

Гончарук-Хомин Мирослав Юрійович,

PhD, доцент, завідувач кафедри терапевтичної стоматології,

ДВНЗ «Ужгородський національний університет»,

ORCID ID: 0000-0002-7482-3881

м. Ужгород, Україна

Тукало Ігор Васильович,

аспірант кафедри хірургічної стоматології та клінічних дисциплін,

ДВНЗ «Ужгородський національний університет»,

ORCID: 0000-0002-8431-8133

м. Ужгород, Україна

Аналіз критеріїв та підходів до кількісної оцінки точності реєстрації положення дентальних імплантатів з використанням технології цифрового відбитка

Анотація. Вступ. В літературі відмічаються неузгодженості щодо значущості та ефективності різних оптимізованих підходів до реєстрації положення дентальних імплантатів з використанням цифрового відбитку, які лікарі-практики часто безпосередньо порівнюють між собою в пошуку преферативного, проте вихідна оцінка точності таких часто проводиться з використанням відмінних критеріїв та методик, котрі не підлягають безпосередньому порівнянню. **Мета дослідження.** Систематизувати критерії та підходи до кількісної оцінки точності реєстрації положення дентальних імплантатів з використанням технологій цифрового відбитка, а також визначити значущість різних статистичних показників для об'єктивізації параметрів правдивості та прецизійності верифікації положення скан-абатментів на досліджуваних сканах в порівнянні з референтними. **Матеріали та методи.** Контент-аналіз доступних методологій оцінки точності реєстрації положення дентальних імплантатів з використанням цифрового відбитка був проведений згідно наступних категорій: 1) параметри кількісної репрезентації рівнів правдивості та прецизійності цифрових методів реєстрації положення дентальних імплантатів з урахуванням природи їх лінійних, ангулярних та просторових зміщень; 2) статистичні критерії та їх роль у об'єктивізації показників похибок та відхилень верифікованих положень скан-абатментів на досліджуваних сканах в порівнянні з референтними; 3) відмінності різних алгоритмів суміщення тестових/досліджуваних цифрових сканів та референтних мастер-моделей у процесі оцінки показника точності реєстрації позиції скан-абатментів. **Результати досліджень та їх обговорення.** Релевантні підходи до кількісної оцінки точності реєстрації положення дентальних імплантатів з використанням технології цифрового відбитка передбачають обрахунок параметрів правдивості та прецизійності, а також

критеріїв ангулярних, просторових, лінійних та центроїдних відхилень. Переважна більшість сучасних підходів до оцінки точності реєстрації положення дентальних імплантатів з використанням технології цифрового відбитка передбачають можливості для кількісного аналізу просторових, лінійних та ангулярних девіацій, які можуть бути відповідним чином квантифіковані завдяки формуванню адаптованої системи координат. Для оцінки точності реєстрації положень дентальних імплантатів при використанні технології цифрового відбитка важливо враховувати одразу декілька статистичних критеріїв, оскільки середня похибка дає загальне уявлення про помилку сканування, але може приховувати одиничні великі відхилення; середньоквадратична похибка підкреслює вплив великих відхилень, показуючи, наскільки серйозні найгірші помилки сканування; максимальне похибка вказує на найгіршу окрему помилку сканування, яка є клінічно значущою, а стандартне відхилення інформує про повторюваність та стабільність точності сканування. **Висновки.** При комперативному аналізі ефективності різних методів реєстрації положення дентальних імплантатів в ході реалізації цифрового протоколу реабілітації доцільно враховувати критерії, які застосовувались для кількісної оцінки точності таких з об'єктивізацією методологічних можливостей їх порівняння, зважаючи на потенційні відмінності у досліджуваних умовах під час валідації. Для квантифікації різних складових кумулятивного параметру точності необхідним є застосування декількох критеріїв оцінки одночасно. Важливо також враховувати граничні рівні клінічної толерантності, які за даними доказової літератури варіюють з точки зору ризику розвитку біологічних та механічних ускладнень.

Ключові слова: інтраоральне сканування, дентальні імплантати, адентія, точність, стоматологічна реабілітація, ортопедичні конструкції, критерії оцінки

Goncharuk-Khomyn Myroslav Yuriyovich,

PhD, Associate Professor, Head of Department of Restorative Dentistry

SHEI «Uzhhorod National University»,

ORCID ID: 0000-0002-7482-3881,

Uzhhorod, Ukraine

Tukalo Ihor Vasylovych

PhD-student at the Department of Surgical Dentistry and Clinical Disciplines

SHEI «Uzhhorod National University»,

ORCID ID: 0000-0002-8431-8133

Uzhhorod, Ukraine

Analysis of criteria and approaches used for quantitative assessment of dental implant positions' registration accuracy with the use of digital impression technology

Annotation. Introduction. The literature shows inconsistencies regarding the significance and effectiveness of various optimized approaches for registration of dental implants positions using digital impression technique, which practitioners often directly compare with each other in search of a preferred one, however, the initial assessment of the accuracy of such is often carried out using different criteria and methods that are not directly comparable. **Objective of the research.** To systematize the criteria and approaches for quantitative assessment of dental implants position registration accuracy using digital impression technologies, as well as to determine the significance of various statistical indicators for the objectification of trueness and precision parameters during verification of scan-abutments positions on the studied scans in comparison with the reference ones. **Materials and methods.** Content analysis of available methodologies for assessing the accuracy of dental implant position registration using digital impression technique was conducted according to the following categories: 1) parameters for quantitative representation of the trueness and precision levels of digital methods used for registering the position of dental implants, taking into account the nature of their linear, angular and spatial displacements; 2) statistical criteria and their role in objectifying the error indicators and deviations of verified scan-abutment positions on the studied scans in comparison with the reference ones; 3) differences in different algorithms for overlapping test/studied digital scans and reference master models during the process of assessing the accuracy indicator of scan-abutment position registration. **Results and discussions.** Relevant approaches for the quantification of dental implants position registration accuracy with the use of digital impression technology involve calculation of such parameters, as trueness and precision, as well as criteria for angular, spatial, linear and centroidal deviations. The vast majority of modern approaches to assess the accuracy of dental implant position registration using digital impression technology involve the possibility of quantitative analysis of spatial, linear and angular deviations, which can be appropriately verified by forming an adapted coordinate system. To assess the accuracy of dental implant position registration using digital impression technology, it is important to take into account several statistical criteria at once, since the average error gives a general idea of the scanning error, but can hide single large deviations; the root mean square error emphasizes the impact of large deviations, showing how serious the worst scanning errors are; the maximum error indicates the worst individual scanning error that is clinically significant, and the standard deviation provides information about the repeatability and stability of the scanning accuracy. **Conclusions.** While providing comparative analysis of the effectiveness of different methods used to register dental implants positions during the implementation of a digital rehabilitation protocol, it is advisable to consider the criteria that were used to quantify the accuracy of such methods, taking into account the methodological possibilities of their comparison, considering potential

differences in the conditions of study during validation. To objectify the levels of accuracy, it is necessary to use several criteria simultaneously. It is also important to consider the limit levels of clinical tolerance, which, according to the evidence-based literature, vary in terms of the risk value differed for development of biological and mechanical complications.

Keywords: intraoral scanning, dental implants, edentulism, accuracy, dental rehabilitation, prosthetic constructions, assessment criteria

Вступ. Механічні ускладнення, які можуть виникати в ході функціонування тотальних незнімних конструкцій з опорою на дентальних імплантатах, часто проявляються невідновлювальними змінами, котрі обґрунтовують доцільність перепротезування, а в окремих випадках – і потребу проведення додаткових хірургічних втручань, встановлення нових інтраосальних опор, вилучення проблемних імплантатів з ознаками перелому в проекції шийки [1, 2, 3]. Однією з причин виникнення таких змін є відсутність пасивної посадки та належного припасування ортопедичної конструкції на встановлені внутрішньокісткові титанові дентальні імплантати [1, 2, 3]. За даними класичних досліджень клінічно-прийнятним рівнем відхилень від ідеальної посадки є 150 мкм девіації, проте варто зазначити, що єдиний показник не може відображати рівні клінічної толерантності у різних площинах, а також не є аналогічним з точки зору ризику розвитку біологічних та механічних ускладнень [4, 5, 6]. У структурі кумулятивної просторової девіації місфіту протетичної супраконструкції значення векторних складових такої часто є різновираженими, і без належної об'єктивізації з використанням сучасних методів аналізу неможливо встановити, яка із складових потребує корекції в першу чергу, і який обсяг корекцій є необхідним [4, 5, 6].

