

Анатолій Потапчук, Василь Алмаші, Юрій Брецько

ДВНЗ «Ужгородський національний університет», м. Ужгород, Україна

Сучасний погляд на застосування тривимірного сканування обличчя в клінічній стоматології (огляд літератури)

▷ **Актуальність.** Точність і прецизійність є ключовими параметрами лицьового сканування в стоматології, оскільки вони визначають ступінь відповідності цифрових моделей анатомії пацієнта та їхню придатність для діагностики, планування лікування, виготовлення імплантатів і післяопераційного контролю. Досягнення оптимальної точності сканування потребує застосування сучасних технологій у поєднанні з дотриманням стандартизованих методик виконання процедури. Показники точності та прецизійності лицьових сканерів значною мірою залежать від типу пристрою, його технічних характеристик і програмного забезпечення, що використовується для оброблення отриманих даних.

Мета: проаналізувати сучасний стан технології лицьового сканування у стоматології, окресливши історію її розвитку, механізми роботи, а також наявні докази щодо застосування й обмежень у межах цифрової стоматології.

Матеріал і методи. Інформаційний пошук і аналіз наукових джерел здійснено з використанням наукометричних баз даних Scopus, PubMed, BVS та SciELO за ключовими словами: лицьовий сканер, стоматологія, ортопедична стоматологія, віртуальний пацієнт, щелепно-лицева протетика, точність. Ідентифіковано 84 релевантних наукових публікації за останні 5 років. До огляду включено оригінальні наукові статті, результати досліджень та офіційні рекомендації медичних асоціацій з позитивними результатами у досліджуваних групах. Зібраний матеріал проаналізовано за принципами контент-аналізу з подальшою систематизацією та класифікацією даних із використанням програмного забезпечення CADIMA.

Висновки. Незважаючи на обмеження, пов'язані з якістю сканування та функціонуванням програмного забезпечення, тривимірні лицьові сканери є швидким й неінвазивним інструментом, що може бути ефективно застосований у різних напрямках стоматологічної практики. Лицьові сканери відіграють важливу роль у цифровому робочому процесі, забезпечуючи отримання лицьових записів для покращення міждисциплінарної комунікації, віртуальної артикуляції, дизайну усмішки, а також діагностики й лікування обструктивного апное сну. У перспективі технологія лицьового сканування має значний потенціал для застосування в галузях краніо-фациальних досліджень, а також протезній діагностиці та плануванні стоматологічного лікування.

Ключові слова: лицьовий сканер, стоматологія, ортопедична стоматологія, віртуальний пацієнт, щелепно-лицева протетика, точність.

Стаття опублікована на умовах відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.uk>



Вступ

Безперервний розвиток цифрових технологій зумовив значні інновації у стоматологічних методах і робочих процесах. Застосування внутрішньоротових сканерів і технологій CAD/CAM для відновлення зубів та дентальних імплантатів стало звичайною клінічною практикою. Останнім часом у цифровий стоматологічний робочий процес

дедалі активніше інтегруються лицьові сканери. Ця технологія ґрунтується на оптичних методах сканування, що дають змогу в цифровому форматі отримувати й відтворювати детальне тривимірне зображення обличчя і голови пацієнта. Надалі отримані дані можуть використовуватись для широкого спектра завдань, зокрема, планування лікування, діагностики та комунікації з пацієнтом.

Незважаючи на відносно нещодавнє відродження інтересу до лицьового сканування в стоматології, ця технологія має доволі тривалу історію застосування у стоматологічній галузі. У 1895 р. Röntgen відкрив рентгенівські промені, що дало змогу візуалізувати внутрішні структури (кістки, зуби) без хірургічного втручання. У 1944 р. Thalmann-Degan застосували стереофотограмметрію для реєстрування змін обличчя після ортодонтичного лікування. У 1967 р. Burke та Beard спростили метод стереофотограмметрії шляхом використання простіших камер і застосування мультиплексної системи побудови зображень з метою скорочення часу знімків. У 1991 р. Moss із колегами першими почали рутинно застосовувати систему тривимірного лазерного сканування у клінічній практиці, вони здійснювали моніторинг росту дітей із лицевими деформаціями на кафедрі ортодонції Університетського коледжу Лондона [1–3]. Невдовзі після цього, 1995 р., Saso з партнерами поєднали електроміографію з лазерним скануванням для дослідження функції м'язів обличчя. У 2009 р. Lee з колегами використали характеристики поверхневих краніофасціальних структур, отримані з цифрових фотографій, для прогнозування обструктивного апное сну [2–4]. Із пришвидшенням темпів технологічних інновацій системи лицьового сканування ставали дедалі доступнішими та економічно привабливішими для стоматологічної практики, що сприяло появі нових напрямів їх клінічного застосування.

Тривимірною візуалізацією для діагностики та планування лікування є надзвичайно важливою й необхідною у протезній реабілітації. Технологія лицьового сканування полегшує збір і аналіз допротезних та поточних клінічних даних. Створення віртуального пацієнта поєднанням зображень, отриманих за допомогою лицьового сканера, внутрішньоротового сканера та конусно-променевої комп'ютерної томографії (КПКТ), оптимізує діагностичні процедури, забезпечує точний аналіз стану пацієнта, а також слугує ефективним засобом комунікації для передачі інформації зуботехнічній лабораторії та візуалізації прогнозованих результатів лікування для пацієнта.

Застосування лицьового сканування є важливим компонентом естетичної стоматології як невід'ємна складова цифрового дизайну усмішки [3]. Використання лицьового сканера для фіксування природного положення спокою, максимальної усмішки та різних ліній усмішки дає можливість віртуального розміщення зубів у тривимірній моделі, що допомагає цифрово оцінювати положення, форму та колір зубів на обличчі, зокрема під час виготовлення термінових протезів [4–6].

Ортогнатична хірургія з використанням комп'ютерно-асистованого хірургічного моделювання стає можливою завдяки поєднанню DICOM-файлів КПКТ пацієнта та STL-файлів внутрішньоротового сканування. Віртуальне ортогнатичне хірургічне планування забезпечує точну й критично важливу передопераційну підготовку.

Попри те що цифрові технології та лицьові сканери сприяють значному розвитку стоматології, їх широке впровадження стримується переважно новизною технології та її вартістю. Розуміння шляхів інтеграції лицьового сканування у стоматологічний робочий процес може допомогти лікарям легше адаптуватися до впровадження цієї технології.

Мета: проаналізувати сучасні типи лицьових сканерів та окреслити різноманітні напрями їх застосування у стоматології.

Механізми сканування

Огляд наявних на сьогодні лицьових сканерів і програмного забезпечення наведено у табл. 1. У лицьових сканерах застосовують чотири основні методи сканування: фотограмметрію, стереофотограмметрію, структуроване світлове сканування та лазерне сканування. У межах цих методів розрізняють пасивний і активний підходи. За пасивного підходу обличчя пацієнта сканується за допомогою двох або більше фотографій (фотограмметрія та стереофотограмметрія), за активного — використовують тривимірні сенсори, які реєструють світлові патерни шляхом активної тріангуляції (лазерний промінь і структуроване світло).

Фотограмметрія — технологія, початково розроблена для використання в топографічному картографуванні, отримує інформацію з множинних фотографій, які потім об'єднуються у тривимірне зображення. У стереофотограмметрії тривимірний об'єкт створюється аналогічно шляхом фотографування з двох різних площин (рис. 1). Цей метод дає змогу розраховувати відстані, площі поверхні та об'єму [6]. Стереофотограмметрія має обмеження щодо точної реєстрації волосся, а також блискучих ділянок шкіри, що є особливо важливим у щелепно-лицевому протезуванні.

