

Digitális technikák hatékonyságának és pontosságának vizsgálata a restauratív fogászat területén

PhD disszertáció

Dr. Nagy Zsolt András

Semmelweis Egyetem
Doktori Iskola, Klinikai Orvostudományok



Témavezető: Dr. Vág János, Habil, egyetemi tanár

Hivatalos bírálók: Dr. Borbély Judit, PhD, egyetemi docens
Dr. Marada Gyula, PhD, egyetemi adjunktus

Komplex vizsga szakmai bizottság:

Elnök: Dr. Gera István, PhD, egyetemi tanár

Tagok: Dr. Gerber Gábor, PhD, dékán

Dr. Rakonczay Zoltán, az MTA doktora, egyetemi tanár

Budapest
2022

1. BEVEZETÉS

Az elmúlt évtizedben az innovatív gyártási technológiák, a korszerű anyagok alkalmazása és az új klinikai technikák úttörő szerepet játszottak az úgynevezett digitális fogászat fejlődésében, kiterjesztve a kezelési lehetőségeket a fogászat minden területére.

A fogorvosi terület sajátosságait figyelembe véve az előnyök az orvosi és a páciensi oldalon is jelentkeznek. A digitális technológiák hozzájárultak a beavatkozások időtartamának csökkentéséhez, a minimálinvazív preparációs technikák elterjedéséhez, valamint a páciensek pszichológiai és fizikális kényelmének javulásához.

A digitális eszközök jelentősen megváltoztatták a diagnosztikai folyamatokat és előrelépést jelentenek a betegekkel folytatott kommunikációban.

Az intraorális scannerek (IOS) és a fejlett gyártási folyamatok megjelenése lehetővé tette a különböző fémmentes fogászati anyagok széleskörű elterjedését, javítva a restaurációk funkcionális és esztétikai eredményét.

1.1. A CAD/CAM technológia fejlődése

Az elmúlt két évtizedben a számítógépes tervezés és a számítógép vezérelt gyártás (CAD/CAM) technológia alkalmazása gyorsan fejlődött a fogászatban. 1983-ban forradalmasította a helyreállító fogászatot a CEREC rendszer, ami történelmileg az első szék melletti CAD/CAM rendszer.

A gyártási folyamat helyszíne szerint a CAD/CAM rendszerek három kategóriába sorolhatók: chairside rendszerek, laboratóriumi rendszerek és a központosított gyártás. Az utóbbi két esetben a fogorvosi munka befejeztével a restaurátum előállítási felelőssége a fogtechnikusra hárul. A páciensnek ilyen esetekben legalább két alkalommal el kell látogatni a fogorvosi rendelőbe a chairside rendszer egy alkalomával szemben. A CAD/CAM rendszerek fő elemei: scanner, szoftver (Computer aided design) és egy marógép vagy 3D nyomtató (Computer aided manufacturing).

1.2. A digitális fogászat szerepe az oktatásban

A digitális technológiák alkalmazása a fogorvosi tantervekben világszerte megkezdődött. Ebben a legnagyobb kihívás, hogy a technológia fejlődéséhez folyamatosan alkalmazkodni kell. A fogorvosi szakemberekkel, orvosokkal, fogtechnikusokkal és szolgáltatókkal való kommunikáció során a fogorvostanhallgatóknak fel kell készülniük a digitális adatok kezelésére, a betegek biztonságának biztosítására, valamint a hagyományos és digitális folyamatok előnyeinek és korlátjainak megértésére.

Világszerte több helyen 3D fogászati oktatási programot vezettek be, hogy fokozzák a hallgatók térbeli vizualizációs képességeit, interaktivitását, kritikai gondolkodását és klinikai ismereteit. Ennek egyik lehetősége a „Virtual Reality” (VR), amely egy erre a célra kialakított headset-szemüveg segítségével jeleníti meg a szimulációt. Másik módja az „Augmented Reality” (AR), ahol egy telefonnal vagy projektoros szemüveggel jeleníthetők meg virtuális elemek a valós környezetben.

A két technológia alkalmazása értékes az alap- és a posztgraduális képzés során is, mivel interaktív tanulási lehetőséget nyújtanak állandó hozzáféréssel és objektív értékeléssel.