В сучасній медичній літературі конвекційні еластомерні відбитки отримані технікою відкритої ложки досі інтерпретуються у якості «золотого стандарту» реєстрації просторового взаємоположення встановлених дентальних імплантатів на верхній або нижній щелепах [7, 8]. Однак при реалізації цифрового протоколу реабілітації виникає потреба до оцифрування гіпсових моделей отриманих за аналоговими відбитками, або ж до вихідної

реєстрації положення дентальних імплантів з використанням цифрового відбитку (шляхом інтраорального сканування чи методу фотограмметрії). Попри те, що дані доказової бази засвідчують унікально-високі рівні правдивості та прецизійності фотограмметричного підходу, досі актуальними є дискусії щодо точності реєстрації положення дентальних імплантатах на беззубих щелепах із використанням технології інтраорального сканування [9, 10, 11, 12]. Різні модифікації інтраорального сканування, котрі полягають у зміні оригінальних стратегій сканування, використанні додаткових фідуціарних маркерів, застосуванні каліброваних джигів-шин, шинуванні скан-абатментів дозволяють мінімізувати рівні похибок, проте не виключають ризики виникнення таких [13]. Водночас в літературі відмічаються неузгодженості щодо значущості та ефективності різних оптимізованих підходів до реєстрації положення дентальних імплантів з використанням цифрового відбитку [14, 15], які лікарі-практики часто безпосередньо порівнюють між собою в пошуку преферативного, проте вихідна оцінка точності таких часто проводиться з використанням відмінних критеріїв та методик, котрі не підлягають безпосередньому порівнянню.

В систематичному огляді Wulfman C. та колег було констатовано відсутність дефінітивного методу контролю та перевірки точності посадки та припасування тотальних ортопедичних конструкцій на дентальні імпланти в умовах, коли протокол реабілітації реалізовувався в цифровому середовищі [16].

Відтак аналіз існуючих критеріїв та підходів до кількісної оцінки точності реєстрації положення дентальних імплантів з використанням технології цифрового відбитка дозволить не тільки визначити межі порівняння різних методів та модифікацій для оптимізації точності, але й сприятиме більш обґрунтованому розумінню впливу таких на окремі складові просторових, лінійних та ангулярних девіацій, а також дозволить зрозуміти фокус майбутніх вдосконалень технологій інтраорального сканування та фотограмметрії у

випадках їх застосування при тотальній реабілітації беззубих щелеп ортопедичними конструкціями з опорою на дентальних імплантатах.

Мета. Систематизувати критерії та підходи до кількісної оцінки точності реєстрації положення дентальних імплантатів з використанням технологій цифрового відбитка, а також визначити значущість різних статистичних показників для об'єктивізації параметрів правдивості та прецизійності верифікації положення скан-абатментів на досліджуваних сканах в порівнянні з референтними.

Матеріали та методи. Дизайн дослідження передбачав систематизацію різних методологічних підходів до кількісної оцінки точності реєстрації положення дентальних імплантатів з використанням технології цифрового відбитка, зокрема із реалізацією методик інтраорального сканування та фотограмметрії.

Таргетний пошук публікацій, асоційованих із метою даного дослідження, які містили опис різних методологій оцінки критерію точності при реєстрації положення дентальних імплантатів з використанням технології цифрового відбитка, провадився через систему Google Scholar (<https://scholar.google.com/>) з використанням функції розширеного пошуку та із застосуванням наступного набору ключових слів: «accuracy», «criteria», «digital impression», «intraoral scan», «photogrammetry», «trueness», «precision», «assessment parameter», «superimposition algorithm», «deviation», «linear», «angular», «spatial», «statistics», «validation». Формування пошукового запиту відбувалось шляхом комбінування різних ключових слів при збереженні цільової спрямованості пошукового процесу.

Відбір публікацій до первинної когорти забезпечувався за результатами аналізу секції опису методології проведеного дослідження за умови, що в структурі такої була наведена детальна інформації щодо підходу до обрахунку відповідного критерію оцінки точності реєстрації положення дентальних імплантатів при використанні цифрового відбитку. Критеріями виключення публікацій із досліджуваної когорти була інша, окрім англійської мова

публікації, та факт відсутності індексації наукової роботи у наукометричних базах Scopus та/або Web of Science. З первинної когорти відібраних наукових робіт також виключались такі, які описували однакові підходи до оцінки точності реєстрації положення дентальних імплантатів при використанні цифрового відбитку, а також такі, в котрих використовувані підходи до оцінки були описані неповністю, або ж таким чином, що вони не підлягали повторному відтворенню в аналогічних досліджуваних умовах.

Публікації, в яких належним чином була представлена методологія та підхід до обрахунку різних критеріїв та параметрів квантифікації точності реєстрації положення дентальних імплантатів при використанні цифрового відбитку, підлягали подальшому цільовому контент-аналізу згідно наступних категорій:

- 1) параметри кількісної репрезентації рівнів правдивості та прецизійності цифрових методів реєстрації положення дентальних імплантатів з урахуванням природи їх лінійних, ангулярних та просторових зміщень;
- 2) статистичні показники та їх роль у об'єктивізації показників похибок та відхилень верифікованих положень скан-абатментів на досліджуваних сканах в порівнянні з референтними цифровими мастер-моделями;
- 3) відмінності різних алгоритмів суміщення тестових/досліджуваних цифрових сканів та референтних цифрових мастер-моделей у процесі оцінки показника точності реєстрації позиції скан-абатментів на беззубих щелепах при реалізації технології цифрового відбитку.

У відповідності до сформованих категорій контент-аналізу екстракції підлягали не чисельні показники, а саме описи алгоритмів, підходів та критеріїв, які застосовували для оцінки точності реєстрації положення дентальних імплантатів при використанні методів інтраорального сканування та фотограмметрії.

Дані екстраговані із окремих публікацій були систематизовані у клітинки табличного редактора Microsoft Excel 2019 (Microsoft Office 2019, Microsoft,

США) у відповідності до афіліації із однією чи декількома сформованими категоріями контент-аналізу представленими вище.

Виклад основного матеріалу дослідження. Релевантні підходи до кількісної оцінки точності реєстрації положення дентальних імплантатів з використанням технології цифрового відбитка передбачають обрахунок параметрів правдивості та прецизійності, а також критеріїв ангулярних, просторових, лінійних та центроїдних відхилень.

Правдивість визначає наскільки близько зареєстроване положення імплантату в цифровому відбитку відповідає реальному (істинному) положенню імплантату, зазвичай визначеному за допомогою високоточних референсних методів (промисловий 3D-сканер, лабораторний сканер, КПКТ) [17, 19]. Квантифікація параметру правдивості, як правило, забезпечується шляхом обрахунку середньої похибки або ж середньоквадратичного відхилення (RMS) між позиціями скан-абатментів на досліджуваному цифровому відбитку та в структурі еталонного (референтного). Прецизійність (відтворюваність) визначає наскільки стабільно відтворюється положення імплантату при багаторазовому скануванні за однакових умов [17, 19]. Даний параметр обраховується як дисперсія (стандартне відхилення) між результатами повторних сканів однієї і тієї ж клінічної ситуації (рис. 1).



Рис. 1. Схематичне зображення параметрів правдивості та прецизійності

Кутове відхилення (ангулярна девіація) визначає різницю в орієнтації імплантату/скан-абатменту (куті нахилу) між досліджуваним сканом і

цифровою мастер-моделлю. В той же час лінійне відхилення (лінійна девіація) визначає різницю у просторому положенні центрів або ключових точок імплантату/скан-абатмента між досліджуваним сканом і еталоном/цифровою мастер-моделлю [19]. Відхилення центроїду характеризує відстань між геометричними центрами сканованого і еталонного положення скан-абатментів, і вимірюється як евклідова відстань у тривимірному просторі (рис. 2).