Метод ґрунтується на отриманні множинних фотографій, тому чутливий до умов освітлення і потребує спеціального програмного забезпечення, відкаліброваного для формування сканів. Якісне освітлення є необхідною умовою, оскільки недостатній рівень світла або надмірне фонове освітлення можуть спотворити зафіксовані зображення. Після завершення сканування комп'ютерний

**Лицьові сканери та програмне забезпечення
(дані щодо характеристик отримані з офіційного вебсайту виробника)**

Тип сканування	Тип і назва сканера	Сфера застосування	Основні характеристики
Фотограмметрія / стереофотограмметрія	3dMD Face System (3dMD, Атланта, США)	Медицина, стоматологія	<ul style="list-style-type: none"> • 3D-запис мімічних рухів, усмішки та мовлення; • автоматичне зіставлення даних; • точні антропометричні вимірювання; • ручна реєстрація не потрібна
Фотограмметрія / стереофотограмметрія	iPhone X + Bellus3D Face App (Apple / Bellus3D, США)	Ідентифікація Face ID, розпізнавання обличчя	<ul style="list-style-type: none"> • Технологія TrueDepth: проєкція > 30 000 інфрачервоних точок; • створення математичної 3D-моделі обличчя
Фотограмметрія / стереофотограмметрія	Di4D (Dimensional Imaging, Глазго, Шотландія)	Кіноіндустрія, відеоігри	<ul style="list-style-type: none"> • Високощільні 3D-скани обличчя; • точна передача рухів і міміки
Фотограмметрія / стереофотограмметрія	Planmeca ProMax 3D Mid (Planmeca, США)	Стоматологія, оториноларингологія	<ul style="list-style-type: none"> • КПКТ, ортодонтичне та CAD/CAM-планування; • щелепно-лицева хірургія; • автоматичне створення моделі обличчя
Фотограмметрія / стереофотограмметрія	FaceHunter (Zirkonzahn, Італія)	Стоматологія, зубна техніка	<ul style="list-style-type: none"> • Покращує комунікацію між пацієнтом, лікарем і техніком; • інтеграція в цифровий робочий процес
Фотограмметрія / стереофотограмметрія	FaceScan System (Iversion, Німеччина)	Стоматологія	<ul style="list-style-type: none"> • Модульна система; • створення та об'єднання трьох 3D-зображень обличчя в одну модель
Структуроване світло	EinScan Pro (Shining 3D, Китай)	Інженерія, дизайн, ортодонтія	<ul style="list-style-type: none"> • Інфрачервоне світло; • комфорт для пацієнта; • зменшення втоми очей
Структуроване світло	EinScan Pro 2X Plus (Shining 3D, Китай)	Загальне 3D-сканування	<ul style="list-style-type: none"> • Багаторегіональне сканування; • ручне та автоматичне вирівнювання; • не рекомендований для рухомих об'єктів
Структуроване світло	Priti Mirror Scanner + Priti Image (Iversion, Німеччина)	Цифровий дизайн усмішки	<ul style="list-style-type: none"> • Захоплення текстур і геометрії обличчя; • відкрите ПЗ; • сумісність з Exocad та 3Shape
Лазерне сканування	ATOS Compact Scan 5M (GOM mbH, Брауншвейг, Німеччина)	Зворотне проєктування та контроль геометричних розмірів	<ul style="list-style-type: none"> • Високоточна оптична вимірювальна система; • наявність зонда для оцифрування глибоких порожнин і зон, недоступних для прямого оптичного сканування
Лазерне сканування	ObiScanner (ObiScanner, Мілан, Італія)	Стоматологія	<ul style="list-style-type: none"> • Час сканування — ~15 с для створення 3D-моделі; • не потребує спеціального навчання; • відкрите програмне забезпечення, сумісне з CAD-системами

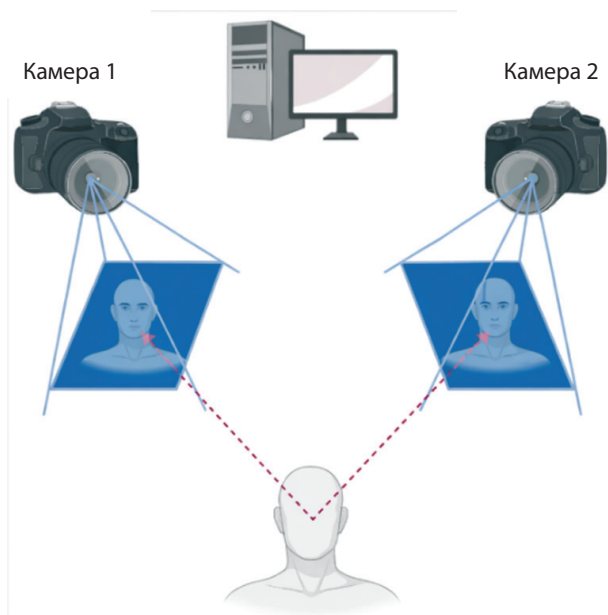


Рис. 1. Фотограмметрія та стереофотограмметрія потребують спеціально відведеного простору для об'єкта дослідження, використання кількох камер, розміщених навколо нього з різних ракурсів, а також комп'ютера для обробки отриманих зображень [7]

алгоритм об'єднує множинні фотографії з метою формування тривимірної моделі обличчя.

Сканер зі структурованим світлом використовує тригонометричну триангуляцію для реєстрування світлових патернів і отримання тривимірної форми поверхні обличчя пацієнта. Цей механізм потребує наявності проектора, що проектує світловий шаблон на об'єкт, а також відкаліброваної камери, що фіксує відображену проєкцію (рис. 2) [8–10]. Залежно від виробника проектор і камера можуть бути інтегровані в один пристрій. Найпоширенішими є сканери,

що працюють із синім або білим світлом. Однак сканери з білим світлом поступово виходять з ужитку, оскільки синє світло, яке має коротшу довжину хвилі й, відповідно, меншу здатність до відбиття, забезпечує вищу точність сканування. Світлові сигнали реєструються з різних ракурсів, після чого на основі зміщення світлового патерна обчислюється тривимірна сітчаста модель поверхні. Перевагами технології структурованого світла є висока швидкість, точність і відтворюваність результатів. Водночас цей метод сканування чутливий до умов освітлення, адже додаткове фонове освітлення може призводити до спотворення результатів сканування.

Лазерне сканування використовує технологію, подібну до сканування зі структурованим світлом, шляхом реєстрування відбиття лазерного променя від поверхні об'єкта сканування. Камера фіксує геометрію спроектованого лазерного променя, що дає змогу обчислити відстань і форму поверхні у тривимірному просторі [6, 9]. Для отримання повноцінного тривимірного лицьового скану лазерний сканер виконує кілька послідовних сканувань із поворотом об'єкта дослідження у різних положеннях (рис. 3). Отримані скани фіксуються камерою та об'єднуються в єдине зображення за допомогою комп'ютерного алгоритму. Залежно від виробника лазер і камера можуть бути розміщені в одному пристрої. Лазерне сканування характеризується високою точністю, однак на її рівень можуть впливати додаткові джерела освітлення. Як порівняти зі скануванням зі структурованим світлом, лазерне сканування повільніше [10].