A hallgatók teljesítménye javult egy szőlőkorona vázának digitális tervezésekor, élvezték a CAD/CAM technológia előnyeit, hiszen az anatómiai kontúrok precízen formálhatók voltak és a nagytíva beolvasott digitális tervek megtekintése javította a feladat pontos megértését.

Az IOS alkalmazása szimulációs képzésen megmutatta, hogy tapasztalatlan fogorvostanhallgatók is képesek elsajátítani a használathoz szükséges készségeket és előnyben részesítették a hagyományos lenyomatvétellel szemben.

Teljes kivethető fogsor digitális rendszerrel történő elkészítése kiváló besorolású fogpótlásokat eredményezett, melyeket a hallgatók mellett a betegek is előnyben részesítettek.

A digitális értékelés objektív jellege segíti a hallgatók vizualizációjának fejlődését, azonnali visszajelzést nyújt, segíti az

oktatók értékelését és javítja a hallgatók önértékelését és önkorrekcióját.

A digitális eszközök egyre elterjedtebbek a fogászati ellátásban, ezt figyelembe kell venni a tantervekben is, hogy felkészítsék a jövőbeli fogorvosokat mindennapi munkájukra. A fogorvosképzés forradalmasításában is fontos szerepük lehet, hiszen különféle interaktív és intuitív tanulási formában válik elérhetővé a megfelelő tudás és készség elsajátítása egy ösztönző, élvezetesebb és motiválóbb módon, állandó hozzáféréssel.

1.3. Az intraorális scannerek szerepe

Az Intraorális Optikai Scannerek (IOS) a digitális lenyomatok elkészítésére szolgáló eszközök a fogászatban. Fényforrást vetítenek a fogívré, beleértve a preparált fogakat és az implantátum scan bodykat. A fényérzékelő szenzor által rögzített képeket scannelő szoftver dolgozza fel, amely pontfelhőket generál, majd háromszögeli azokat, létrehozva egy 3D felületmodellt.

Az IOS-ek különböző elveken működnek, amiket a gyártók sokszor kombinálnak a scannelés közben keletkező zaj minimalizálására, amit a szájüregi képletek eltérő transzlucenciája, a nedves környezet és a kiszámíthatatlan mozgások okoznak.

Az aktív trianguláció során a scanner fénysugarat vetít az objektumra és a róla visszaverődő vetüléséből meghatározható az objektum távolsága. Egy gyűjtőlencséből és egy helyzetérzékeny fotodetektorból álló kamera a megvilágított tárgyon keletkező lézerpont helyét detektálja. A lézerpont különböző helyen jelenik meg a kamera látóterében a lézermitter távolságától függően.

A lézermitter, a lézer pont és a kamera háromszöget alkotnak. A kamera és a lézermitter közti távolság ismert, ez a „baseline”. A lézermitter és a kamera sarokszöge szintén ismert. A három adat meghatározza a háromszög alakját és méretét egy fókusz távolságra vonatkoztatva, így a lézerpont detektor síkján történő elvetüléséből meghatározható a tárgy mélysége.

Ezt az elvet használja a CEREC Omnicam, a Medit scannerek és a Planmeca Emerald.

Az IOS FastScan az egyetlen rendszer, amelyben a kamera mozog, így a fogorvosnak csak három pozícióban kell tartania a scannert a teljes leképezéshez.

A „Confocal laser scanning microscopy” (CLSM) elvén működő scannerek a fókuszált és defókuszált képek elkülönítésén alapszanak kiválasztott mélységekben. Egy lézersugarat objektívlencsével a minta felületére vetítenek, majd sugárelosztó segítségével a visszavert fényt egy fókuszszűrőn keresztül vezetve csak a fókuszpontba eső kép jelenik meg a detektoron. A fókusz távolság ismert, így kiszámítható a képpont távolsága.

A teljes minta scanneléséhez az objektum felett horizontális síkban vezetett sugárnyaláb szervo-kontrollált oszcilláló tükröket használ. Ezen az elven alapul a Trios, a Primescan és az iTero scannerek működése.

Az „active wavefront sampling” (AWS) technológián alapuló scannerek lényege egy, a lencse tengelyétől távolabb eső, egyetlen lyukat tartalmazó tárcsa a lencse elé beépítve, ami gyorsan forog, így olyan mintha kettő vagy több szögből látnánk a képet. A képeken lévő pontok közti eltolódás arányos a mélységi információval.