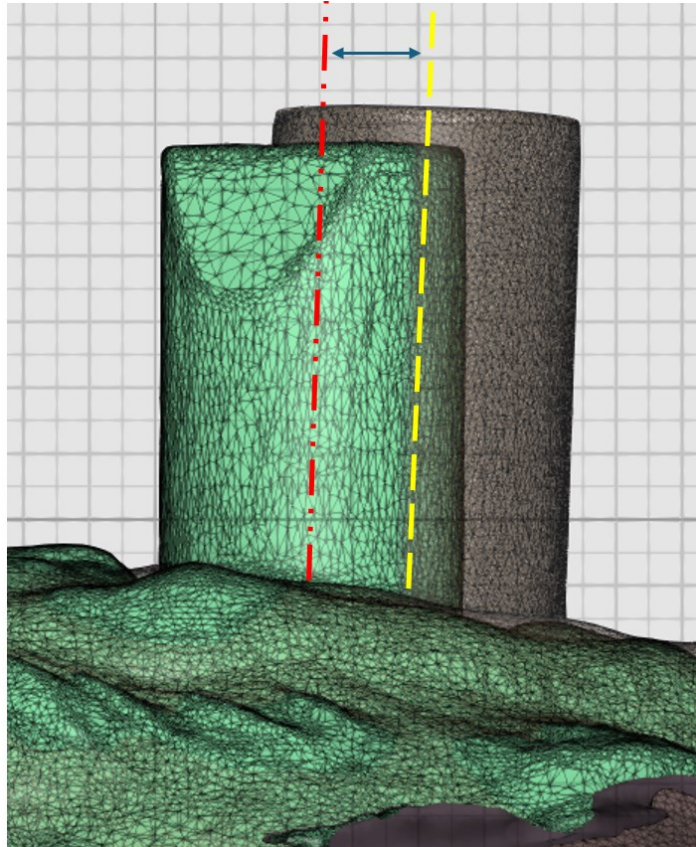


Рис. 2. Схематичне зображення центроїдних відхилень скан-абатментів на досліджуваному скані відносно референтної цифрової мастер-моделі (з клінічної практики та експериментальних досліджень Гончарук-Хомин М.Ю.)

Відхилення поверхні (поверхневі девіації) характеризують локальні відмінності у формі поверхні скан-абатментів між досліджуваним сканом та еталонною цифровою моделлю (рис. 3).

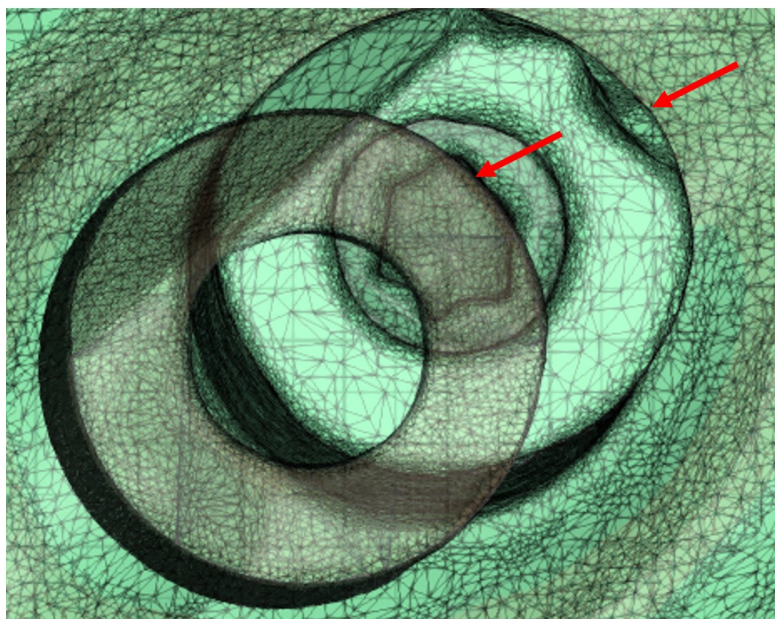


Рис. 3. Схематичне зображення відмінностей поверхонь скан-абатментів на досліджуваному скані відносно референтної цифрової мастер-моделі (з клінічної практики та експериментальних досліджень Гончарук-Хомин М.Ю.)

Узагальнюючий опис загальноприйнятих критеріїв оцінки точності реєстрації положення дентальних імплантатів з використанням технології цифрового відбитка представлений у таблиці 1.

Таблиця 1

Загальноприйняті критерії оцінки точності реєстрації положення дентальних імплантатів при використанні технології цифрового відбитка

Критерій	Параметр оцінки	Методи / Інструменти оцінки
Правдивість (істинність)	Відповідність реальній (еталонній) геометрії	Порівняння з еталонною моделлю, 3D-карта відхилень, RMS-помилка, середнє відхилення
Повторюваність (прецизійність)	Стабільність відтворення (репродукції) результатів при багаторазовому скануванні	Порівняння між кількома сканами, стандартне відхилення, парне зіставлення
Лінійне відхилення	Відхилення у відстанях між імплантатами (центр-центр або платформа)	Вимірювання в CAD-програмі, порівняння з еталонною моделлю, вимірювальні інструменти

Кутове відхилення	Відхилення в орієнтації осей імплантатів	CAD-аналіз, розрахунок відхилення осей, візуалізація в 3D
Центроїдне відхилення	Відхилення центроїдів	Вимірювання в CAD-програмі, порівняння з еталонною моделлю, вимірювальні інструменти
Ідентифікація скан-абатменту	Точність ідентифікації геометрії скан-абатменту (висота, форма, діапазон обертання)	Порівняння сканованих і CAD-моделей скан-абатменту, аналіз співпадіння контактної поверхні

У ранніх роботах відмінності реєстрації положення скан-абатментів від їх об'єктивної позиції на моделі оцінювали за розмахом відстаней та кута між осьовими лініями досліджуваних об'єктів, або ж ліній, наближених до центральної осі об'єкта. Класичний підхід, описаний Andriessen та колегами, не передбачав розкладання ангулярних дефлекцій на компоненти по осям x-, y- та z- через неможливість досягнути конгруенції суміщення в координатних площинах, які відрізнялися для досліджуваного та еталонного об'єктів [5]. Даний підхід аналогічний методології оцінки відхилень досягнутого положення імплантата, встановленого по навігаційному протоколу, відносно того, яке було заплановано за результатами конусно-променевої комп'ютерної томографії.

У лабораторному дослідженні Hamilton A. та колег було запропоновано з метою оцінки девіацій положення імплантатів використовувати не класичні критерії зміщення елементів stl-моделі, а зміщення вихідних показників прямокутної системи координат, які первинно було верифіковані для кожного із досліджуваних елементів (скан-абатментів, їх окремих поверхонь чи точок) [20]. Переважна більшість сучасних підходів до оцінки точності реєстрації положення дентальних імплантатів з використанням технології цифрового відбитка передбачають можливості для кількісного аналізу просторових, лінійних та ангулярних девіацій, які можуть бути відповідним чином

квантифіковані завдяки формуванню адаптованої або ж уніфікованої системи координат для досліджуваного та еталонного графічних об'єктів [21].

Підхід із аналізом просторової відповідності передбачає калькуляцію просторового відхилення цілісного трьохмірного об'єкта відносно конкретної координатної проекції, проте в окремих роботах описано можливість використання алгоритму перетворення Гельмерта для можливості суміщення набору координат референтної моделі та отриманого інтраорального скану [20]. На основі відмінностей координатних параметрів у порівнюваному та еталонному графічних об'єктах (сканах) обраховуються евклідові відстані між порівнюваними парами імплантатів. Враховуючи, що перевірка відповідності положення проводиться по факту оцінки зміщень скан-абатментів, які володіють певною сталою геометричної формою, то оцінку найкращої відповідності можна обраховувати за параметрами так званого центроїдного зміщення, які передбачають квантифікацію геометричного центру об'єкта (центроїда) відносно початкового або очікуваного положення [22]. Центроїдні відхилення дозволяють кількісно охарактеризувати точність позиціонування кожного окремого імплантата, та є незалежними від кутових відхилень, але обидва ці параметри варто враховувати разом [22]. Приймаючи до уваги, що центроїд представляє собою геометричний центр тривимірного об'єкта (скан-абатмента), то зміщення такого на досліджуваному скані відносно референтного обраховують після накладання mesh-сіток за параметром евклідової відстані. Результати оцінки відхилень можуть бути представлені як індивідуальні відхилення імплантатів, так і як середнє та максимальне центроїдне відхилення по всіх імплантатах кумулятивно. Для оцінки прецизійності щодо досягнення ідеальної відповідності кожен повторюваний скан із загального сету використовується в якості референтного і порівнюється із іншими сканами. Правдивість показника оцінюється шляхом порівняння усіх отриманих сканів із істинно-референтним, який зазвичай отримується із крос-дугової мастер-моделі при використанні виробничих комерційних або ж лабораторних стоматологічних сканерів.