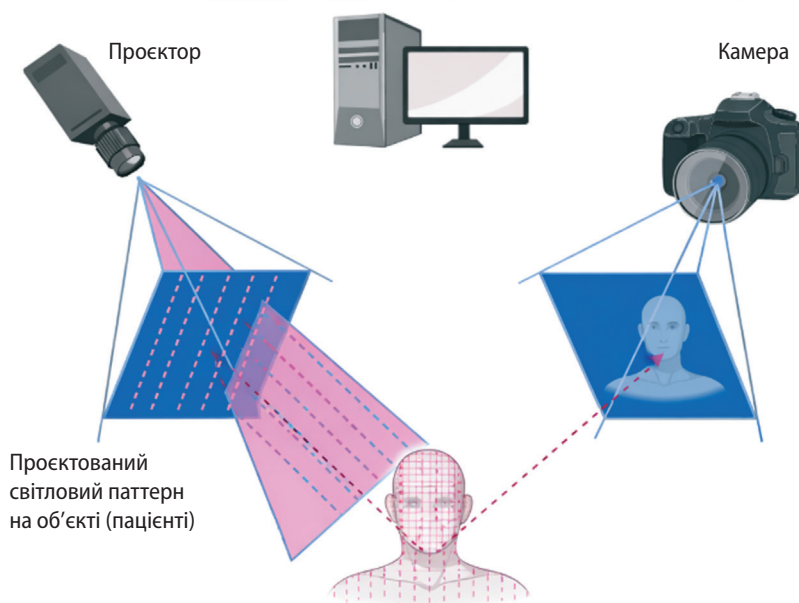


Рис. 2. Принцип роботи сканера зі структурованим світлом

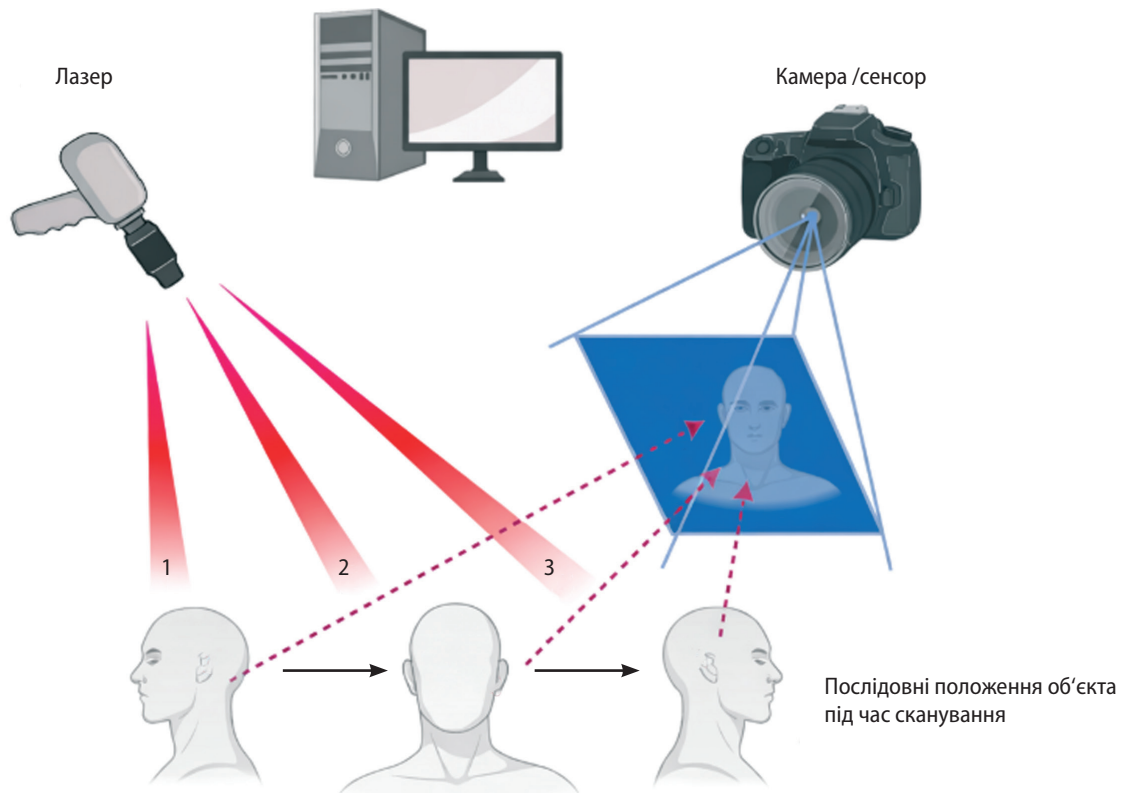


Рис. 3. Принцип роботи лазерного сканера

Точність лицевих сканерів

Точність лицевого сканування доведена як клінічно прийнятна для використання в стоматологічній практиці. Її оцінюють порівнянням отриманого скану з контрольної моделлю та вимірюванням відхилень між ними. Сканери, для яких величина відхилень становить менше 2 мм, вважають прийнятними для клінічного застосування [11]. Значення відхилень для лицевих сканерів коливаються від 140 до 1330 мкм. Заявлена точність більшості лицевих сканерів становить приблизно 500 мкм, що відповідає межах клінічної прийнятності. Водночас на точність сканування можуть впливати такі чинники, як застосована технологія сканера, форма об'єкта, а також глибина та швидкість сканування. Zhao та співавт. визначили й порівняли точність різних технологій сканування, зокрема стереофотограмметрії, білих (структурованих) світлових сканерів, магнітно-резонансної томографії та інфрачервоних сканерів [12]. Встановлено, що стереофотограмметрія забезпечує вищу точність порівняно з магнітно-резонансною томографією (МРТ) та інфрачервоним (ІЧ) скануванням. Між стереофотограмметрією та структурованим світловим скануванням статистично значущої різниці у точності не виявлено. Обидві технології — стереофотограмметрія та структуроване світлове сканування — визнані придатними для клінічного використання з точністю $0,58 \pm 0,11$ і $0,57 \pm 0,07$ мм відповідно. Середнє відхилення для

лицевого скану, отриманого методом стереофотограмметрії, становить $0,15 \pm 0,02$ мм [13]. В іншому дослідженні, у якому порівнювали точність МРТ зі стереофотограмметрією та структурованим світловим 3D-скануванням, частка точок даних, що перебували в межах відхилення до 2 мм, становила 86, 94 і 90 % відповідно [14].

Форма об'єкта впливає на точність лицевого сканування. Дослідження показали, що увігнуті поверхні, зокрема нижня третина обличчя, характеризуються меншою точністю проти плоских та опуклих поверхонь верхньої частини обличчя [12]. Ділянки з піднутреннями, такі як лабіофціальна борозна, кути рота та ротова щілина, вирізняються підвищеною складністю сканування та зниженням точності. Найвищу точність і найкращі показники комплексної достовірності сканування зафіксовано у середній третині обличчя, як порівняти з верхньою та нижньою його частинами. До анатомічних орієнтирів, які найскладніше точно зафіксувати, належали зуби, зовнішній слуховий хід та ніздрі [10].

На точність сканування впливають також глибина та швидкість сканування. Дослідження показало, що сканер зі структурованим світлом EinScan Pro 2X Plus (Shining 3D Tech. Co., Ltd., Ханчжоу, Китай) демонстрував найкращі показники точності на глибинах до 2 мм проти EinScan Pro (Shining 3D Tech. Co., Ltd., Ханчжоу, Китай), Planmeca ProMax 3D Mid (Planmeca USA, Inc., Гоффман-Естейтс, Іллінойс, США) та iPhone X (Apple Store, Купертіно, Каліфор-