Több szögből készített kép esetén nő a pontosság.

A Lava (3M ESPE) IOS az AWS alapján működik.

Az „Optical coherence tomography (OCT) egy olyan interferometrikus képalkotó technika, aminél a kibocsátott fényt kettéválasztják még a készüléken belül. Az egyik nyaláb egy referenciatükrőről verődik vissza, míg a másik a vizsgálandó mintáról. A referencianyaláb útvonal hossza ismert. A két visszaverődött nyaláb interferál, ha a két nyaláb hossza egyenlő, akkor erősítik egymást, ha a fényhullámhossz felének távolságával különböznek, akkor kioltják egymást.

A polikromatikus fényforrásokkal az interferencia mikrométeres távolságra csökken, ezáltal alkalmassá válik fogászati felhasználásra. A E4D scanner alkalmazza ezt a működési elvet.

Az „Accordion Fringe Interferometry” (AFI) olyan forradalmi technológia, ami kiterjeszti a hagyományos lineáris

lézerinterferometriát 3 dimenzióba. Két koherens pontforrás világítja meg az objektumot, interferencia mintázatot vetítve rá, amit egy nagy precizitású digitális fényképezőgéppel rögzítenek.

A látszólagos peremgörbület mértéke a fényképezőgép és a lézerforrás közötti ismert geometriákkal együtt lehetővé teszi az algoritmusok számára, hogy digitalizálják a tárgy felületét 3D-ben. Rögzítik X, Y, Z felületi pontok helyét minden pixel esetében. Előnye, hogy kevésbé érzékeny a háttér fényre és nem zavarja a fényes felület sem.

Ilyen elven működő IOS a Lythos.

A VOCO által folyamatos fejlesztés alatt álló IOS infravörös technológián alapuló holografikus megközelítésű új, 3D scannelési technikát alkalmaz, ez az ún. „digital holography”. Ezáltal képes a subgingivalisan elhelyezkedő fog kontúrját leképezni.

1.3.1. Por használata scannelés közben

A fogszövetek és egyéb szájjüregi szubsztrátok fényvisszaverése nem egységes. Ez scanneléskor megzavarhatja a célterület, ún. point of interest (POI) detektálását és leképezését. Ennek elkerülése érdekében lehet változtatni a scannelési irányon, használhatunk polarizáló szűrőt vagy 20-40 µm-es por bevonatot.

Ez a technika korábban nagyon pontosnak bizonyult kis kiterjedésű pótlások esetében, de kényelmetlen a betegek számára és több időt igényel. Teljes állcsont scannelése esetén a porfestést nehéz fenntartani. Korábbi vizsgálatokban nem találtak egyértelmű különbséget a por bevonat hatására a scannelés pontosságát illetően.

1.3.2. Követés és szoftver

3D in motion digitális lenyomatvételnél megszakadhat a képalkotás folyamata, ha túl nagy az objektumtól való távolság vagy a mozgás túl gyors esetleg nem egyenletes. Ennek megoldására különböző szoftveralgoritmusokat fejlesztettek ki, melyek legtöbbször az objektum geometriájának felismerésén

alapulnak. Ehhez újra kell scannelni a már bescannelt területet, lehetővé téve a POI egyeztetését.

1.3.3. Térháló minőség

Az IOS szoftvere különböző sűrűségű térhálókat állít elő, lapos felszíneken átlagos sűrűségűt, míg görbületeknél sűrűbbet. A legújabb IOS-ek szint és textúrát is kezelnek növelve a fogak scannelhetőségét, klinikai helyzetek megítélését és a felhasználási élményt fotorealisztikus képszintézissel, de ez félrevezető képet is adhat.

1.3.4. A stitching mechanizmus fogalma és jelentősége

Az IOS-ek korlátozott látómezővel (FoV) rendelkeznek, egy kép nem fed le a fog összes felületét. A különböző irányból készült képek átfedő régiókat képeznek, melyek egyesítésre különféle algoritmusokat fejlesztettek ki. Ennek vannak hibái, amik felhalmozódhatnak a scannelés előrehaladtával. Mindezek mellett a stitching pontosságát befolyásolja a scannelési kezdőpont és mintázat is.

