIC system®, що розглядався як клінічний компаратор. Середня абсолютна різниця між системами становила 21 ± 16 мкм для лінійних і $0,20 \pm 0,17^\circ$ для кутових показників [21]. Міжімплантатна відстань статистично не впливала на параметр правдивості, показники лінійної точності не відрізнялися між верхньої та нижньої щелепою, проте кутова точність між такими характеризувалися статистичними відмінностями (нижчий рівень варіації був відмічений для випадків нижньої щелепи). Водночас варто відмітити, що в проаналізованому дослідженні метод було апробовано лише на 2 випадках реабілітації нижньої щелепи і 8 випадках реабілітації верхньої щелепи [21]. Попри те, що в даному дослідженні було продемонстровано практичну можливість застосування мобільної фотограмметрії в реальних клінічних умовах, валідність даного підходу визначалася по відношенню до екстраорального фотограмметрії того ж виробника, а не по відношенню до універсального еталону. Такий дизайн по суті дозволяє оцінити узгодженість PIC app® із

PIC system®, але не повністю усуває ризик спільної систематичної похибки, пов'язаної з маркерами, бібліотеками або алгоритмом. Крім того, отримані результати демонстрували лише встановлені в клінічних умовах відхилення між системами, проте не доведено вищу чи нижчу клінічну ефективність певного підходу, яка визначається не лише метрологічною точністю, але й фактом досягнення пасивної посадки, кількістю необхідних корекцій та ускладнень у певній часовій перспективі, стабільністю досягнутих показників торку та рівнем деформації фіксаційних гвинтів в ході функціонування протетичних конструкцій.

Найновіша на дату пошуку робота оцінювала результати реєстрації стандартних скан-маркерів, таких зменшеного розміру та комбінацію таких з використанням системи PIC app® на фрезерованій титановій моделі нижньої щелепи з аналогами шести мульти-юніт абатментів, використовуючи в якості референсу дані координатно-вимірювальної машини [22]. Отримані дані засвідчили, що застосування комбінацій маркерів (стандартних та зменшеного розміру) забезпечило найкращі показники лінійної та кутової правдивості ($16,79 \pm 12,54$ мкм та $0,11 \pm 0,08^\circ$), стандартні маркери посіли проміжне місце ($30,92 \pm 20,88$ мкм та $0,16 \pm 0,09^\circ$), а маркери зменшеного розміру характеризувалися найнижчими значеннями точності ($48,61 \pm 31,08$ мкм та $0,30 \pm 0,31^\circ$), при чому відмінності були статистично значущими [22]. Отримані дані продемонстрували, що в алгоритмі використання мобільної фотограмметрії площа й геометрична складність маркера, кількість видимих кодованих елементів, взаємне перекриття, висота над слизовою та можливість одночасної візуалізації кількох маркерів визначають стійкість реєстрації та точність розрахунку координат камерою та програмним забезпеченням. Скан-маркери малого розміру потенційно можуть полегшувати алгоритм роботи з пацієнтів із малим вертикальним простором, але при цьому вони характеризуються потенційним зниженням рівня інформаційної наповненості зображення щодо кількості доступних координат.

У лабораторному дослідженні Revilla-León M. та співавторів точність системи T-Marker порівнювали з точністю реєстрації некаліброваних горизонтальних скан-маркерів IOConnect, які оцифровували апаратом TRIOS 5 [24]. Референтну модель беззубої щелепи із шістьма мульти-юніт абатментами сканували лабораторним сканером Medit T710. Середня лінійна розбіжність системи T-Marker становила 88 ± 16 мкм, а кутова – $0,14 \pm 0,02^\circ$ відносно еталону, тоді як для IOConnect відповідні показники становили 44 ± 11 мкм і $0,20 \pm 0,10^\circ$ [24]. Отже, горизонтальні скан-маркери забезпечили кращу лінійну правдивість, тоді як планшетна фотограмметрія – кращу кутову правдивість і кутову прецизійність в лабораторних умовах. Оскільки референт формувався лабораторним сканером, а не координатно-вимірювальною машиною, частина спостережуваної розбіжності залежить від точності контрольної моделі та процедури суміщення із файлами цифрової бібліотеки.