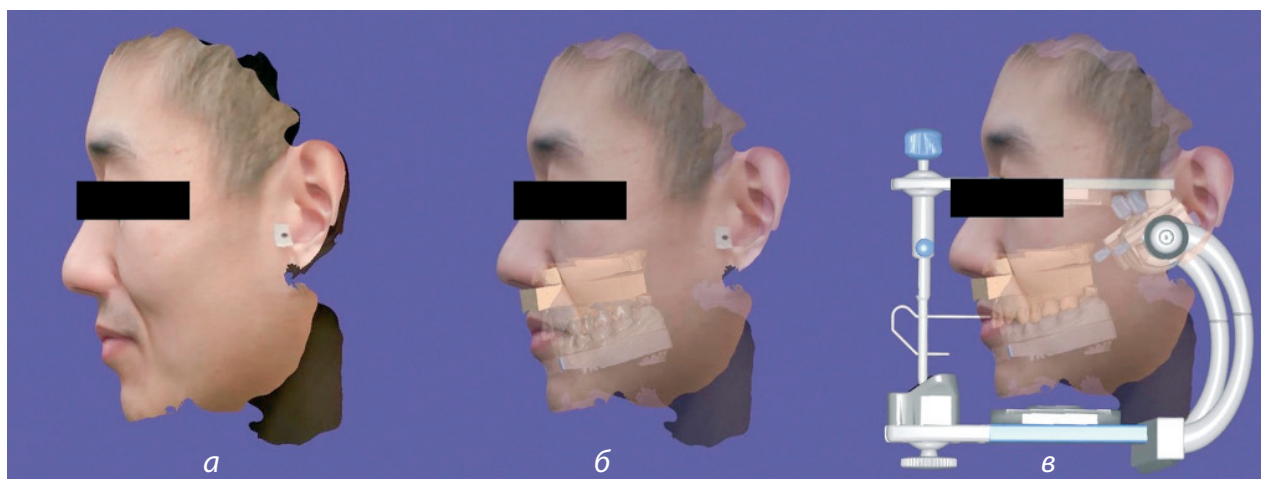


Рис. 4. Етапи створення віртуального пацієнта: а — лицьовий скан; б — лицьовий скан, поєднаний із внутрішньоротовим сканом; в — лицьовий і внутрішньоротовий скани, змонтовані у віртуальному артикуляторі

нія, США) [10]. Вимірювання ділянок із глибиною понад 2 мм характеризувалися нижчою точністю. Зниження точності може бути пов'язане з недостатнім проникненням світла у глибокі ділянки під час сканування.

Виявлено, що за меншої відстані між сканером і об'єктом точність сканування підвищується. Водночас зі збільшенням довжини сканування точність отриманих даних зменшувалася. Оптимальна довжина сканування варіює залежно від типу сканера, найбільшу допустиму довжину — 150 мм — зафіксовано для EinScan Pro 2X Plus (Shining 3D Tech. Co., Ltd., Ханчжоу, Китай). Зменшення діапазону сканування та, за можливості, мінімізування поверхневих нерівностей дають змогу підтримувати належний рівень точності. Крім того, враховується вплив швидкості сканування кожного сканера на точність результатів. Сканери з вищою швидкістю сканування, зокрема iPhone X (Apple Store, Купертіно, Каліфорнія, США) із часом сканування 0,57 хв та Planmeca ProMax 3D Mid (Planmeca USA, Inc., Гоффман-Естейтс, Іллінойс, США) із часом 0,7 хв, демонстрували нижчу точність, як порівняти зі сканерами з тривалішим часом сканування — EinScan Pro (Shining 3D Tech. Co., Ltd., Ханчжоу, Китай) із часом 6,7 хв та EinScan Pro 2X Plus (Shining 3D Tech. Co., Ltd., Ханчжоу, Китай) із часом 9,4 хв. Висока швидкість сканування може бути досягнута за рахунок зниження точності та роздільної здатності отриманих даних.

Застосування лицьових сканерів у стоматології. Діагностичні записи та віртуальний пацієнт

Для формування прогнозованих планів лікування та успішного проведення стоматологічного лікування необхідний детальний збір інформації про пацієнта, включно з анамнезом і клінічними записами. Лицьові сканери мають потенціал для

цифровізації та заміни традиційних позаротових записів, аналогових лицьових дуг, оклюзійного аналізу та діагностичних воскових моделювань. Розглянемо прогрес у отриманні записів лицьової дуги, відстеженні рухів нижньої щелепи та віртуальному дизайні усмішки, які в сукупності можуть бути використані для створення віртуального пацієнта. Інформація, отримана з використанням концепції віртуального пацієнта, дає змогу лікарю виконувати цифрове планування лікування за різними напрямками стоматології, зокрема у протезній та імплантологічній реабілітації, дизайні усмішки, ортогнатичній хірургії та щелепно-лицевому протезуванні. Така система забезпечує обмін даними, що полегшує цифрову комунікацію між лікарями, пацієнтами та зуботехнічними лабораторіями з метою досягнення прогнозованішого кінцевого результату лікування [10, 12, 14].

Рутинна цифрова рентгенографія та фотографія забезпечують стандартну діагностичну інформацію, яка є критично важливою для встановлення точного діагнозу та розроблення плану лікування. З появою лицьових сканерів стало можливим отримання додаткових даних щодо позаротових м'яких тканин і структур обличчя, які можуть бути інтегровані та накладені один на одного для формування тривимірної віртуальної моделі пацієнта. Віртуальний пацієнт створюється поєднанням цифрових діагностичних записів, таких як лицьове сканування, віртуальна лицьова дуга, внутрішньоротове сканування та КПКТ, із використанням аналізу best fit, за якого певні анатомічні орієнтири ідентифікуються в різних наборах сканів і накладаються для вирівнювання файлів даних (рис. 4) [15].

Однак кожна діагностична методика функціонує у власній операційній системі. Наприклад, зображення КПКТ зберігаються у форматі Digital

Imaging and Communications in Medicine (DICOM), лицьові скани — у форматі об'єктних файлів (OBJ), внутрішньоротові скани зазвичай представлені у форматі стереолітографії (STL). Поєднання цих різномірних масивів інформації може бути технічно складним.

Огляд літератури, проведений Mangano та співавт., охопив 25 досліджень, у яких проаналізовано суміщення даних КПКТ, лицьового сканування, внутрішньоротового сканування та настільного сканування [16]. У дев'яти дослідженнях поєднували дані КПКТ і внутрішньоротового сканування, ще у дев'яти — дані КПКТ і лицьового сканування, чотири дослідження були присвячені лицьовим і внутрішньоротовим сканерам, три дослідження об'єднували всі три джерела даних (КПКТ, лицьовий сканер і внутрішньоротовий сканер). Дані порівнювали за відповідними орієнтирами, поверхнями і вокселями. Створення віртуального зубощелепного пацієнта за статичних умов можливе, однак процедура об'єднання всіх даних в єдину сутність є складною, і на сьогодні не існує одного пристрою, здатного інтегрувати різні вихідні файли.

Інший підхід до поєднання сканувальних даних запропонували Ayoub та співавт. Вони застосували метод накладання лицьового скану, отриманого методом стереофотограмметрії, на КТ-зображення підлеглої кісткової структури пацієнта шляхом перетворення обох наборів даних у формат мови моделювання віртуальної реальності (Virtual Reality Modeling Language, VRML) [17]. Для полегшення суміщення на обох поверхнях обрали десять анатомічних орієнтирів, зокрема, правий і лівий внутрішні кути очей, правий і лівий зовнішні кути очей, ніс, праві й ліві крила носа, правий і лівий хейліони, а також проназале. У дослідженні обчислено похибки реєстрації в межах $\pm 1,5$ мм між суміщеними поверхнями.

Joda та Gallucci описали метод суміщення файлів форматів DICOM, OBJ і STL з використанням спільного анатомічного орієнтира, що є в усіх трьох наборах даних [15]. У стоматології наявний зубний ряд пацієнта є поширеним орієнтиром, який застосовують для накладання трьох файлів з метою створення тривимірного віртуального пацієнта за статичних умов. Такий підхід дає змогу моделювати план лікування, керувати очікуваннями пацієнта, полегшувати ефективну комунікацію з пацієнтами та колегами, а також здійснювати неінвазивне отримання клінічної документації. Водночас залишається актуальною проблема відсутності єдиного програмного застосунку, здатного працювати з трьома типами файлів одночасно. Joda та Gallucci також запропо-

нували розроблення комерційно доступної системи, здатної інтегрувати рухи обличчя пацієнта та поєднувати їх із файлами форматів DICOM, STL і OBJ для створення чотириствірного (4D) віртуального пацієнта [8, 11, 13].