1.3.5. Az intraorális scannerek felhasználási területei

Az IOS-eket a fogászat legtöbb területein alkalmazzák legyen szó diagnosztizálásról, restaurátumok, fogpótlások, vagy egyedi készülékek gyártásáról, műtétek során és az orthodontiában egyaránt.

Az így készített szülő kerámia koronák és a rövid fesztávú restaurátumok marginális rése eléri klinikailag elfogadható mértéket a hagyományos lenyomatok alapján készültekhez mérve. Teljes állcsontra kiterjedő precíziós lenyomatvétele esetén még nem mindig elégséges az IOS-ek pontossága.

Implantációs szülő koronák, rövid fesztávú hidak és merevítő rudak sikeresen előállíthatók optikai lenyomatok és scanbodyk segítségével.

Részleges és teljes kivehető protézisek készítése felvet néhány kérdést a referenciapontok hiánya és a lágyszövet-dinamika regisztrálásnak lehetetlensége miatt.

Ugyanakkor sikeresen használhatók digitális mosolytervezési alkalmazásokhoz.

Megfelelő szoftverrel a scan összeilleszthető CBCT fájlokkal is a virtuális csontszövetet tartalmazó modell elkészítéséhez, az implantátumok pozíciójának megtervezéséhez és a műtéti sablonok elkészítéséhez.

1.3.6. Előnyök és hátrányok

Az optikai lenyomatok egyik fő előnye, hogy minden el nem mozduló képletet fizikai lenyomat nélkül rögzít, jelentősen csökkentve a páciens kényelmetlenségét. Lehetővé teszik a székidő csökkentését, hiszen egy teljes fogív kevesebb, mint 3 perc alatt bescannelhető. A fő időhatékonyság azonban a későbbi munkafázisok során érzékelhető leginkább.

A tanulási görbe tetőzése után további klinikai előnyöket jelenthet. Egyszerűbbé válik a lenyomatvételek komplex esetekben, elégedetlenség esetén nincs szükség a teljes eljárás megismétlésére. A kiértékelést és az azonnali javítást segíti a sokszoros nagyítás és a jól látható intermaxilláris reláció, bizonyos szoftverek még az alámenős részeket is jelzik.

Csökken az anyagfogyasztási igény, mivel nincs szükség lenyomatkanalakra, lenyomatanyagokra és mintakészítő anyagokra.

A fogorvos és a fogtechnikus valós időben tudja felmérni a lenyomat minőségét elősegítve a kettejük közti hatékonyabb kommunikációt.

A digitális felület a páciensekkel történő kommunikációnak és marketingnek is hatékony eszköze.

Az IOS alkalmazásakor is figyelembe kell venni a tanulási görbét, mivel egy technológiai világhoz nagyobb affinitással közeledő személy könnyebben adaptálja a mindennapi gyakorlatba, mint egy arra kevésbé fogékony és érdeklődő fogorvos.

A digitális lenyomatok esetén a leggyakoribb problémák a mély preparációs szélek észlelése vagy az esetleges vérzés esetén mutatkozó scannelési nehézség.

Ezek a problémák leküzdhetők vérzéscsillapító készítmény használatával, a paragingivális és subgingivális preparációs széleknél pedig sulcustágító fonállal vagy retrakciós pasztával és megfelelő scannelési technikával.

Modelltől függően az IOS vásárlási költsége jelenleg 6500 és 35000 euró között mozoghat. A kínálat növekedésével várható a beszerzési költségek csökkenése, ez alól kivételt képeznek a csúcskategóriás, utolsó generációs modellek. A befektetés akkor térül meg a legjobban, ha az eszközt a különböző fogászati szakterületek munkafolyamataiba egyaránt integrálják.

Vásárlás fontos tájékozódni az olyan további költségekről, mint a rekonstrukciós szoftver frissítése vagy zárt rendszerek esetén a kinyert fájlok univerzálisan felhasználhatóvá alakítása, mivel a gyártók ezekben a kérdésekben eltérő álláspontot képviselnek.