Перше клінічне дослідження T-Marker було реалізовано в якості порівняння планшет-базованої

фотограмметрії з IOConnect в комбінації з TRIOS 5 у пацієнта із повнодуговою імплантат-опорною конструкцією, використовуючи в якості референсу дані позаротової фотограмметрії (Micron Mapper). Система T-Marker демонстрував кращі показники лінійної та кутової правдивості в порівнянні із IOConnect (49 ± 13 мкм проти 68 ± 13 мкм; $0,26 \pm 0,02^\circ$ проти $0,42 \pm 0,07^\circ$). Середній показник ангулярної прецизійності системи T-marker ($0,02^\circ$) був статистично відмінний від IOConnect ($0,07^\circ$) [23].

Li J. та колеги описали експериментальний підхід щодо застосування моделі глибинного навчання, яка на основі відео записаних зі смартфона, сприяла реєстрації положення 6 скан-абатментів на досліджуваній моделі верхньої щелепи. 3D-реконструкція на основі глибокого навчання з 5000 повними циклами навчання на всьому наборі даних забезпечувала правдивість реєстрації положення скан-абатментів на рівні $67,69 \pm 33,29$ мкм, що було тотожно із правдивістю інтраорального сканера для даних умов дослідження ($57,42 \pm 36,09$ мкм) [27]. При нижчих повних циклах навчання (1500) правдивість підходу знижувалася вдвічі. Попри забезпечену правдивість прецизійність моделі глибокого навчання з 5000 повними циклами навчання була статистично нижчою за таку характерну для інтраорального сканування ($98,12 \pm 59,85$ мкм проти $64,54 \pm 42,53$ мкм) [27]. Хоча для отримання зображень у цьому дослідженні використовували iPhone 15 Pro Max, максимальні можливості його камери не були задіяні повною мірою: автори наголошили, що відеозаписи, первинно отримані у роздільній здатності 4K, були понижені в якості до 1080p, щоб уникнути перевищення доступного обсягу відеопам'яті графічного процесора [27]. Крім того серед параметрів відеозйомки особливо важливим впливом вирівнявся фактор швидкості затвору, оскільки недостатньо висока її величина могла провокувати розмиття окремих кадрів унаслідок руху та, відповідно, погіршувати якість реконструкції отриманих даних. Для мінімізації цього ефекту всі відеозаписи виконували за умов достатнього та стабільного освітлення.

Узагальнені дані щодо характеристик та результатів досліджень, присвячених вивченню аспектів застосування рішень мобільної фотограмметрії, представлені у Таблиці 2.

Загальний рівень доказовості слід оцінювати як ранній і переважно доклінічний. Сильною стороною проаналізованих досліджень присвячених мобільній фотограмметрії є проведення повторних реєстрацій у кількості достатній для верифікації прецизійності, застосування контрольних лабораторних моделей і категоризаційного розподілу показників точності на критерії правдивості та прецизійності. Водночас в наведених дослідженнях клінічні вибірки є відносно малими за чисельністю, що опосередковано вказує на обмеженість проаналізованих клінічних сценаріїв, крім того у клінічних дослідженнях не повідомлялося про пацієнт-орієнтовані результати. Крім того показники різних досліджень не можуть бути проаналізовані та ранжовані за уніфікованим підходом, оскільки в різних роботах референтні дані

отримували координатно-вимірною машиною, промисловим або лабораторним сканером чи іншою фотограмметричною системою, тобто різними референтними підходами. Дослідники в різних наукових роботах також послуговувалися різними критеріями оцінки, зокрема параметрами міжімплантатних відстаней, кутових відхилень, середньоквадратичного відхилення положення центрів та окремих поверхонь скан-маркерів.