Критерій крос-дугової відстані характеризує точність отриманого скана щодо відтворення об'єктивного параметра відстані між двома дистальними інтраосальними опорами [23]. З аналогічною метою може застосовуватися підхід із перевіркою міжімплантантної відстані на досліджуваному та референтному сканах між двома будь-якими парами імплантатів (рис. 4).

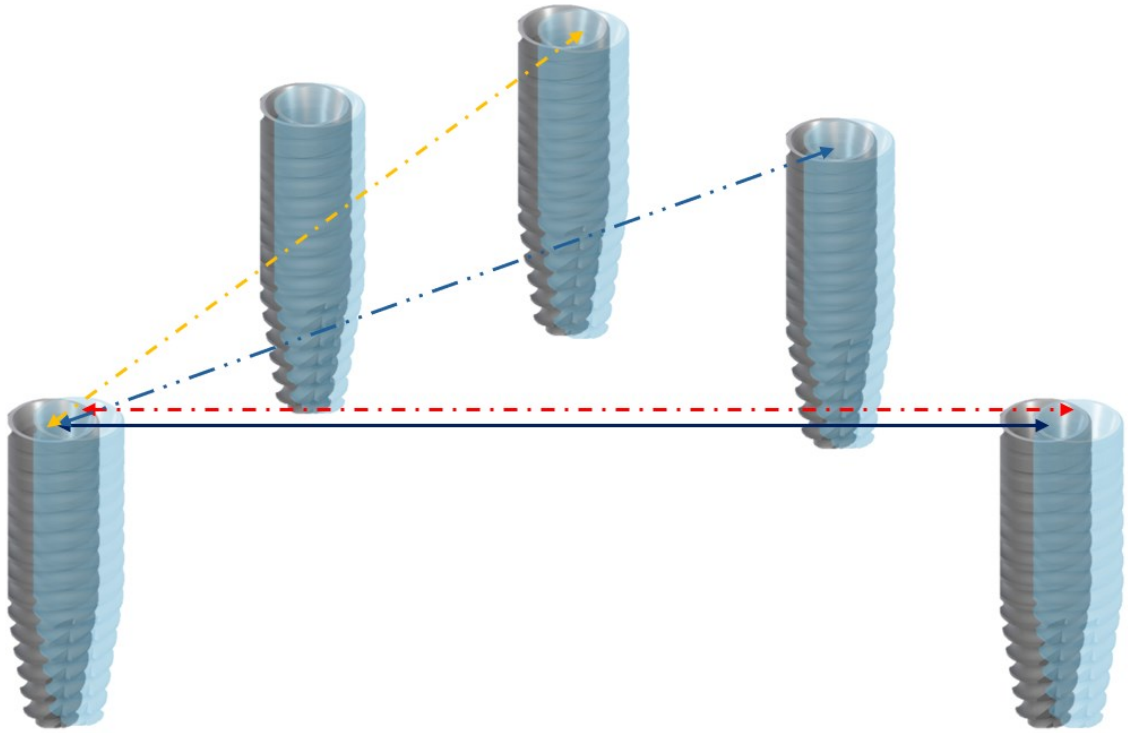


Рис. 4. Схематичне зображення принципу обрахунку міжімплантантних відстаней для оцінки точності реєстрації положення дентальних імплантатів на цифровому відбитку

Окремим інструментом для аналізу відповідно зареєстрованих положень імплантатів на досліджуваній та референтній моделі є колористичні карти відхилень. Карта відхилень (карта девіацій) представляє графічний/візуальний інструмент аналізу у вигляді кольорової 3D-маски, який показує різницю (відхилення) між двома графічними об'єктами [24]. Принцип роботи карти відхилення базується на порівнянні двох цифрових моделей, з яких для досліджуваної моделі обраховується відстань до найближчої точки на еталонній поверхні, і ці відстані в подальшому відображаються кольорами, які ідентифікують певне значення чи діапазон відхилень (останні можуть бути як позитивні, так і негативні) (рис. 5).

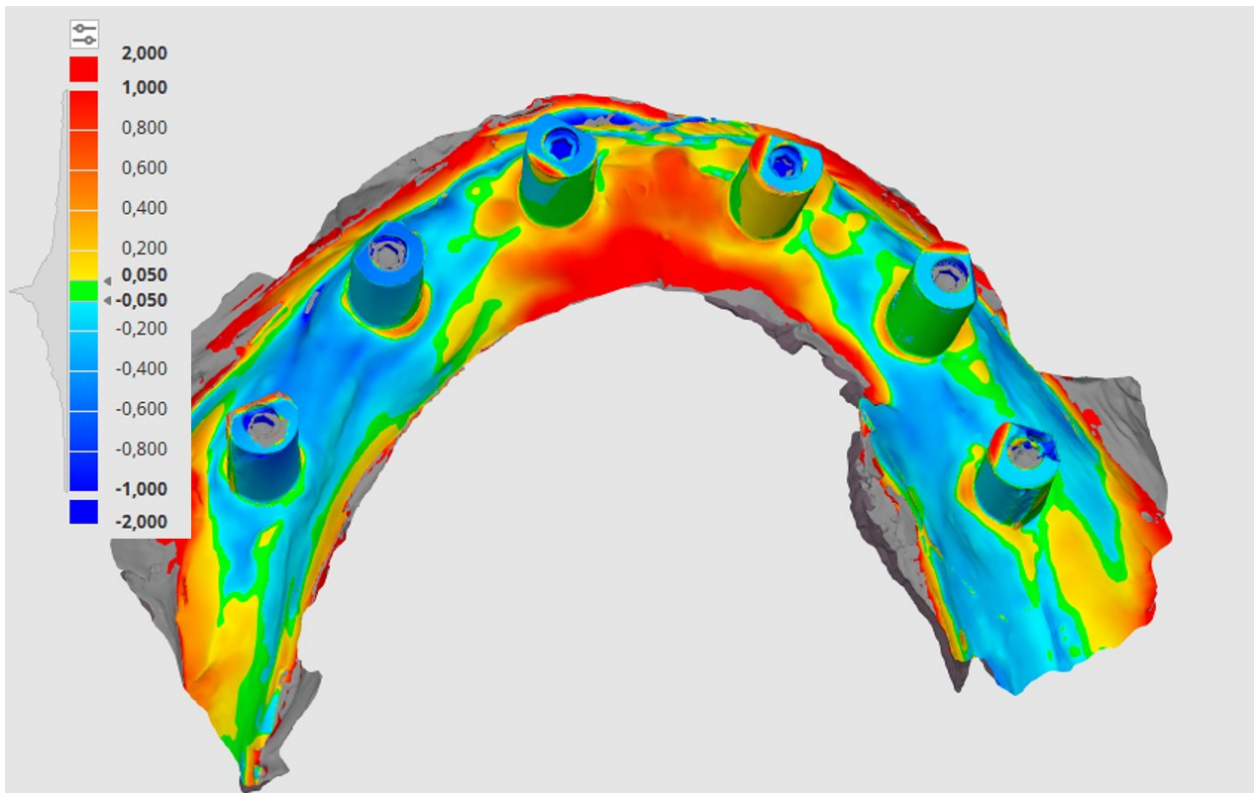


Рис. 5. Приклад карти девіацій при оцінці відхилень положень скан-абатментів на досліджуваному інтраоральному скану в порівнянні із відсканованою мастер-моделлю (з клінічної практики та експериментальних досліджень Гончарук-Хомин М.Ю. та Тукало І.В.)

В цілому карта девіацій дозволяє верифікувати локальні деформації отриманого інтраорального скану, об'єктивізувати потенційний факт накопичення похибки по довжині дуги, якість сканування в цілому, а також в проекції кожного скан-абатмента зокрема. Спрощений алгоритм побудови карти девіацій представлений у таблиці 2.