1.3.7. A pontosság alapfogalmai

Az accuracy (pontosság) leírja az adott mérési eredmény és a mérendő objektum valós értéke közötti egyezés mértékét. A trueness (valóságűség) a mérés átlagos eltérését mutatja a valós értékektől, míg a precision (reprodukálhatóság) a megismételt mérések standard hibájaként jelentkezik. Ez a két független tényező határozza meg az accuracyt, ami szükséges a restaurátumok megfelelő illeszkedéséhez és virtuális artikuláláshoz.

1.3.8. Az IOS pontosságának meghatározása

A mérési módszerek rámutatnak a trueness és precision értékek változékonyságára, mivel ezek számos tényezőtől függenek, úgymint a felhasználó, az alkalmazott eszköz és a kalibrálása, a mérések között eltelt idő és a külső környezet. Ezen értékek kiszámítására szolgáló módszerek csak korlátozottan állnak rendelkezésre a referencia minták minősége és az alkalmazott mérési technikák miatt. Emiatt további törekvések szükségesek a szabványosított és összehasonlítható mérési stratégiák kidolgozásához.

1.3.9. A pontosságot vizsgáló módszerek összehasonlítása

Az indirekt megközelítések egy elkészült restaurátum illeszkedési pontosságát vizsgálják, de nem tudja elkülöníteni az elkészítésből adódó hibát a scanner hibájától.

A direkt módszerek 3D-s vizsgálati minták best fit algoritmus segítségével történő illesztését követően, a fogívek felületén végzett összehasonlításokat alkalmaznak.

Az in vitro és in vivo pontossági vizsgálatok között jelentős eltérések vannak, utóbbi meghatározása nehéz, mert a referencia mestergeometria közvetlenül nem digitalizálható. Az in vitro vizsgálatok egyszerűbben kivitelezhetők és előkapui az in vivo-szerűbb vizsgálatoknak.

2. CÉLKITŰZÉS

2.1. A Dental Teacher rendszer hatásának vizsgálata a hallgatók preparációs készségére komplex kavítás esetén

A Dental Teacher preparáció kiértékelő szoftver hasznosságának vizsgálata a preklinikai oktatási kurrikulum részeként, amely javíthatja az onlay üreget előkészítő egyetemi hallgatók tanulási és fejlődési teljesítményét.

2.2. A stitching mechanizmus okozta torzítás vizsgálata egy új metodikával

A scannelési origóban végzett mintaillesztés esetén az identikus pontok deviációjának meghatározása foganként és scannelési mintázatonként. Az identikus pontok meghatározása egy amorf felületen (fogak) pontatlanságot eredményezhet, ezért meghatározzuk az algoritmus illesztési pontosságát egyes fogakon, amivel a módszer pontosságát képezhetjük le.

2.3. A stitching mechanizmus okozta torzítás összehasonlítása az új módszer segítségével, 7 intraoralis scanner és a hagyományos lenyomatvételi technika alkalmazása esetén, teljes állcsonton

A fogakon történő intraoralis scannelés során jelentkező torzítás összehasonlítása a fizikai lenyomatvétel eljárás digitalizálásával. Továbbá azon tengely meghatározása, amelyet a teljes állcsont scan során a stitching error leginkább befolyásol. Végezetül a hét különböző IOS trueness értékének összehasonlítása.

3. MÓDSZEREK

3.1. A Dental Teacher rendszer hatásának vizsgálata a hallgatók preparációs készségére komplex kavitás esetén

Összesen 36, egyenként 2 évnyi tapasztalattal rendelkező fogorvostanhallgató került véletlenszerűen kiválasztásra a negyedéves évfolyamról. A hallgatók feladata egy mesio-occlusobuccal kiterjedésű onlay üreg preparálása volt egy műanyag mulázs jobb felső első moláris fogában. Egy előre elkészített mester üregnek a demonstrálását egy, a betét preparálásban nagy tapasztalattal rendelkező gyakorlatvezető végezte.

Az üreg előkészítéséhez két ismert dimenziójú fűrő lett biztosítva, lekerekített végű, gyémánt borítású inlay és fissure fűrők. Legfeljebb 60 perces előkészítési idő elteltével minden fog egy fogtechnikai 3D scannerrel került digitalizálásra, ami az adatokat a KaVo Dental Teacher® szoftverbe továbbította kiértékelésre.