Основні джерела ризику похибки в проаналізованих дослідженнях представлені у Таблиці 3.

Перевагою мобільної системи є портативність і відсутність окремого великого блоку фотограмметричної камери. Проте оптимізація апаратної складової не усуває необхідності ретельної стандартизації процесу фіксації та реєстрації положення скан-маркера з використанням смартфона чи планшета. Помилка може виникнути через неповну посадку маркера, забруднення оптичної мітки, надмірне перекриття сусідніх маркерів, недостатню кількість ракурсів, непослідовний рух пристрою, автоматичне перемикавання елементів камер, помилку суміщення координатного та поверхневого наборів даних. Крім того файл, отриманий методом фотограмметрії, може бути високоточним у власній системі координат, але у разі його суміщення зі сканом слизової або позицією тимчасового протеза, отриманих інтраоральним сканером з певним рівнем похибки, остаточний CAD-проект може успадкувати частку девіації.

Найбільш обґрунтованим показом до використання систем мобільної фотограмметрії на поточному етапі розвитку технології з урахуванням доступних даних доказової бази є реєстрація положення чотирьох-шести імплантатів на рівні мультиюніт-абатментів в умовах реабілітації беззубих щелеп конструкціями з опорою на дентальних імплантатах, коли традиційне інтраоральне сканування може бути вразливим до розвитку кумулятивної похибки. Потенційно корисним застосування даного підходу є у випадках, які потребують портативності застосовуваного пристрою з огляду на наявні клінічні умови, а також з урахуванням економічних умов реалізації специфічного виду стоматологічних послуг (при відсутності відповідності економічної доцільності придбання класичної системи позаротової фотограмметрії).

Експериментальні роботи з фотограмметричної реконструкції беззубих дуг за допомогою смартфонів і LiDAR демонструють, що мобільні сенсори здатні з високим рівнем точності реконструювати тривимірні поверхні [27, 28, 29]. Перспективним є поєднання мобільної фотограмметрії з LiDAR або сенсорами глибини для одночасної реєстрації положення імплантатів і поверхні тканин [27–30]. Проте така інтеграція потребує достатніх доказів того, що координатна точність маркерів не погіршується під час спільної реконструкції, а м'які тканини реєструються з достатньою для протезування деталізацією. На дату проведеного пошуку клінічних робіт з належним рівнем доказовості, які б демонстрували практично-прикладний алгоритм мобільного цифрового протоколу з одночасною реалізацією функцій сканування поверхні та

Узагальнення характеристик та результатів досліджень, присвячених застосування мобільної фотограмметрії