Таблиця 2

Алгоритм побудови карти девіацій при оцінці точності реєстрації положення дентальних імплантатів з використанням технології цифрового відбитка (при суміщенні досліджуваного внутрішньоротового скану та мастер-моделі)

Крок	Опис	Мета
Початкове вирівнювання/співставлення	Первинне вирівнювання за орієнтирами або вручну	Зблизити об'єкти

Деталізоване вирівнювання/співставлення (ICP)	Ітеративне уточнення положення	Мінімізувати відстані між точками
Обчислення відстаней	Вимірювання локальних відхилень	Кількісна оцінка точності
Кодування кольором	Відображення відхилень у вигляді кольорової карти	Візуальна оцінка точності
Статистика	Середнє відхилення, середньоквадратична похибка, максимальні відхилення	Кількісний аналіз

Віртуальний тест Шеффілда передбачає трансформацію зареєстрованого положення дистального імплантата на віртуальній референтній цифровій моделі та на отриманому скані таким чином, щоб вони характеризувалися ідеальною відповідністю, після чого дане співвідношення блокується відносно осі найбільш дистального імплантата і не піддається жодним послідовним маніпуляціям з графічними об'єктами [25]. Очевидно, що в ідеалізованих умовах при досягненні ідеального суміщення пари скан-абатментів в проекції найбільш дистального імплантата, інші – також повинні суміститися з відсутньою похибкою, однак на практиці похибка квантифікується за замірами евклідових відстаней між положеннями імплантатів на референтному скані та досліджуваних сканах (за змінами положень скан-абатментів), при цьому зберігаючи стабільність ідеального співвідношення між такими в проекції дистального імплантату.

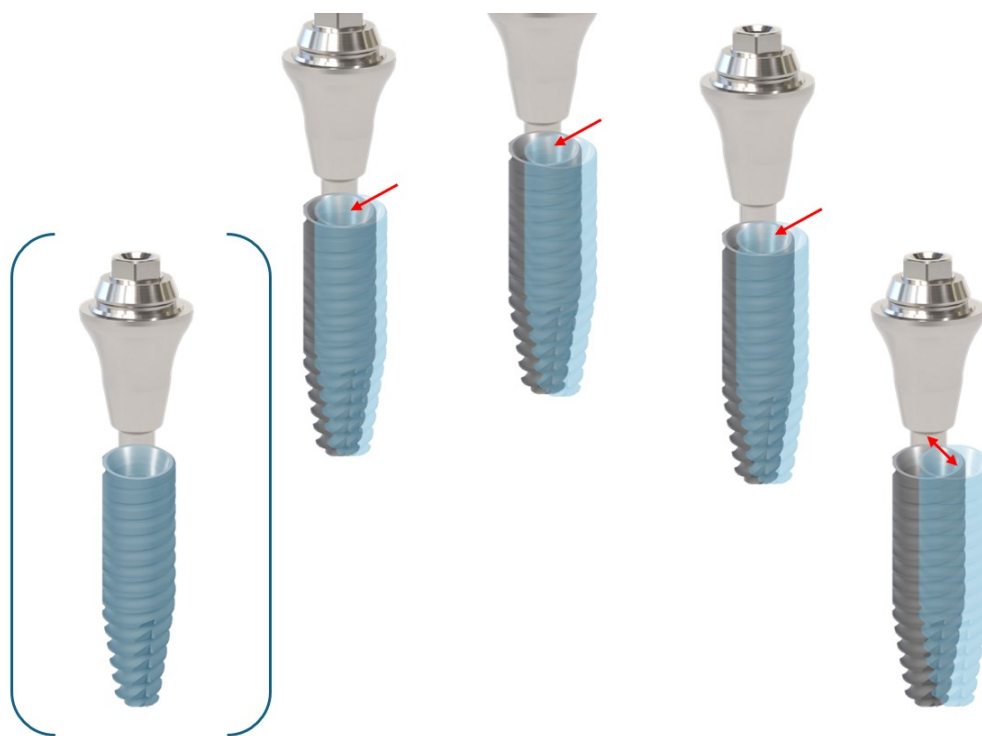


Рис. 6. Схематична репрезентація цифрового (віртуального) тесту Шеффілда (проекція положення дистального імплантату в дужках відповідає досягненню максимального повного суміщення між досліджуваным сканом та референтною цифровою мастер-моделлю з виключенням будь-яких подальших зміщень в цій ділянці)

В окремих дослідження віртуальний тест Шеффілда виконували з блокуванням маніпуляцій в проекції не одного, а двох дистальних імплантатів [26].

Використання можливостей графічного секціонування також сприяє деталізації рівнів девіацій від досягнення повної відповідності отриманих сканів референтному, як це було описано в дослідженні Rotaru C. та колег [27]. В оригінальному підході автори запропонували після накладання еталонного та досліджуваного трьохмірних сканів з встановленими скан-абатментами в програмному забезпеченні Exocad (Exocad GmbH, Darmstadt, Germany) з використанням алгоритму “best fit matching” за трьома референтними точками, проводити подальше графічне секціонування суперімпозиціонованих сканів в трьох площинах: перша площина повинна проходити паралельно центральній частині скан-абатмента, друга – перпендикулярно до його центральної частини, а третя – перпендикулярно до вертикальної осі скан-абатмента в його

корональній третині [27]. На кожній із площин визначали відхилення положення скан-абатмента, засканованого інтраоральним сканером, від положення, зареєстрованого лабораторним апаратом, мануально по величині відхилення контуру. Дану маніпуляцію можна реалізовувати у більшості програмних забезпечень, асоційованих з інтраоральним сканером, і вона є інтуїтивно-простою у виконанні, оскільки входить до набору базових навичок, необхідних для роботи з трьохмірними графічними об'єктами, однак даний підхід не дає можливості об'єктивізувати тенденційну траєкторію зміщення скан-абатментів, рівень центроїдного зміщення та його вираженість в різних координатних точках. З іншої сторони є можливість візуально оцінити відмінності реєстрації положень скан-абатментів на досліджуваній та еталонній графічних моделях за площинними контурами кожного із верифікованих положень та відстанню між такими.

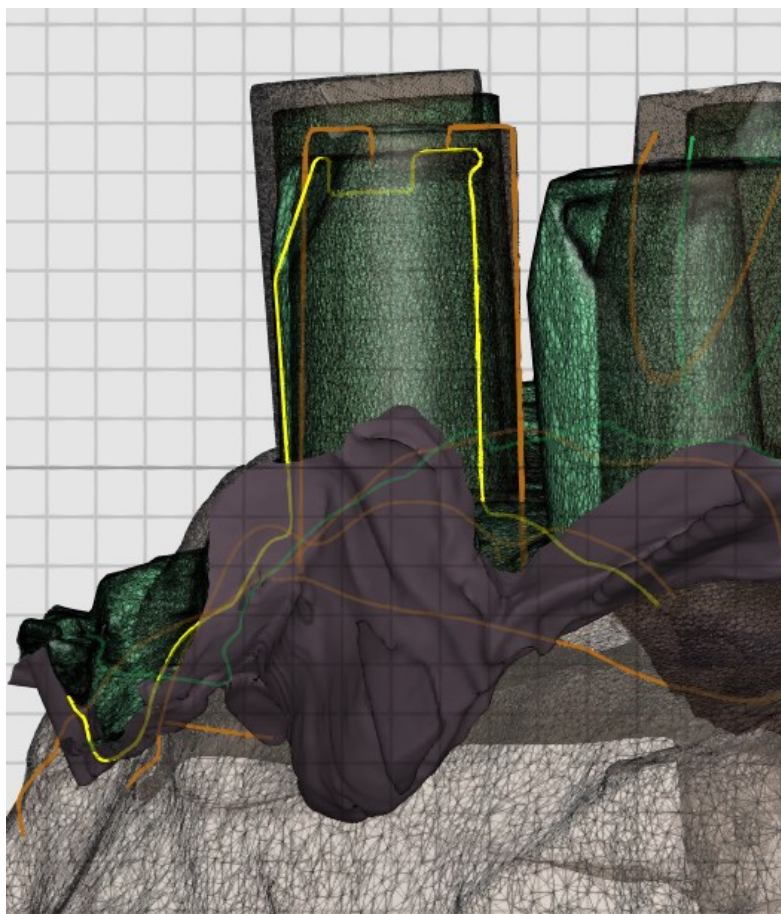


Рис. 7. Схематичне зображення відмінностей положення скан-абатментів на досліджуваному скані та цифровій мастер-моделі з реалізацією функції крос-секціонування та візуалізацією відмінностей площинних контурів