Az első preparáció után a hallgatók véletlenszerűen ketté lettek osztva egy kontroll és egy teszt csoportra, amelyek mindegyike 18 diákból állt. A kontrollcsoport hallgatói szóbeli értékelést kaptak, fogászati szondával megmutatva a hibákat, majd egy második üregelőkészítést végeztek.

A tesztcsoport első üregalakításait az oktató a Dental Teacher 3D-s megjelenítési felületén mutatta be és jelen voltak a mérések során.

Az értékelés után elvégezték a preparáció második körét.

A végső üregek mindkét csoport esetén 3D scannelésre, majd kiértékelésre kerültek a Dental Teacher szoftverrel, majd kiszámításra került az ideális üregtől való eltérés tanítás előtt és után.

A csoportok közötti összehasonlítás elemzéséhez Mann-Whitney U teszt került alkalmazásra. Az első preparációk eltérése a

mestermintától és a javulás kapcsolata a Pearson féle korrelációs koefficienssel lett jellemezve. A pontokra lineáris regressziós egyenest illesztettünk, ahol az interakció mutatta meg a két egyenes meredeksége közötti különbséget. A szignifikancia szinte 5% ($p < 0,05$).

3.2. A stitching mechanizmus okozta torzítás vizsgálata egy új metodikával

Egy maxilla és egy mandibula mester modell készült el digitálisan Zirkonzahn CAD / CAM szoftverrel 14-14 foggal (2-15, illetve 18-31, az univerzális jelölés szerint). A modellek marás útján kerültek előállításra, PMMA korongból és képezték a vizsgálati alapot az egész értékelési folyamat során. A mestermodellek nagy pontosságú ipari scannerrel lettek digitalizálva, hogy elkészüljenek a referencia sztereolitográfiai (STL) minták (mester - CAD body).

A fizikai modellekről digitális lenyomat készült intraorális scannerrel négy scannelési minta felhasználásával. A kiindulási pont mindkét fogíven a bal második őrlőfog volt.

Az "A" scannelési mintát (SPA) lineáris technikával, az okklúziós felületeket balról jobbra haladva a második molárisokig, majd a lingualis oldalon folytatva jobbról balra a pásztázást, ezután az okklúziós felületeken továbbhaladva balról jobbra, kissé a buccalis irányba döntve a scannert. A lenyomat a buccalis felületek leképezésével lett teljes.

A lineáris technika részlegesen a "B" (SPB) és a "C" (SPC), illetve teljesen a "D" (SPD) scannelési mintáknál az ún. „nyereg technikára” lett cserélve. A minták az SPB esetén mind a molárisok, mind a premolarisok, az SPC esetén pedig az őrlőfogak területén lineárisan lettek scannelve, míg a többi helyen nyeregtechnikával lett mozgatva a buccalis oldalról a lingualisra, amíg a megfelelő kontralaterális fozhoz nem ért.

Az összes scannelt minta exportálva lett nyitott STL fájlformátumban, majd importálva lett a GOM Inspect szoftverbe kiértékelésre. Itt először egy egyedi koordináta-rendszer került felállításra, ahol az X (bucco-lingualis), Y (mesio-distalis) és Z (apico-coronalis) tengelyek az okkluzális és sagittális síkok mentén

helyezkedtek el. A mester minta minden fogán két mérési pont került meghatározásra. A mester és vizsgálati mintákat összeillesztette a szoftver teljes felületük mentén, majd fogívenként 14 helyen lokális illesztést történt az ún. "local best fit" algoritmus szerint, így megtörtént az identikus pontok egymásnak való megfeleltetése a két mintán. Ezután a scannelési origónak megfelelő zóna újra lett aktiválva.

A vizsgálati minták mérési pontjainak eltérései a mestermintáktól a szoftverben miliméterben kerültek regisztrálásra az X, Y és Z tengelyek mentén.

Az adatok elemzésénél három módszer lett összehasonlítva: az első érték (teljes felszín deviáció) a mérési pontokhoz legközelebbi felszíni pontok közötti átlagos távolság volt, amit a GOM szoftver automatikusan meghatároz és az irodalomban is a leggyakoribb módszer. A második érték a teljes felületi illesztés során az identikus pontok közötti 3D távolságokból került kiszámításra (teljes identikus pont deviáció). Harmadik, általunk kidolgozott új módszer (origó identikus pont deviáció) az identikus pontok közötti, egész fogívre számolt átlagos abszolút deviáció a scannelési origóban történt illesztés után lett kiszámítva.