Джерело	Дизайн	Модель / вибірка	Мобільна система і компаратор	Референт	Основні кількісні результати
Santamaría-Laorden A. та колеги, 2025 [20]	Порівняльне лабораторне дослідження	Досліджувана модель з 6 встановленими мульти-юніт абатментами	PIC app® проти PIC system®	Координатно-вимірвальна машина	PIC app: 30,92±20,88 мкм; 0,16±0,09°. PIC system: 18,21±12,21 мкм; 0,10±0,07° Середні відмінності між PIC app® та PIC system® становили 12,70 мкм (95% довірчий інтервал [ДІ]: 10,47–14,94; p < 0,001) для евклідових лінійних вимірювань та 0,07° (95% ДІ: 0,05–0,07; p < 0,001) для кутових вимірювань
Gómez-Polo M. та колеги	Опис техніки та протоколу використання	Повнодугова фіксована конструкція	PIC app® + окремі набори даних інтраорального сканування	Клінічна реалізація	Кількісна точність не оцінювалася
Santamaría-Laorden A. та колеги, 2026 [21]	Порівняльне клінічне дослідження	8 пацієнтів; 10 беззубих щелеп з встановленими 6 мульти-юніт абатментами на кожній	PIC app® проти PIC system®	PIC system як клінічний компаратор	Середня абсолютна різниця між PIC app та PIC system: 21±16 мкм і 0,20±0,17°
Gianfreda F. та колеги, 2026 [19]	Порівняльне контрольоване лабораторне дослідження	Модель з 6 встановленими імплантатами	PIC app® проти інтраорального сканера зі скан-маркерами	Промисловий сканер	Відмінності показників правдивості між PIC app® та сканером: CRMS 54,8±6,57 проти 244,13±162,66 мкм; BRMS 31,70±14,15 проти 67,62±40,52 мкм; кут 0,54±0,03° проти 0,39±0,13°
Revilla-León M. та колеги, 2026 [24]	Порівняльне лабораторне дослідження	Гіпсова модель з 6 встановленими імплантатами	T-Marker проти IOConnect+ TRIOS 5	Лабораторний сканер Medit T710	T-Marker: 88±16 мкм; 0,14±0,02°. IOConnect: 44±11 мкм; 0,20±0,10°
Revilla-León M. та колеги, 2026 [23]	Порівняльне клінічне дослідження	Пацієнт з 4 мультиюнітними абатментами на беззубій щелепі	T-Marker проти IOConnect+ TRIOS 5	Зовнішньоротова фотограмметрія Micron Mapper	Правдивість T-Marker: 49±13 мкм, 0,26±0,02° Ангулярна прецизійність T-marker: 0,02° IOConnect: 68±13 мкм; 0,42±0,07° Ангулярна прецизійність IOConnect: 0,07°
Martínez-Marugán A. та колеги, 2026 [22]	Порівняльне лабораторне дослідження з використанням скан-маркерів різного дизайну	Титанова фрезерована модель нижньої щелепи з 6 мульти-юніт абатментами	PIC app® з використанням скан-маркерів стандартного розміру, зменшеного розміру та комбінації таких	Координатно-вимірвальна машина	Правдивість для комбінації маркерів (стандартних та зменшеного розміру): 16,79±12,54 мкм та 0,11 ±0,08° Правдивість для стандартних маркерів: 30,92±20,88 мкм та 0,16±0,09° Правдивість для маркерів зменшеного розміру: 48,61±31,08 мкм та 0,30±0,3°
Li J. та колеги, 2026 [27]	Порівняльне лабораторне дослідження з класичними скан-маркерами	Лабораторна модель верхньої щелепи з 6 встановленими імплантатами	Модель високо-точного нейромережевого відтворення тривимірної поверхні об'єкта за серією двовимірних зображень або відеокадрів, отриманих із різних ракурсів (Nerualangelo)	Інтраоральний сканер	Правдивість експериментальної моделі: 67,69 ± 33,29 мкм (тотожно із правдивістю інтраорального сканера – 57,42 ± 36,09 мкм) за умов реалізації навчання на 5000 повних циклах аналізу всього набору даних

Основні джерела ризику похибки в проаналізованих дослідженнях

Потенційне джерело похибки	Обґрунтування/уточнення	Наслідок для інтерпретації
Переважаання досліджень лабораторного порівняльного характеру	Лише 2 з 8 досліджень проводилися в клінічних умовах	Обмежена відтворюваність клінічних умов, невизначеність щодо впливу клінічно-асоційованих факторів
Малі клінічні вибірки	Обмеженість проаналізованих клінічних сценаріїв: для PIC app® – 8 пацієнтів та 10 щелеп, для T-marker – 1 пацієнт та 1 щелепа	Широкі межі невизначеності та слабка оцінка клінічних факторів впливу
Різні референти	Координатно-вимірювальна машина, промисловий/лабораторний сканер, інша система позаротової фотограмметрії	Ускладнює можливості для прямого порівняння даних, отриманих у різних дослідженнях
Гетерогенні критерії оцінки	Евклідові відстані, ангулярні відхилення, середньоквадратичні відхилення положення центроїдів, середньоквадратичні відхилення окремих сукупностей точок поверхонь скан-маркерів	Неможливість реалізації цільового мета-аналізу
Обмежена кількість проаналізованих моделей пристроїв	Окремі моделі iPhone та iPad Pro	Не встановлено рівень відтворюваності результатів на інших поколіннях апаратного забезпечення
Відсутність опису клінічно-орієнтованих результатів, пов'язаних із задачею та функціонуванням готового протезу	Оцінка точності проводилась переважно в цифровому середовищі	Не встановлено клінічні результати застосування технології, що включають оцінку рівнів пасивності посадки конструкцій, кількість необхідних корекцій, переробок та ускладнень
Оновлення програмного забезпечення	Версії алгоритмів можуть змінюватися	Отримані результати можуть бути асоційовані з певною специфічною версією програмного забезпечення