Розроблення 4D-віртуального пацієнта потребує інтеграції даних віртуальної артикуляції. Віртуальні лицьові дуги використовують для орієнтування цифрових моделей у віртуальному просторі відносно референтної площини, після чого моделі артикують одна з одною. У літературі описано різні методи перенесення даних віртуальної лицьової дуги, зокрема, лицьове сканування з використанням референтних точок, фотографування та стереофотограмметрію. Віртуальні лицьові дуги та артикулятори мають переваги, оскільки дають змогу уникнути типових проблем, пов'язаних із традиційними ручними методами артикуляції, таких як деформація матеріалів, помилки орієнтування та позиціонування, а також труднощі моделювання даних пацієнта у тривимірному просторі [18]. Усунення цих проблем може підвищити ефективність лікування та зменшити кількість ускладнень на етапі передачі протезної конструкції пацієнтові.

Lam та співавт. описали методіку монтажу відсканованих даних у віртуальному артикуляторі шляхом реєстрації горизонтальної площини пацієнта у природному положенні голови [19]. Тривимірний лицьовий скан пацієнта отримували саме в цьому положенні та орієнтували за допомогою референтної дошки з формуванням осей X, Y і Z. Зуби сканували внутрішньоротовим сканером у положенні максимальної інтеркуспідації (True Definition Scanner, 3M ESPE, Сент-Пол, Мінесота, США). Додатково виконували 3D-лицьове сканування з використанням лицьової дуги для реєстрації положення верхньої щелепи. Маркери на передавальному пристрої використовували як орієнтири для вирівнювання зовнішньої поверхні обличчя відносно верхньої щелепи, що забезпечувало коректне позиціонування зубної дуги відносно обличчя.

За допомогою програмного забезпечення CAD/CAM (Exocad GmbH, Дармштадт, Німеччина) модель віртуального пацієнта орієнтували у віртуальному артикуляторі. Після калібрування горизонтальну площину реєстрували у віртуальній моделі та вирівнювали відносно поперечної горизонтальної осі артикулятора. Відхилення за запропонованою методикою становили менше 1° та 1 мм під час п'яти повторних вимірювань у того самого пацієнта. Метод продемонстрував високу відтворюваність і є гідною альтернативою КПКТ для реєстрації положення верхньої щелепи, що

дає змогу уникнути променевого навантаження. Оцифрований лицьовий скан також забезпечує велику кількість референтних точок, особливо у беззубих пацієнтів або в клінічних ситуаціях з обмеженою кількістю орієнтирів, коли техніки змушені покладатися на аналогові дані, надані лікарем. Зубний техник може наносити лінії та площини на «цифровий череп» для коректного визначення франкфуртської горизонталі, лінії Кампера, індивідуальної горизонтальної лінії пацієнта та інших орієнтирів, що використовуються як референси оклюзійної площини [20].

У серії досліджень Solaberrieta та співавт. запропоновано різні методи встановлення взаємовідношення моделей за допомогою віртуальної артикуляції [21]. У 2015 р. вони застосували позаротовий світловий сканер (ATOS Compact Scan 5M; GOM mbH, Брауншвейг, Німеччина) для визначення шести референтних точок, розташованих на голові та щелепах, за допомогою спеціального пристрою, який пацієнт носив на голові. Точки 1–3 відповідали горизонтальній площині, точки 4–6 — оклюзійній площині пацієнта. Отримані дані безпосередньо переносили у віртуальний артикулятор за допомогою програмного забезпечення зворотного проектування (Geomagic Design X; 3D Systems, Літлтон, Колорадо, США). Положення верхньої щелепи порівнювали з результатами, отриманими з використанням традиційного пантографа. Хоча перевагою запропонованої методики була відсутність потреби у фізичному артикуляторі чи лицьовій дузі, значення відхилень свідчили про необхідність її вдосконалення перед застосуванням в ортогнатичному або реставраційному лікуванні [15, 17, 20, 22].

Інша методика, представлена Solaberrieta та співавт., передбачала використання внутрішньоротового сканера, цифрової камери та програмного забезпечення зворотного проектування для віртуального розміщення моделей у віртуальному артикуляторі [22]. Внутрішньоротове сканування дало змогу створити цифрові моделі верхньої та нижньої щелеп. Адгезивні маркери фіксували безпосередньо на обличчі пацієнта: два поблизу обох скронево-нижньощелепних суглобів і третій — в інфраорбітальній ділянці. У порожнину рота встановлювали вилку лицьової дуги з еластомерним відбитком. Виконували фотозйомку обличчя для отримання тривимірного зображення голови з маркерами, пов'язаними з лицьовою дугою. Відбиток і вилку лицьової дуги сканували. За допомогою програмного забезпечення зворотного проектування вилку лицьової дуги суміщали з фіксатором верхньої щелепи. Такий метод давав змогу визначити кінцеву поперечну вісь обертан-

ня за рахунок використання задніх орієнтирів поблизу скронево-нижньощелепних суглобів.

Inoue та співавт. порівняли новий метод монтажу віртуальних моделей із використанням орієнтирів лицьового сканування з методами, що ґрунтувалися на середньостатистичних значеннях і традиційній лицьовій дузі [23]. Точки Бергстрьома та орбітале наносили на обличчя пацієнта перед виконанням лицьового сканування. Далі лицьові скани об'єднували з внутрішньоротовими з використанням прицільної вилки прикусу (SNAP; Degrees of Freedom Inc., Марлборо, Вермонт, США), а попередньо нанесені лицьові орієнтири застосовували для вирівнювання файлу у віртуальному артикуляторі. Автори порівняли позиційні відмінності між віртуально змонтованими моделями в різних групах і не виявили статистично значущої різниці в точності монтажу між групами лицьового сканування і традиційної лицьової дуги. Водночас статистично значущу різницю встановили між моделями, змонтованими з використанням середніх значень, та моделями, змонтованими за допомогою лицьової дуги. Автори дійшли висновку, що віртуальний монтаж моделей із використанням орієнтирів, отриманих під час лицьового сканування, може бути точнішою альтернативою для віртуальної артикуляції порівняно із застосуванням середньостатистичних значень [17, 19, 21].

Точне діагностичне відтворення рухів нижньої щелепи пацієнта є надзвичайно важливим для виготовлення протезних конструкцій без оклюзійних інтерференцій. Одним із ключових чинників у запобіганні інтерференціям під час віртуальної артикуляції є прецизійна реєстрація сагітального виросткового нахилу (sagittal condylar inclination, SCI). Hong та Noh застосували метод Крістенсена для вимірювання SCI із використанням протрузійного прикусного реєстратора, поєднуючи лицьове та внутрішньоротове сканування [24]. Індивідуальний прикусний реєстраційний пристрій був надрукований на 3D-принтері та оснащений круглими маркерами для фіксування прикусу, додаткові маркери розміщувалися в інфраорбітальній ділянці, правій і лівій точках Бейрона для визначення осі обертання. Лицьовий скан виконували за допомогою мобільного телефону з використанням спеціалізованого застосунку. Внутрішньоротове сканування проводили в положенні максимальної інтеркуспідації та в протрузійному міжоклюзійному положенні. Отримані скани суміщали з використанням програмного забезпечення для 3D-аналізу зображень (Geomagic Control X; 3D Systems, Люксембург), після чого визначали франкфуртську горизонтальну та

серединно-сагітальну площини. Кут між лінією, спроектованою на серединно-сагітальну площину, та франкфуртською горизонтальною площиною вимірювали для отримання значення SCI. Застосування цієї методики дає можливість інтегрувати індивідуальний SCI у віртуальний артикулятор, що забезпечує персоналізоване моделювання оклюзійних поверхонь спроектованої протезної конструкції з метою запобігання інтерференціям [20, 22].