A három érték generalized linear mixed modelben, gamma-eloszlással és log-link funkcióval lett összehasonlítva. A p értékek Bonferroni módszerrel lettek beállítva, páronként összehasonlítva a 0,05-re beállított alfa értékkel. A módszerek közötti korrelációk Spearman teszttel kerültek kiértékelésre.

3.3. A stitching mechanizmus okozta torzítás összehasonlítása az új módszer segítségével, 7 intraoralis scanner és a hagyományos lenyomatvételi technika alkalmazása esetén, teljes állcsonton

A pontos modellezés érdekében egy megtarott fogazatú friss humán cadaverből származó maxilla képezte a vizsgálati mintát. A vizsgálat teljes időtartalma alatt a disszekált maxilla 4°C-on és nedves volt tartva a szövetek állapotának megőrzése érdekében. A maxilla egy ipari 3D scannerrel lett digitalizálva és szolgált mester mintaként az összehasonlításban. Hét különböző IOS került kiválasztásra a

vizsgálathoz: *Trios 3, CEREC Omnicam v2., CS 3600, iTero Element 1 és Element 2, Planmeca Emerald, PlanScan.*

Mindegyikkel öt scannelés történt egyetlen felhasználó által, aki tapasztalt volt az adott rendszerrel és a gyártók által javasolt scannelési mintázatot alkalmazta, mindet a #15 fogtól kiindulva. A scannek tartalmazták az összes fogat, a preparált felszínnek approximális területeit, a gingivalis területek és a szájpadlást.

Emellett készült öt hagyományos polivinil-sziloxán (PVS) lenyomat is, kétfázisú- egyidejű technikával, gyári csatornákkal. Ezekből extra kemény, nagy szilárdságú gipsz kiöntéssel precíziós minták készültek, amiket egy fogtechnikai asztali laboratóriumi scannerrel digitalizáltuk a legnagyobb pontossággal ($50\mu\text{m}$) a hagyományos munkafolyamat reprodukálása érdekében.

Az összes teszt fájl STL formátumban lett exportálva, majd a GOM Inspect szoftverbe kerültek importálásra.

A trueness érték meghatározásához a teszt és mester minták eltérését origo indentikus pont deviáció módszerrel vizsgáltuk meg. A mestermintán a megfelelő koordináta-rendszer felállítása (X, Y és Z tengelyek az occlusalis és sagittalis síkokon) után minden fogon két mérési pont került kiválasztásra meghatározott helyeken, melyek referenciapontként szolgáltak (28 pont).

Az intraorális scannek egyenként lettek kiértékelve. Első lépésben egy automatikus szuperimpozíció történt a mestermintára, majd minden fog határvonala körbe lett jelölve, hogy foganként beazonosíthatóak és megfeleltethetőek legyenek a választott identikus mérő pontok a „local best fit” algoritmussal. Amikor a két minta foganként illeszkedett egymáshoz, az egymásnak megfelelő két pont átmásolásra került a mesterről a teszt mintára (identikus pontok). Végül a két minta illesztése vissza lett állítva a scannelési origóra. Az identikus pontok közötti eltérési értékek a megfelelő koordinátarendszer mindhárom tengelye mentén regisztrálásra kerültek. A 3D-ben mutatott átlagos komplex deviáció a Pythagoras-tétel alapján lett kiszámítva a 3 tengely vektoraiból.

A fogankénti mestermintától való komplex 3D eltérés mérése (trueness), a teljes fogíven történő scannelés iránya mentén történt, mely megmutatja a stitching miatt kumulálódott deviációt. Az egyes

tengelyek mentén kialakuló deviáció statisztikailag lett összehasonlítva, hogy mérhető legyen a legnagyobb eltérést mutató tengely. A scannelések az occlusalis felszínen kezdődtek, és ez a nézet a Z tengelyhez került hozzárendelésre, ezért az itt jelentkező deviáció a mélységmérés hibáját jelzi.