реєстрації координатного положення окремих об'єктів виявлено не було.

Незалежно від використовуваної технології фотограмметрії клінічна верифікації пасивності посадки залишається обов'язковим елементом протоколу тотальної реабілітації пацієнтів ортопедичними конструкціями з опорою на дентальних імплантатах, позаяк попередні дослідження продемонстрували значущість клінічно- та технологічно-асоційованих факторів, котрі до певної міри можуть визначати клінічно-орієнтовану точність методики [31–36].

Висновки. Мобільна та планшет-базована фотограмметрія є перспективним напрямом цифрової реєстрації просторового положення дентальних імплантів, який у лабораторних і первинних клінічних дослідженнях продемонстрував потенційно прийнятні показники лінійної та кутової точності, а за окремими параметрами – переваги порівняно з традиційним інтраоральним скануванням. Дизайн застосованого фідуціального маркера, тип щелепи, апаратна модель смартфона/планшета, алгоритм реконструкції, траєкторія захоплення, використовувані референтна система та метрика оцінки є критичними модифікаторами результатів правдивості та прецизійності описаних в літературі мобільних версій фотограмметрії, призначених для реєстрації положення дентальних імплантів.

Наявна доказова база не містить достатнього обсягу даних щодо клінічно-орієнтованих результатів використання мобільних версій фотограмметрії, призначених для верифікації координатного взаємоположення встановлених інтраосальних опор, які включають, але не обмежуються категоризацією

досягнутих рівнів пасивності посадки, кількістю необхідних корекцій, переробок, механічних та біологічних ускладнень.

Враховуючи гетерогенність дизайнів проаналізованих досліджень для оптимізації якості доказової бази щодо застосування технології мобільної фотограмметрії у імплантологічній практиці доцільним є реалізація подальших наукових робіт у відповідності до стандартизованого протоколу з чітко визначеним референтним методом порівняння та уніфікованими критеріями оцінки.

Використання штучного інтелекту. Під час підготовки рукопису ChatGPT на основі моделі GPT-5.6 Thinking (OpenAI, США) використовувалася для розроблення концепції та графічного оформлення рисунків 1 і 4 із застосуванням інтегрованого інструмента генерації зображень ChatGPT Images. Генеративний штучний інтелект не використовували для пошуку та відбору наукових джерел, формування методології дослідження, аналізу даних, інтерпретації результатів або формулювання наукових висновків. Усі матеріали, створені або опрацьовані із залученням ШІ, були критично перевірені, відредаговані та остаточно затверджені авторами, які несуть повну відповідальність за зміст рукопису.

Конфлікт інтересів. Гончарук-Хомин М. Ю. є членом редакційної колегії журналу. Для забезпечення незалежності редакційного процесу рукопис розглядався редактором, який не мав конфлікту інтересів з автором. Автор не брав участі у відборі рецензентів, процесі рецензування та прийнятті рішення щодо публікації статті. Рукопис пройшов стандартну процедуру подвійного сліпого рецензування.