Лицьові сканери також можуть бути використані для реєстрування рухів нижньої щелепи. У дослідженні, присвяченому оцінюванню оклюзійної динаміки із застосуванням лицьового сканера зі структурованим світлом, на поверхню нижньощелепних різців накладали нерелективні мішені задля цифрового реєстрування рухів нижньої щелепи та скронево-нижньощелепних суглобів шляхом поєднання даних руху з КПКТ пацієнта. Запропоновану методику рекомендовано для використання під час виготовлення стоматологічних протезів або діагностики захворювань скронево-нижньощелепного суглоба [25]. В іншому цифровому підході до реєстрування рухів нижньої щелепи рухи сканованих моделей у режимі реального часу відтворювали шляхом трансформації даних відстеження мішеней, розташованих на чотирьох різцях верхньої та нижньої щелеп. Подальший розвиток технологій віртуального реєстрування рухів нижньої щелепи відкриває можливість цифрового контролю оклюзійних контактів під час ексцентричних рухів і моделювання суглобового ведення [26–30].

Дизайн усмішки

У минулому усмішку моделювали у двовимірному форматі шляхом фізичного вирізання та анування друкованих фотографій з метою імітації бажаного кінцевого результату лікування. Згодом 2D-плани трансформували у тривимірну модель з використанням адитивного воскового моделювання, яке переносили до ротової порожнини пацієнта за допомогою фізичного мокапу [31]. Основним недоліком такого багатоступеневого аналогового процесу є високий ризик накопичення похибок і спотворень на кожному етапі робочого процесу [32–35].

Із розвитком цифрових технологій і фотокамер були створені протоколи та системи цифрового дизайну усмішки, які використовують у поєднанні з програмами Keynote, PowerPoint або спеціалізованим програмним забезпеченням для оптимізації процесу проектування та підвищення прогнозованості кінцевих результатів лікування. У цифрових робочих процесах із застосуванням

лицьових сканерів риси обличчя пацієнта фіксують у цифровому форматі, а перетворення, які раніше виконували вручну, здійснюють віртуально, що дає змогу усунути джерела похибок [31, 33, 36–38].

Використання лицьового сканування для створення тривимірної віртуальної моделі пацієнта також сприяє швидшій та ефективнішій комунікації в межах міждисциплінарної команди та власне пацієнтом. Ефективна взаємодія між пацієнтом, клініцистом і зуботехніком є критично важливою в питаннях естетики, оскільки естетичні параметри мають суб'єктивний характер і залежать від багатьох чинників [39, 40]. Віртуальна модель пацієнта дає лікарю та пацієнту можливість спільно персоналізувати план лікування у цифровому середовищі. Тривимірний віртуальний дизайн усмішки також є цінним, неінвазивним, швидким і економічно доступним інструментом мотивування пацієнтів до прийняття лікування. Моделювання майбутніх результатів дає пацієнтові змогу наочно оцінити, як запланована стоматологічна реабілітація може вплинути на його естетичний вигляд [30, 38, 40].

Майбутні напрями застосування

На сьогодні в науковій літературі опубліковано обмежену кількість досліджень, присвячених поєднанню технологій штучного інтелекту (ШІ) та машинного навчання (МН) з лицьовими сканерами [41, 42]. Хоча використання ШІ в ортогнатичному лікуванні не є новим, подальший розвиток цих технологій нині обмежується невеликим обсягом вибірок, відсутністю усталених математичних моделей і недостатньо оптимізованими методами обробки даних [42]. Водночас існують чітко окреслені напрями, у яких поєднання переваг ШІ та лицьового сканування в майбутньому може значно розширити клінічні можливості та оптимізувати кінцеві етапи лікування.

Так, команда Jiang розробила новий метод формування зубної дуги, метою якого було замінити або доповнити аналогові підходи до її визначення, особливо під час постановки зубів у повних знімних протезах та згинання ортодонтичних дуг [43]. Координати «робота для розміщення зубів» були налаштовані у такий спосіб, щоб відповідати індивідуальним характеристикам зубної дуги будь-якого пацієнта. Зубна дуга є одним із компонентів оклюзійної площини, однак для створення ідеальної протезної конструкції необхідно враховувати й інші орієнтири, зокрема, естетичні та функціональні параметри, а також лицьові референтні лінії, такі як індивідуальна горизонтальна площина пацієнта,

площина Кампера та міжзінична лінія. Інтеграція ML-робота для розміщення зубів, розробленого Jiang, із віртуальним артикулятором та даними лицьового сканування потенційно може в майбутньому забезпечити автоматизовану постановку штучних зубів у двобічно збалансованій оклюзії. Особливо значний внесок ШІ зроблено в цифровізацію щелепно-лицьової хірургії, імплантологічного лікування [42–44], а також розвиток робот-асистованих хірургічних втручань у разі пухлин голови та шиї [44]. Наприклад, робот Yomi (Neocis Inc., Маямі, Флорида, США) здатен виконувати остеотомію та встановлювати імпланти відповідно до плану, створеного на основі комп'ютерної томографії [43]. Аналогічно, система RoboDent (RoboDent GmbH, Ісманінг, Німеччина) здійснила повністю автономну установку двох імплантатів у людини [44].

Висновок

Під час протетично орієнтованого планування та встановлення імплантатів застосування лицьового сканування є особливо доцільним, зокрема у разі масштабних реабілітацій у межах повної реконструкції зубних рядів, коли орієнтири оклюзійної площини обмежені. Створення віртуального пацієнта в таких клінічних ситуаціях забезпечує достатню кількість лицьових анатомічних орієнтирів для планування кінцевої протезної конструкції. У галузі щелепно-лицьової хірургії ортогнатичні втручання вже виконували на фантомній моделі черепа з використанням шестикоординатної роботизованої руки, керованої ШІ, для асистування хірургу під час операції на основі передопераційного планування за даними тривимірної комп'ютерної томографії [44]. Інтеграція лицьового сканування в такі протоколи має потенціал для прогнозування змін м'яких

тканин обличчя, що може значно покращити як хірургічне планування, так і комунікацію плану лікування з пацієнтом.

Висвітлено історію розвитку, принципи роботи та напрями застосування тривимірних лицьових сканерів, а також представлено сучасні докази їх використання в стоматологічній галузі [45]. Незважаючи на наявні обмеження, пов'язані з якістю сканування та особливостями роботи програмного забезпечення, 3D-лицьові сканери є швидкими та неінвазивними інструментами, які сприяють досягненню точних і високоестетичних результатів лікування. Лицьові скани мають широкий спектр діагностичних застосувань, зокрема для міждисциплінарної комунікації, віртуальної артикуляції, цифрового дизайну усмішки. У перспективі технологія лицьового сканування демонструє значний потенціал у галузях краніо-фаціальних досліджень, протезної діагностики, планування лікування та визначення його послідовності. Загалом за умови подальшого технологічного розвитку, удосконалення алгоритмів машинного навчання та впровадження економічно ефективних рішень високопродуктивні лицьові сканери, ймовірно, відіграватимуть дедалі важливішу роль у стоматологічній практиці.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

Згода на публікацію

Автори ознайомлені з результатами і схвалили остаточний варіант рукопису.

Використання штучного інтелекту

Автори стверджують, що під час написання статті штучний інтелект не використовувався.