При порівнянні позицій скан-абатментів, зареєстрованих за допомогою інтраорального сканера (тестове сканування) з референсною моделлю (зазвичай отриманою за допомогою високоточних лабораторних сканерів), специфічні статистичні показники допомагають кількісно оцінити, наскільки близько або далеко від істинних (референсних) позицій знаходяться відскановані імплантати/скан-абатменти. У якості таких показників застосовують середню похибку, середньоквадратичну похибку, мінімальну та максимальну похибки, а також стандартне відхилення [20, 22, 25, 27]. Середня похибка представляє собою середнє значення всіх відстаней між відповідними точками поверхні тестового скану і референтної цифрової моделі або між ключовими точками (наприклад, центроїдами імплантатів). Враховуючи, що середня похибка відображає величину зміщення двох графічних об'єктів один відносно одного, менше її значення свідчить про вищу загальну точність. Середньоквадратична похибка обраховується як квадратний корінь із середнього значення квадратів відстаней між відповідними точками, що характеризуються певним рівнем несуміщення. Середньоквадратична похибка дає більш чітке розуміння якості отриманого суміщення двох сканів, оскільки вона більш чутлива до крайніх викидів у пулі даних, враховуючи, що за формулою свого обрахунку передбачається піднесення їх до квадрату. Максимальна похибка характеризує найбільшу відстань між будь-якими двома відповідними точками, а мінімальна похибка – найменшу відстань, і може відповідати нулю, якщо суміщення характеризується як ідеальне. Максимальна похибка дозволяє виявити ділянки із критичними несуміщеннями, які можуть вплинути на клінічний результат. Стандартне відхилення визначає розкид або ж варіацію відхилень відносного середнього значення для всього скану. По суті середнє відхилення характеризує параметр стабільності точності сканування (прецизійність). Низьке стандартне відхилення означає, що усі наявні відхилення згруповані близько до середнього значення, що свідчить про високу повторюваність. Обраховані

статистичні показники часто порівнюють з клінічними критеріями толерантності (прийнятності), який для випадків відбитків з імплантатів на беззубих щелепах зазвичай повинен не перевищувати 150 мкм [4, 5, 6]. Для оцінки точності реєстрації положень дентальних імплантатів на беззубих щелепах при використанні технології цифрового відбитка важливо враховувати одразу декілька статистичних критеріїв, оскільки середня похибка дає загальне уявлення про помилку сканування, але може приховувати одиничні великі відхилення; середньоквадратична похибка підкреслює вплив великих відхилень, показуючи, наскільки серйозні найгірші помилки сканування; максимальна похибка вказує на найгіршу окрему помилку сканування, яка є клінічно значущою, а стандартне відхилення інформує про повторюваність та стабільність точності сканування (рис. 8).

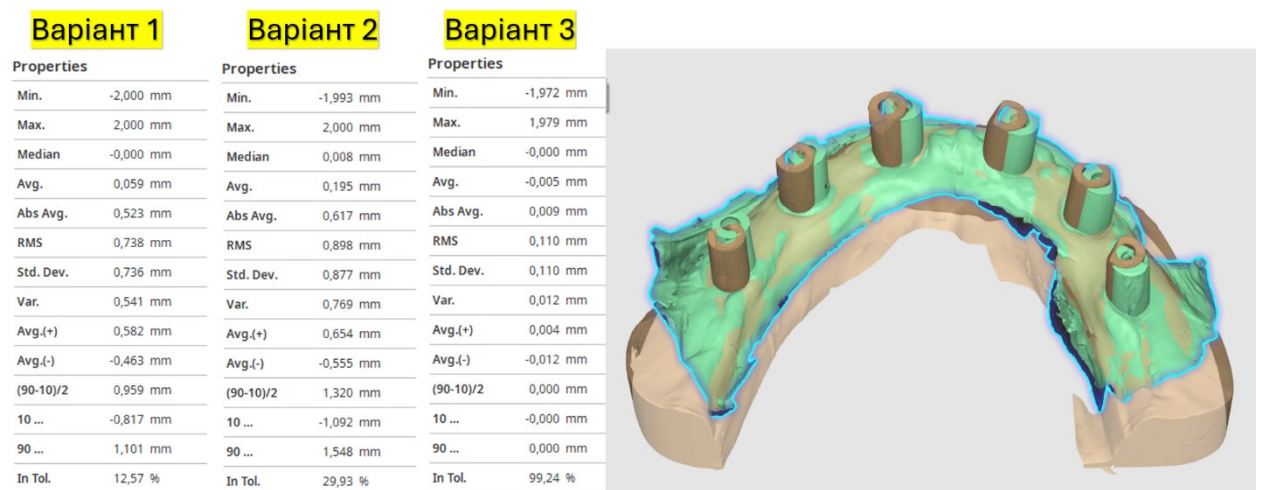


Рис. 8. Обрахунок сукупності статистичних параметрів (максимальних відхилень, значень медіани, середніх похибок, стандартних відхилень, варіації, середньоквадратичних похибок) для квантифікації точності реєстрації положення скан-абатментів за результатами суміщення досліджуваного скана та цифрової мастер-моделі

При цьому варто пам'ятати, що не тільки особливості процесу сканування можуть впливати на обраховані рівні точності реєстрації положень скан-абатментів, але й підходи, які застосовуються для суперімпозиції (графічного суміщення) досліджуваного інтраорального скану та референтної цифрової моделі також можуть визначати діапазон потенційних відхилень, що характеризують кумулятивний показник точності.

Суперімпозиція досліджуваного та еталонного сканів може проводитися за суміщення верших (вертексів), сіток, а також кривих та поверхонь (які входять до структури NURB). Вершина (вертекс) представляє собою одну точку в тривимірному просторі з координатами X , Y , Z , яка є базовим елементом геометрії 3D моделі. При оцінці точності реєстрації положення імплантатів вершини позначають конкретні точки на поверхні скан-абатментів, отримані сканером. Сітка (mesh) предсталає певну сукупність вершин, ребер і граней (зазвичай трикутників або полігонів), що формують поверхню 3D-об'єкта [28]. Сітки є найпоширенішим форматом даних, які дають інтраоральні сканери. Вони описують форму поверхні у вигляді великої кількості полігонів (рис. 9).

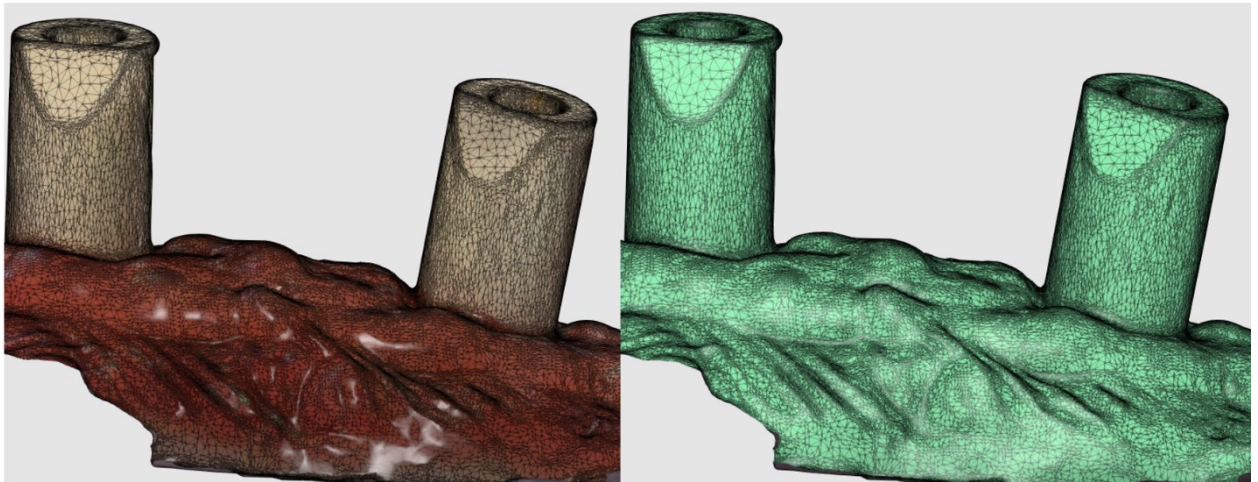
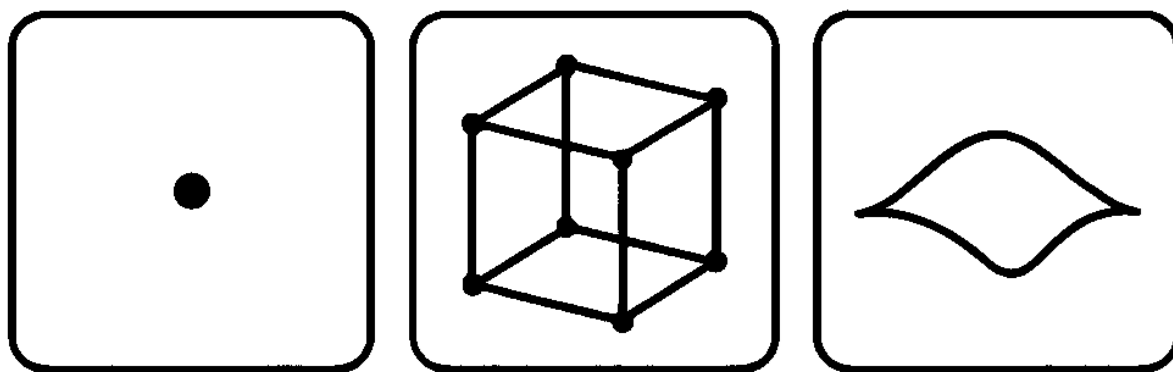