REFERENCES

1. Chen HT, Feng SW, Vo TT, Wang YL, Fan FY, Lee IT. Cumulative Error in Digital Workflows for Full-Arch Implant Rehabilitation: A Narrative Review. *Bioengineering*. 2026 Feb 13;13(2):219. <https://doi.org/10.3390/bioengineering13020219>
2. Joensahakij N, Serichetaphongse P, Chengprapakorn W. The accuracy of conventional versus digital (intraoral scanner or photogrammetry) impression techniques in full-arch implant-supported prostheses: a systematic review. *Evidence-based dentistry*. 2024 Dec;25(4):216-7. <https://doi.org/10.1038/s41432-024-01045-z>
3. Revilla-León M, Kois JC. Implant Scanning Workflows for Fabricating Implant-Supported Prostheses Recorded by Using Intraoral Scanners With or Without Photogrammetry Technologies. *Journal of Esthetic and Restorative Dentistry*. 2025 Jun;37(6):1384-91. <https://doi.org/10.1111/jerd.13431>
4. Borella PS, Guimaraes AS, Mendonça TS, Khalil G, Al-Tarawneh S, Cooper LF, Mendonça G. Influence of different manufacturing materials on the accuracy and fitting of full-arch restorations using a photogrammetry scanner—In vitro study. *Journal of Prosthodontics*. 2026 Feb 13. <https://doi.org/10.1111/jopr.70109>
5. Pan Y, Tsoi JK, Lam WY, Pow EH. Implant framework misfit: A systematic review on assessment methods and clinical complications. *Clinical Implant Dentistry and Related Research*. 2021 Apr;23(2):244-58. <https://doi.org/10.1111/cid.12968>
6. Abduo J, Judge RB. Implications of implant framework misfit: a systematic review of biomechanical sequelae. *Int J Oral Maxillofac Implants*. 2014 May 1;29(3):608-21. <https://doi.org/10.11607/jomi.3418>
7. Katsoulis J, Takeichi T, Sol Gaviria A, Peter L, Katsoulis K. Misfit of implant prostheses and its impact on clinical outcomes. Definition, assessment and a systematic review of the literature. *Eur J Oral Implantol*. 2017 Oct;10(Suppl 1):121-38.
8. Abdelrehim A, Etajuri EA, Sulaiman E, Sofian H, Salleh NM. Magnitude of misfit threshold in implant-supported restorations: A systematic review. *The Journal of Prosthetic Dentistry*. 2024 Sep 1;132(3):528-35. <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2022.09.010>
9. Fratila AM, Saceleanu A, Arcas VC, Fratila N, Earar K. Enhancing intraoral scanning accuracy: from the influencing factors to a procedural guideline. *Journal of Clinical Medicine*. 2025 May 20;14(10):3562. <https://doi.org/10.3390/jcm14103562>
10. Mourouzis P. Critical methodological factors influencing the accuracy of intraoral scanners in digital dentistry research. *Computers in biology and medicine*. 2025 Mar 1;187:109780. <https://doi.org/10.1016/j.compbimed.2025.109780>
11. Negreiros WM, Akhondi S, Quiles HK, Hamilton A. Photogrammetry in implant dentistry. *Australian Dental Journal*. 2025 Dec;70:S15-24. <https://doi.org/10.1111/adj.70028>
12. Altalla H, Alhelou H, Karaduman F, Alawawda O, Bayindir F. Comparative accuracy of photogrammetry and intraoral scanners in recordings for complete arch implant-supported prostheses: A systematic review and meta-analysis. *The Journal of prosthetic dentistry*. 2025 Nov 14. <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2025.10.059>