ПОСИЛАННЯ / REFERENCES

1. Gorurgoz, C., Icen, M., Kurt, M., et al. (2023). Degenerative changes of the mandibular condyle in relation to the temporomandibular joint space, gender and age: A multicenter CBCT study. *Dent. Med. Probl.*, 60(1), DOI: <https://doi.org/10.17219/dmp/147514>.
2. Lombardo, G., Signoriello, A., Marincola, M., et al. (2023). Five-year follow-up of 8- and 6-mm locking-taper implants treated with a reconstructive surgical protocol for peri-implantitis: A retrospective evaluation. *Prosthesis*, 5(4), 1322–1342. DOI: <https://doi.org/10.3390/prosthesis5040091>.
3. Mangano, F., Veronesi, G., Hauschild, U., Mijiritsky, E., & Mangano, C. (2020). Trueness and precision of four intraoral scanners in oral implantology: A comparative in vitro study. *PLoS One*, 15(9), e0238581. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0238581>.
4. Kwon, J. H., Kim, Y. K., Lee, H., & Kim, S. G. (2022). Accuracy of computer-assisted surgery in implant placement using the CAD/CAM system: A randomized controlled clinical study. *Clin. Oral Implants Res.*, 33(5), 476–484. DOI: <https://doi.org/10.1111/clr.13874>.

5. Piedra-Cascón, W., Meyer, M. J., Methani, M. M., & Revilla-León, M. (2020). Accuracy (trueness and precision) of a dual-structured light facial scanner and interexaminer reliability. *J. Prosthet. Dent.*, 124, 567–574. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2019.10.010>.
6. Cin, V., İzgi, A. D., Kale, E., & Yılmaz, B. (2023). Marginal and internal fit of monolithic zirconia crowns fabricated using two different CAD/CAM workflows: An in vitro study. *Prosthesis*, 5(1), 35–47. DOI: <https://doi.org/10.3390/prosthesis5010003>.
7. Almalki, A., Conejo, J., Kutkut, N., et al. (2024). Evaluation of the accuracy of direct intraoral scanner impressions for digital post and core in various post lengths: An in vitro study. *J. Esthet. Restor. Dent.*, 36(4), 673–679. DOI: <https://doi.org/10.1111/jerd.13159>.
8. Gehrke, P., Rashidpour, M., Sader, R., & Ozcan, M. (2024). A systematic review of factors impacting intraoral scanning accuracy in implant dentistry with emphasis on scan bodies. *Int. J. Implant Dent.*, 10, 20. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40729-024-00543-0>.
9. Hao, J., Liu, J., Li, J., et al. (2022). AI-enabled automatic multimodal fusion of cone-beam CT and intraoral scans for intelligent 3D tooth-bone reconstruction and clinical applications. *arXiv*. DOI: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1472915/v1>.
10. Amornvit, P., & Sanohkan, S. (2019). The accuracy of digital face scans obtained from 3D scanners: An in vitro study. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 16, 5061. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph16245061>.
11. Bohner, L., Gamba, D.D., Hanisch, M., et al. (2019). Accuracy of digital technologies for the scanning of facial, skeletal, and intraoral tissues: A systematic review. *J. Prosthet. Dent.*, 121, 246–251. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2018.01.015>.
12. Sivari, E., Senirkentli, G.B., Bostanci, E., et al. (2023). Deep learning in diagnosis of dental anomalies and diseases: A systematic review. *Diagnostics (Basel)*, 13(15), 2512. DOI: <https://doi.org/10.3390/diagnostics13152512>.
13. Folly, P. (2021). Imaging techniques in dental radiology: Acquisition, anatomic analysis and interpretation of radiographic images. *BDJ Stud.*, 28, 11. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41406-021-0258-7>.
14. Krymovskyy, K., Mileschenko, A., & Brychko, T. (2024). Is it possible to completely replace traditional cephalometric analyses with 3D cephalometrics based on artificial intelligence shortly? *Arch. Ophthalmol. Maxillofac. Surg. Ukr.*, 1(1), 43–53. DOI: <https://doi.org/10.22141/aomfs.1.1.2024.9>.
15. Unsal, G. S., Turkyilmaz, I., & Lakhia, S. (2020). Advantages and limitations of implant surgery with CAD/CAM surgical guides: A literature review. *J. Clin. Exp. Dent.*, 12(4), e409–e417. DOI: <https://doi.org/10.4317/jced.55871>.
16. Alauddin, M. S., Baharuddin, A. S., & Mohd Ghazali, M. I. (2021). The modern and digital transformation of oral health care: A mini review. *Healthcare (Basel)*, 9(2), 118. DOI: <https://doi.org/10.3390/healthcare9020118>.
17. Abdelaziz, M. S., & Elshikh, E. M. (2024). Digital design of a hybrid bone- and tooth-supported surgical guide in patients with unilateral few remaining natural teeth: A dental technique. *BMC Res. Notes.*, 17(1), 80. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13104-024-06738-3>.
18. Lepidi, L., Galli, M., Mastrangelo, F., et al. (2021). Virtual articulators and virtual mounting procedures: Where do we stand? *J. Prosthodont.*, 30, 24–35. DOI: <https://doi.org/10.1111/jopr.13240>.
19. Otake, R., Kanazawa, M., Iwaki, M., et al. (2024). Patient-reported outcome and cost-effectiveness analysis of milled and conventionally fabricated complete dentures. *J. Prosthet. Dent.*, 131(2), 227–232. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2021.12.024>.
20. Schweiger, J. (2018). 3D facial scanning. *Dental Dialogue*. URL: <https://www.zirkonzahn.com/assets/files/publications/EN-Dental-Dialogue-2018-12-web.pdf>.
21. Revilla-León, M., Kois, D. E., & Kois, J. C. (2023). A guide for maximizing the accuracy of intraoral digital scans: Part 2 — Patient factors. *J. Esthet. Restor. Dent.*, 35(1), 241–249. DOI: <https://doi.org/10.1111/jerd.12993>.
22. Topsakal, K. G., Gökmen, Ş., Misir, S. E., Duran, G. S., & Görgülü, S. (2023). Evaluation of the usage prevalence and knowledge levels of dentists about oral scanners and 3D printers. *Saglik Bilim Derg.*, 32(2), 156–163. DOI: <https://doi.org/10.34108/eujhs.1142208>.
23. Inoue, N., Scialabba, R., Lee, J. D., & Lee, S. J. (2024). A comparison of virtually mounted dental casts from traditional facebow records, average values, and 3D facial scans. *J. Prosthet. Dent.*, 131(1), 136–143. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2022.03.001>.
24. Hong, S. J., & Noh, K. (2021). Setting the sagittal condylar inclination on a virtual articulator using a facial and intraoral scan of the protrusive interocclusal position. *J. Prosthet. Dent.*, 125, 392–395. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2020.01.031>.
25. Kwon, J. H., Im, S., Chang, M., Kim, J.E., & Shim, J. S. (2019). A digital approach to dynamic jaw tracking using a target tracking system and a structured-light three-dimensional scanner. *J. Prosthodont. Res.*, 63, 115–119. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpor.2018.05.001>.
26. Kim, J. E., Park, J. H., Moon, H. S., & Shim, J. S. (2019). Complete assessment of occlusal dynamics using target tracking with a three-dimensional facial scanner. *J. Prosthodont. Res.*, 63, 120–124. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpor.2018.10.003>.