Рис. 9. Приклад репрезентації сітки (mesh) скан-абатментів на отриманому внутрішньоротовому скані

NURB в свою чергу є математичним представленням 3D-геометрії через криві та поверхні [28]. На противагу сітці, підхід NURB описує гладкі поверхні за допомогою математичних формул, і через те широко використовується в CAD-програмах для точного моделювання стоматологічних конструкцій (це пов'язано з простотою маніпуляції з гладкими поверхнями, а не формами їх апроксимації у вигляді полігонів) (рис. 10).



ВЕРШИНА

СІТКА

NURB

Рис. 10. Схематичне зображення відмінностей між вершиною (vertex), сіткою (mesh) та NURB

Відмінності взаємосуміщення при використанні у якості елементів для суперімпозиції вершин, сіток та гладких кривих і поверхонь представлені у таблиці 3.

Таблиця 3

Відмінності взаємосуміщення при використанні у якості елементів для суперімпозиції різних орієнтирів

Елемент суміщення	Опис	Суміщення (суперімпозиція)	Переваги	Недоліки
Вершина (вертекс)	Окремі точки в просторі	Порівняння точок одна до одної	Просте, безпосереднє	Чутливість до шуму в структурі зображення у формі різної щільності даних
Сітка (mesh)	Поверхня з полігонів	Найкраще прилягання поверхонь (best-fit)	Хороше відтворення форми	Якість залежить від параметрів сітки
NURB	Гладкі криві і поверхні	Точне математичне прилягання до поверхні	Висока точність, гладкість контуру	Складний в реалізації, потребує CAD-моделей

До типових алгоритмів суміщення сканів як графічних об'єктів відносять наступні:

- алгоритм ітеративного суміщення найближчих точок (iterative closest point – ICP) – ітеративно знаходить для кожної точки в скані найближчу точку в референсних даних, мінімізує сумарну відстань між відповідними точками, коригуючи положення (поворот і зсув), повторюється, поки зміни не стануть мінімальними, водночас може некоректно працювати в траєкторії локальних мінімумів, а також чутливий до викидів;
- алгоритм суміщення за ознаками (feature-based alignment) – використовує анатомічні орієнтири для первинного вирівнювання, зазвичай комбінується з ICP для уточнення, ефективний при значущій початковій різниці позицій;
- алгоритм суміщення поверхня-на-поверхню – порівнює безпосередньо поверхні (сітки або NURB), використовує метрики відстані, є можливість застосовувати вагові коефіцієнти для пріоритетних зон (наприклад, область імплантату);
- алгоритм трансляції-суміщення NURB до сітки – оптимізує параметри NURB-поверхні, щоб найкраще відповідати сітковим даним скану, обчислювально складніший метод, але дає більш точні результати, особливо для гладких поверхонь імплантатів [29, 30].

Зазвичай процес суміщення цифрових графічних об'єктів виконується за допомогою алгоритму «найкращого прилягання» (best-fit algorithm), який може реалізовуватися автоматично, або ж на основі окремо вибраних точок чи поверхонь [31, 32]. Даний алгоритм суміщення підбирає набір точок або центроїдів досліджуваного скану так, щоб вони максимально збігалися з відповідними точками еталонної цифрової моделі. Метод найменших квадратів, що використовується в алгоритмі «найкращого прилягання», трансформує одну з множин точок таким чином, щоб сума квадратів відстаней між відповідними точками двох цифрових об'єктів (скану та еталонної

цифрової моделі) була мінімальною [31, 32]. Відтак перевагою алгоритму «найкращого прилягання» є те, що він автоматично обчислює розбіжності між графічними об'єктами, проте недоліком цього алгоритму полягає в тому, що отримані відхилення можуть не точно відповідати реальним помилкам, які виникають під час сканування. Через особливості реалізації алгоритму, дані досліджуваного скану вирівнюються з даними еталонного скану настільки близько, наскільки це можливо теоретично. Унаслідок цього фактичне просторове співвідношення між тестовими і еталонними даними може суттєво відрізнятись, а реальна величина відхилення може бути заниженою. При скануванні ділянок дуже обмеженої протяжності алгоритм «найкращого прилягання» зазвичай характеризується найкращою ефективністю з точки зору об'єктивізації суміщення, проте зі збільшенням розмірів ділянки сканування і зі зростанням різниці даних вплив цієї помилки зростає через особливості процесу суміщення.

Таким чином, найбільш часто застосовувані на сьогодні підходи до кількісної оцінки точності реєстрації положення дентальних імплантатів з використанням технології цифрового відбитка передбачають обрахунок параметрів правдивості та прецизійності, а також критеріїв ангулярних, просторових, лінійних та центроїдних відхилень в ході порівняння досліджуваного скана та референтної цифрової мастер-моделі, як трьохмірних графічних об'єктів. Вибір структурних елементів суміщення, а також протоколів суперімпозиції, може впливати на результати оцінки точності реєстрації положення дентальних імплантатів. Для об'єктивізації точності реєстрації положень дентальних імплантатів за даними верифікованих позицій скан-абатментів при використанні технології цифрового відбитка доцільно враховувати значення одразу декількох статистичних показників, зокрема середньої похибки, середньоквадратичної похибки, максимальної похибки, а також стандартного відхилення, які репрезентують різні складові помилок сканування, включаючи значущість найбільших відхилень, їх локалізацію, та дефекти у повторюваності отриманих результатів.

Висновки. При комперативному аналізі ефективності різних методів реєстрації положення дентальних імплантатів в ході реалізації цифрового протоколу реабілітації доцільно враховувати критерії, які застосовувались для кількісної оцінки точності таких з об'єктивізацією методологічних можливостей їх порівняння, зважаючи на потенційні відмінності у досліджуваних умовах під час валідації. Найбільш застосовуваними критеріями оцінки є параметри ангулярної девіації, лінійного відхилення, відхилення центроїду та відхилення поверхонь, за якими відповідно можуть визначатися рівні правдивості та прецизійності шляхом обрахунку значень середніх похибок, середньоквадратичних похибок, стандартних девіацій, а також максимальних та мінімальних похибок. Для квантифікації різних складових кумулятивного параметру точності необхідним є застосування декількох критеріїв оцінки одночасно. Важливо також враховувати граничні рівні клінічної толерантності, які за даними доказової літератури варіюють з точки зору ризику розвитку біологічних та механічних ускладнень.