13. Pozzi A, Arcuri L, Carosi P, Laureti A, Londono J, Wang HL. Photogrammetry versus intraoral scanning in complete-arch digital implant impression: A systematic review and meta-analysis. *Clinical implant dentistry and related research*. 2025 Jun;27(3):e70059. <https://doi.org/10.1111/cid.70059>
14. Hina M. Photogrammetry in Full-Arch Implant Rehabilitation: Accuracy, Workflows, and Clinical Outcomes. *Saudi J Oral Dent Res*. 2026;11(6):239-49. <https://doi.org/10.36348/sjodr.2026.v11i06.005>
15. Revilla-León M, Gómez-Polo M, Drone M, Barmak AB, Kois JC, Pérez-Barquero JA. Accuracy of complete arch implant scans recorded by using intraoral and extraoral photogrammetry systems. *The Journal of prosthetic dentistry*. 2025 Feb 7. <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2025.01.041>
16. Goncharuk-Khomyn M, Gundjak Y, Tukalo I, Kryvanych A AB. On the issue of the accuracy regarding intraoral photogrammetry technology: an analysis of relevant evidence base data. *Intermedical journal*. 2025 Jun 30(2):31-6. <https://doi.org/10.32782/2786-7684/2025-2-6>
17. DeFee M, Renne W, Shazib MA, Queiroz A, Mennito A, Borbola D, Vag J. Virtual-fit assessment of full-arch implant photogrammetry accuracy in a human cadaver model. *Journal of Dentistry*. 2026 Apr 1:106668. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2026.106668>
18. Gómez-Polo M, Rodríguez-Fernández E, Vasquez-Ramos S, Revilla-León M. A digital workflow using a smartphone-based photogrammetry app for capturing implant positions in complete arch fixed implant-supported prostheses. *The Journal of Prosthetic Dentistry*. 2025 Oct 8. <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2025.09.017>
19. Francesco G, Raffone C, Mirko M, Stefano P, Bollero P, Caponio VC. Accuracy of smartphone-based photogrammetry for full-arch implant position transfer: a controlled in vitro comparison with scan body-based intraoral scanning. *Journal of Dentistry*. 2026 Apr 22:106716. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2026.106716>
20. Santamaria-Laorden A, Marugán AM, Andreu-Vázquez C, Orejas-Pérez J. Complete arch implant capture using a photogrammetry algorithm and smartphone app: An in vitro study. *Journal of Dentistry*. 2025 Oct 1;161:105969. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2025.105969>
21. Santamaria-Laorden A, Castillo-Oyagüe R, Martínez-Marugán A, Sánchez JL, Andreu-Vázquez C, Orejas-Pérez J. Accuracy of a smartphone app and photogrammetry algorithm in complete arch digital implant capture: An in vivo comparative study. *The Journal of Prosthetic Dentistry*. 2025 Nov 25. <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2025.11.020>
22. Martínez-Marugán A, Santamaria-Laorden A, Gómez-Cogolludo P, Rodríguez AP, Andreu-Vázquez C, Orejas-Pérez J. Complete arch digital implant capture using a smartphone-based photogrammetry app: An in vitro comparative study of the accuracy of different fiducial marker designs. *The Journal of Prosthetic Dentistry*. 2026 Jul 11. <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2026.06.024>
23. Revilla-León M, Cascos R, Barmak AB, Kois JC, Drone M, Gómez-Polo M. Clinical evaluation of complete arch implant scanning accuracy recorded using an app-based photogrammetry and noncalibrated scan body system. *The Journal of Prosthetic Dentistry*. 2026 Jun 6. <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2026.05.030>