27. Korol, D. M., Toncheva, K. D., & Kindiy, D. D. (2023). Photogrammetric method of obtaining a diagnostic 3D model of the jaw. *Ukr. Dent. Almanac*, 1, 37–40. [Король Д. М., Тончева К. Д., Кіндій Д. Д. Фотограмметричний спосіб отримання діагностичної 3D-моделі щелепи. *Український стоматологічний альманах*, 1, 37–40]. DOI: <https://doi.org/10.31718/2409-0255.1.2023.07>.
28. Antolín, A., Rodríguez, N. A., & Crespo, J. A. (2018). Digital flow in implantology using facial scanner. URL: <https://www.semanticscholar.org/>
29. Fieldhouse, S. (2021). CAD/CAM in dentistry: Materials and methods. *Dent. Update*, 48(8). DOI: <https://doi.org/10.12968/denu.2021.48.8.671>.
30. Schmalzl, J., Roth, I., Borbely, J., et al. (2023). Impact of software updates on accuracy of intraoral scanners. *BMC Oral Health*, 23, 219. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12903-023-02926-y>.
31. Barayan, M. A., Qawas, A. A., Alghamdi, A. S., et al. (2022). Effectiveness of machine learning in assessing diagnostic quality of bitewing radiographs. *Appl. Sci.*, 12(19), 9588. DOI: <https://doi.org/10.3390/app12199588>.
32. Robaian, A., Alotaibi, N. M., Allaboon, A. K., et al. (2024). Factors influencing dentists' choice of restorative materials for single-tooth crowns. *Med. Sci. Monit.*, 30, e942723. DOI: <https://doi.org/10.12659/MSM.942723>.
33. Hasiuk, P., Ramus, M., Vorobets, A., et al. (2021). Comparative evaluation of histotoxicity indicators of metal alloys for metal-ceramic dental constructions. *Wiad Lek.*, 74(9 Pt 1), 2100–2104. DOI: <https://doi.org/10.36740/WLek202109113>.
34. Rauch, A., Schrock, A., Schierz, O., & Hahnel, S. (2021). Material preferences for tooth-supported 3-unit fixed dental prostheses. *J. Prosthet. Dent.*, 126(1), 91.e1–91.e7. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2021.02.032>.
35. Abduo, J., & Elseyoufi, M. (2018). Accuracy of intraoral scanners: A systematic review. *Eur. J. Prosthodont. Restor. Dent.*, 26(3), 101–121. DOI: https://doi.org/10.1922/EJPRD_01752Abduo21.
36. Oh, K. C., Park, J.M., & Moon, H. S. (2020). Effects of scanning strategy and scanner type on intraoral scan accuracy. *J. Prosthodont.*, 29(6), 518–523. DOI: <https://doi.org/10.1111/jopr.13158>.
37. An, H., Langas, E. E., & Gill, A. S. (2024). Effect of scanning speed, pattern, and tip size on intraoral digital scan accuracy. *J. Prosthet. Dent.*, 131(6), 1160–1167. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2022.05.005>.
38. Eastwood, P., Gilani, S.Z., McArdle, N., et al. (2020). Predicting sleep apnea from three-dimensional face photography. *J. Clin. Sleep Med.*, 16, 493–502. DOI: <https://doi.org/10.5664/jcsm.8246>.
39. Duong, K., Glover, J., Perry, A., et al. (2020). Customized facemasks for continuous positive airway pressure: Feasibility study. *Am. J. Respir. Crit. Care Med.*, 201, A2432. DOI: https://doi.org/10.1164/ajrccm-conference.2020.201.1_MeetingAbstracts.A2432.
40. Angelone, F., Ponsiglione, A. M., Ricciardi, C., et al. (2023). Diagnostic applications of intraoral scanners: A systematic review. *J. Imaging*, 9(7), 134. DOI: <https://doi.org/10.3390/jimaging9070134>.
41. Eggmann, F., & Blatz, M.B. (2024). Recent advances in intraoral scanners. *J. Dent. Res.*, 103(13). DOI: <https://doi.org/10.1177/00220345241271937>.
42. Knoop, P. G. M., Papaioannou, A., Borghi, A., et al. (2019). A machine learning framework for automated diagnosis and planning in plastic surgery. *Sci. Rep.*, 9, 13597. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-019-49506-1>.
43. Du, Y. F., Chen, N., & Li, D. Q. (2019). Application of robot-assisted surgery in head and neck cancer. *Zhonghua Kou Qiang Yi Xue Za Zhi*, 54, 58–61. DOI: <https://doi.org/10.3760/cma.j.issn.1002-0098.2019.01.011>.
44. Grischke, J., Johannsmeier, L., Eich, L., Griga, L., & Haddadin, S. (2020). Dentronics: Robotics and artificial intelligence in dentistry. *Dent. Mater.*, 36, 765–778. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dental.2020.03.021>.
45. Vornyk, V., & Potapchuk, A. (2025). Orthofacial harmonisation of dental patients' faces: A review of research. *Wiad. Lek.*, 78(11), 2442–2449. DOI: <https://doi.org/10.36740/WLek/214794>.

Contemporary Perspectives on Three-Dimensional Facial Scanning in Clinical Dentistry: A Literature Review

Anatoliy Potapchuk, Vasyl Almashi, Yurii Bretsko

Uzhgorod National University, Uzhgorod, Ukraine

Abstract. Accuracy and precision are key parameters in facial scanning within dentistry, as they determine the degree of correspondence between digital patient models and actual anatomical structures, as well as their suitability for diagnosis, treatment planning, implant fabrication, and postoperative evaluation. Achieving optimal scanning accuracy requires the application of advanced technologies combined with adherence to standardized procedural protocols. The accuracy and precision parameters of facial scanners largely depend on the device type, its technical characteristics, and the software used for data processing. The detailed influence of these factors is examined in the following sections.

Objective: to analyze the current state of facial scanning technology in dentistry, outlining its historical development, operational mechanisms, and the available evidence regarding its applications and limitations within digital dentistry.

Material and methods. Relevant publications related to the study topic were retrieved from scientific databases such as Scopus, PubMed, BVS, and SciELO, using the following keywords: facial scanner, dentistry, prosthodontics, virtual patient, maxillofacial prosthetics, accuracy. As a result, 84 relevant scientific publications were identified. The search depth covered the past five years, allowing for the analysis of the most current and significant data relevant to the study objective. The review included original research articles, study results, and official recommendations from medical associations. The inclusion criterion was the presence of positive outcomes in the investigated groups. The collected materials were analyzed in accordance with the principles of content analysis, followed by data systematization and classification using CADIMA software.

Conclusions. Despite existing limitations related to scanning quality and software performance, three-dimensional facial scanners represent fast and non-invasive tools that can be effectively applied across various areas of dental practice. Facial scanners play an essential role in the digital workflow, providing facial records that enhance interdisciplinary communication, virtual articulation, smile design, and the diagnosis and management of obstructive sleep apnea. In the future, facial scanning technology demonstrates significant potential for applications in craniofacial research, as well as in prosthetic diagnostics and dental treatment planning.

Keywords: facial scanning; dentistry; prosthodontics; virtual patient; maxillofacial prosthetics; accuracy.

Стаття: надійшла до редакції 11.12.2025 р.;
прийнята до друку 10.02.2026 р.;
опублікована 29.03.2026 р.

Потапчук Анатолій Мефодійович

доктор медичних наук, професор,
завідувач кафедри стоматології
післядипломної освіти ННІ стоматології
та лабораторної медицини ДВНЗ
«Ужгородський національний університет»,
м. Ужгород, Україна

 <https://orcid.org/0000-0001-9857-1407>

Алмаші Василь Миколайович

доктор філософії (PhD), доцент,
доцент кафедри стоматології
післядипломної освіти ННІ стоматології
та лабораторної медицини ДВНЗ
«Ужгородський національний університет»,
м. Ужгород, Україна

 <https://orcid.org/0000-0002-2943-4844>

Брецько Юрій Іванович

аспірант кафедри стоматології
післядипломної освіти ННІ стоматології
та лабораторної медицини ДВНЗ
«Ужгородський національний університет»,
м. Ужгород, Україна

 <https://orcid.org/0009-0008-1582-3268>