References

1. Sánchez-Torres A, Cercadillo-Ibarguren I, Figueiredo R, Gay-Escoda C, Valmaseda-Castellón E. Mechanical complications of implant-supported complete-arch restorations and impact on patient quality of life: A retrospective cohort study. *The Journal of Prosthetic Dentistry*. 2021 Feb 1;125(2):279-86. <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2020.01.006>
2. da Silva Bezerra A, Ribeiro AK, Veríssimo AH, de Almeida EO. Prosthetic complications and failures of implant-supported fixed partial dentures: A scoping review. *The Journal of Prosthetic Dentistry*. 2023 Nov 29. <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2023.10.025>
3. Verma A, Singh SV, Arya D, Shivakumar S, Chand P. Mechanical failures of dental implants and supported prostheses: A systematic review. *Journal of Oral Biology and Craniofacial Research*. 2023 Mar 1;13(2):306-14. <https://doi.org/10.1016/j.jobcr.2023.02.009>
4. 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. PMID: 28944373

5. Andriessen FS, Rijkens DR, Van Der Meer WJ, Wismeijer DW. Applicability and accuracy of an intraoral scanner for scanning multiple implants in edentulous mandibles: a pilot study. *The Journal of Prosthetic Dentistry*. 2014 Mar 1;111(3):186-94. <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2013.07.010>
6. 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>
7. Papaspyridakos P, Chen CJ, Gallucci GO, Doukoudakis A, Weber HP, Chronopoulos V. Accuracy of implant impressions for partially and completely edentulous patients: a systematic review. *International Journal of Oral & Maxillofacial Implants*. 2014 Aug 1;29(4). <https://doi.org/10.11607/jomi.3625>
8. Floriani F, Lopes GC, Cabrera A, Duarte W, Zoidis P, Oliveira D, Rocha MG. Linear accuracy of intraoral scanners for full-arch impressions of implant-supported prostheses: A systematic review and meta-analysis. *European journal of dentistry*. 2023 Oct;17(04):964-73. <https://doi.org/10.1055/s-0042-1758798>
9. 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>
10. Ribeiro P, Díaz-Castro CM, Ríos-Carrasco B, Ríos-Santos JV, Herrero-Climent M. Stereo-photogrammetry for impression of full-arch fixed dental prosthesis—an update of the reviews. *Prosthesis*. 2024 Aug 15;6(4):939-51. <https://doi.org/10.3390/prosthesis6040068>
11. Cheng J, Zhang H, Liu H, Li J, Wang HL, Tao X. Accuracy of edentulous full-arch implant impression: An in vitro comparison between conventional impression, intraoral scan with and without splinting, and photogrammetry. *Clinical Oral Implants Research*. 2024 May;35(5):560-72. <https://doi.org/10.1111/clr.14252>
12. Faria JC, Sampaio-Fernandes MA, Oliveira SJ, Malheiro R, Sampaio-Fernandes JC, Figueiral MH. Precision of Photogrammetry and Intraoral Scanning in Full-Arch Implant Rehabilitation: An In Vitro Comparative Study. *Applied Sciences*. 2025 Jan 29;15(3):1388. <https://doi.org/10.3390/app15031388>
13. Revilla-León M, Gómez-Polo M, Rutkunas V, Ntovas P, Kois JC. Classification of Complete-Arch Implant Scanning Techniques Recorded by Using Intraoral Scanners. *Journal of Esthetic and Restorative Dentistry*. 2025 Jan;37(1):236-43. <https://doi.org/10.1111/jerd.13322>

14. Shetty PS, Gangurde AP, Chauhan MR, Jaiswal NV, Salian PR, Singh V. Accuracy of the digital implant impression with splinted and non-splinted intraoral scan bodies: A systematic review. *The Journal of Indian Prosthodontic Society*. 2025 Jan 1;25(1):3-12. https://doi.org/10.4103/jips.jips_261_24
15. Azevedo L, Marques T, Karasan D, Fehmer V, Sailer I, Correia A, Gómez-Polo M. Effect of splinting scan bodies on the trueness of complete arch digital implant scans with 5 different intraoral scanners. *The Journal of Prosthetic Dentistry*. 2024 Jul 1;132(1):204-10. <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2023.06.015>
16. Wulfman C, Naveau A, Rignon-Bret C. Digital scanning for complete-arch implant-supported restorations: A systematic review. *The Journal of prosthetic dentistry*. 2020 Aug 1;124(2):161-7. <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2019.06.014>
17. Sanda M, Miyoshi K, Baba K. Trueness and precision of digital implant impressions by intraoral scanners: a literature review. *International Journal of Implant Dentistry*. 2021 Jul 27;7(1):97. <https://doi.org/10.1186/s40729-021-00352-9>
18. Mangano FG, Hauschild U, Veronesi G, Imburgia M, Mangano C, Admakin O. Trueness and precision of 5 intraoral scanners in the impressions of single and multiple implants: a comparative in vitro study. *BMC oral health*. 2019 Jun 6;19(1):101. <https://doi.org/10.1038/s41432-024-01045-z>
19. Kim RJ, Benic GI, Park JM. Trueness of ten intraoral scanners in determining the positions of simulated implant scan bodies. *Scientific Reports*. 2021 Jan 28;11(1):2606. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-82218-z>
20. Hamilton A, Negreiros WM, Jain S, Finkelman M, Gallucci GO. Influence of scanning protocol on the accuracy of complete-arch digital implant scans: An in vitro study. *Clinical Oral Implants Research*. 2024 Jun;35(6):641-51. <https://doi.org/10.1111/clr.14259>
21. Revilla-León M, Att W, Özcan M, Rubenstein J. Comparison of conventional, photogrammetry, and intraoral scanning accuracy of complete-arch implant impression procedures evaluated with a coordinate measuring machine. *The Journal of prosthetic dentistry*. 2021 Mar 1;125(3):470-8. <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2020.03.005>
22. Pan Y, Tsoi JK, Lam WY, Chen Z, Pow EH. Does the geometry of scan bodies affect the alignment accuracy of computer-aided design in implant digital workflow: An in vitro study?. *Clinical Oral Implants Research*. 2022 Mar;33(3):313-21. <https://doi.org/10.1111/clr.13890>
23. Thanasrisueb Wong P, Kulchotirat T, Anunmana C. Effects of inter-implant distance on the accuracy of intraoral scanner: An in vitro study. *The Journal*

- of Advanced Prosthodontics. 2021 Apr 27;13(2):107.
<https://doi.org/10.4047/jap.2021.13.2.107>
24. 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>
25. Negreiros WM, Sun TC, Jain S, Finkelman M, Gallucci GO, Hamilton A. Precision of complete-arch digital implant scans using photogrammetry and intra-oral scanning. An in vivo cross-over study.: Complete-Arch Implant Scans: Photogrammetry vs IOS. Journal of Dentistry. 2025 Jun 21:105928.
<https://doi.org/10.1016/j.jdent.2025.105928>
26. Li J, Chen Z, Nava P, Yang S, Calatrava J, Wang HL. Calibrated intraoral scan protocol (CISP) for full-arch implant impressions: An in vitro comparison to conventional impression, intraoral scan, and intraoral scan with scan-aid. Clinical Implant Dentistry and Related Research. 2024 Oct;26(5):879-88.
<https://doi.org/10.1111/cid.13338>
27. Rotaru C, Bica EA, Butnărașu C, Săndulescu M. Three-dimensional scanning accuracy of intraoral scanners for dental implant scan bodies—an original study. Medicina. 2023 Nov 19;59(11):2037.
<https://doi.org/10.3390/medicina59112037>
28. Mangano FG, Admakin O, Bonacina M, Lerner H, Rutkunas V, Mangano C. Trueness of 12 intraoral scanners in the full-arch implant impression: a comparative in vitro study. BMC oral health. 2020 Sep 22;20(1):263.
<https://doi.org/10.1186/s12903-020-01254-9>
29. van Hooft J, Kielenstijn G, Liebrechts J, Baan F, Meijer G, D'haese J, Bronkhorst E, Verhamme L. Intraoral scanning as an alternative to evaluate the accuracy of dental implant placements in partially edentate situations: a prospective clinical case series. Journal of Clinical Medicine. 2022 Oct 5;11(19):5876. <https://doi.org/10.3390/jcm11195876>
30. O'Toole S, Bartlett D, Keeling A, McBride J, Bernabe E, Crins L, Loomans B. Influence of scanner precision and analysis software in quantifying three-dimensional intraoral changes: two-factor factorial experimental design. Journal of Medical Internet Research. 2020 Nov 27;22(11):e17150.
<https://doi.org/10.2196/17150>
31. Revilla-León M, Gohil A, Barmak AB, Zandinejad A, Raigrodski AJ, Alonso Pérez-Barquero J. Best-fit algorithm influences on virtual casts' alignment discrepancies. Journal of Prosthodontics. 2023 Apr;32(4):331-9.
<https://doi.org/10.1111/jopr.13537>
32. Li R, Zhang R, Zhou Y, Peng J. Accuracy of two best-fit alignment strategies with different reference areas for wear measurement with an intraoral scanner:

an in vitro study. International Journal of Computerized Dentistry. 2023 Oct 1;26(4). <https://doi.org/10.3290/j.ijcd.b3839017>