-
24. Revilla-León M, Gómez-Polo M, Barmak AB, Kois JC, Pérez-Barquero JA. Accuracy of implant scans recorded using tablet-based photogrammetry and noncalibrated implant scan body systems. *The Journal of Prosthetic Dentistry*. 2026 Apr 15. <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2026.03.034>
25. Gusenbauer M, Haddaway NR. Which academic search systems are suitable for systematic reviews or meta-analyses? Evaluating retrieval qualities of Google Scholar, PubMed, and 26 other resources. *Research synthesis methods*. 2020 Mar;11(2):181-217. <https://doi.org/10.1002/jrsm.1378>
26. Yadav V, Trushna T, Mandal UK, Singh M, Goel AD, Bairwa M, Dabar D, Sabde YD. AI-assisted search strategy construction with step-by-step instructions to execute and manage searches across major databases. *Medical Reference Services Quarterly*. 2026 Jan 2;45(1):1-26. <https://doi.org/10.1080/02763869.2025.2595567>
27. Li J, Chen Z, Liu F, Saglik B, Mendonca G, Wang HL. Obtaining full-arch implant scan with smartphone video and deep learning: An in vitro investigation on trueness and precision. *Journal of Prosthodontics*. 2025 Mar 8. <https://doi.org/10.1111/jopr.14041>
28. Saghiri MA, Saghiri AM, Samadi E, Vakhnovetsky J, Kowalczyk A, Farhadi M, Shahid O, Memariani A, Morgano SM. Advancing 3D dental scanning: The use of photogrammetry with light detection and ranging for edentulous arches. *The Journal of Prosthetic Dentistry*. 2024 Dec 17. <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2024.10.032>
29. Al-Rudainy D, Al-Lami HA, Yang L. Validity and reliability of three-dimensional modeling of orthodontic dental casts using smartphone-based photogrammetric technology. *Journal of the World Federation of Orthodontists*. 2023 Feb 1;12(1):9-14. <https://doi.org/10.1016/j.ejwf.2022.11.002>
30. de Mello WM, Dutra V, Guimarães MB, Vickery JM, Liedke GS. Smartphone photogrammetry—affordable alternative for digitizing dental casts. *Journal of Health Informatics*. 2025 Sep 7;17:1135-. <https://doi.org/10.59681/2175-4411.v17.2025.1135>
31. Stuaní VT, Ferreira R, Manfredi GG, Cardoso MV, Sant'Ana AC. Photogrammetry as an alternative for acquiring digital dental models: A proof of concept. *Medical hypotheses*. 2019 Jul 1;128:43-9. <https://doi.org/10.1016/j.mehy.2019.05.015>
32. Revilla-León M, Gómez-Polo M, Drone M, Barmak AB, Guinot-Barona C, Att W, Kois JC, Pérez-Barquero JA. Impact of scanning distance on the accuracy of a photogrammetry system. *Journal of dentistry*. 2024 Mar 1;142:104854. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2024.104854>
33. Robert N, Albert A, Bechet E, Lamy M. Influence of the Number of Implants on the Accuracy of Complete-Arch Impressions: In Vitro Comparison of Photogrammetry and Intraoral Scanners Using a Coordinate Measurement Machine. *Journal of Dentistry*. 2026 Apr 29;106723. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2026.106723>
34. Goncharuk-Khomyn M, Tukalo I, Sheveria S, Rak S., Liakh A. Dosvid zastosuvannia metodu fotohrammetrii v suchasnii implantolohichnii praktytsi (ohliad literatury) [Experience of using photogrammetry method in modern implantological practice (literature review)]. *Suchasna medytsyna, farmatsiia ta psykhologichne zdorovia – Modern Medicine, Pharmacy and Psychological Health*. 2023(5 (14)):72-80. <https://doi.org/10.32689/2663-0672-2023-5-13>
35. Bratos M, Bergin JM, Rubenstein JE, Sorensen JA. Effect of simulated intraoral variables on the accuracy of a photogrammetric imaging technique for complete-arch implant prostheses. *The Journal of Prosthetic Dentistry*. 2018 Aug 1;120(2):232-41. <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2017.11.002>
36. Tohme H, Lawand G, Eid R, Ahmed KE, Salameh Z, Makzoume J. Accuracy of implant level intraoral scanning and photogrammetry impression techniques in a complete arch with angled and parallel implants: An in vitro study. *Applied Sciences*. 2021 Oct 22;11(21):9859. <https://doi.org/10.3390/app11219859>

Дата першого надходження статті до видання: 01.08.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 27.08.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 09.10.2026