A fogak közötti komplex 3D eltérések átlagolásra kerültek, majd összehasonlításra az IOS-ek között, valamint az IOS-ek és a fizikai lenyomat digitalizált mintái között. Ez az átlagérték mutatja a scannerek általános trueness értékét, míg a standard szórás a precision értéket (vagyis a reprodukálhatóságot) mutatja meg. Az adatok statisztikai analízisre az SPSS 25 programba lettek importálva. A deviációs értékek generalized liner mixed modellel lettek elemezve, gamma-eloszlással és log-link funkcióval, korlátozott maximalizált valószínűség-becsléssel. Az első modellben a komplex deviációs értékek (a három vektor, X, Y, Z abszolút értékeinek kombinációi) két fő tényezővel, a fogakkal és a scannerekkel, valamint ezek kölcsönhatásával kerültek elemzésre. A második modellben a három tengelyen külön mért eltérések lettek vizsgálva, beleértve a scanner és tengely, valamint a scanner x tengely kölcsönhatásainak fő hatását. Többszörös páros összehasonlítás okozta elsőfajú hiba növekedés elkerüléséhez, a p értékeket 0,05-ös szinten tartottuk, a Sidak módszerrel segítségével. A fogakon átlagolt komplex deviációk szórása, ami a precision értékről ad felvilágosítást, statisztikailag F-test segítségével lett kiértékelve, Bonferroni korrekciót alkalmazva.

4. EREDMÉNYEK

4.1. A Dental Teacher rendszer hatásának vizsgálata a hallgatók preparációs készségére komplex kavitás esetén

A tesztcsoport esetén valamennyi mért paraméter javulási tendenciát mutatott. Az átlagos OD, AD és SW eltérései a mestermintától lényegesen kisebbek voltak a második üregek esetében.

Az átlagos SW paraméter javulása szignifikánsabb magasabb volt a tesztcsoportban.

Jelentős összefüggés volt tapasztalható az első preparálástól a másodikig elért javulás és az első preparálásnál mért deviáció között mindkét csoport esetén.

A teszt csoportban a regressziós egyenlet y-tengely metszés pontja és meredeksége szignifikánsan nagyobb volt, mint a kontroll csoportban. Ez azt jelenti, hogy a második preparálásnál mért javulás összességében a teszt csoportban jobb volt az átlagos első preparációs értékhez mérve. A nagyobb meredekség arra utal, hogy az első preparációnál gyengébben szereplő hallgatóknak nagyobb volt a javulása a teszt csoportban.

4.2. A stitching mechanizmus okozta torzítás vizsgálata egy új metodikával

Az identikus pontok meghatározásának a hibáját az egy fogas illesztés átlagos felszíni deviációjából kívántuk megbecsülni. Az átlagos eltérések 23-46 μm között változtak. Alacsonyabb volt a felső fogívénél, mint az alsó fogív esetén. A scannelési mintázatnak nem volt hatása a deviációra.

Az origo identikus pont deviáció változásának fogankénti és scannelési mintázonkénti vizsgálatához a grafikus ábrázolás érthetősége miatt kétirányú fog x mintázat és fog x oldal kölcsönhatásokat ábrázoltunk. A fog és minta közötti szignifikáns kölcsönhatás azt sugallta, hogy mintázonként eltérnek a deviációk az egyes fogak esetében. Az oldal és a fog közötti kölcsönhatás szignifikáns volt az X és Y tengelyeknél, de Z tengely esetében egyiknél sem. Az X és Y tengely mentén az oldalak közötti eltérés különbsége foganként változó volt.

A felső állcsonton az X tengelyen az SPC és az SPD pontok fokozatosan deviáltak az ellenoldal felé, míg az SPA és az SPB az ipsilaterális oldalon balra, a kontralateralis oldalon jobbra tért el. Az Y tengelyen minden mérési pont fokozatosan deviált ventralis irányba. Az eltérések szignifikánsan nagyobbak voltak az középvonaltól SPA-ban és SPB-ben, mint SPC-ben és SPD-ben. A Z tengely mentén minden mérési pont coronalisan deviált a minta középvonaláig, onnantól az SPA-ban és SPB-ben az eltérés mértéke

nem növekedett. A #11 - #6 fogaknál a volt a legnagyobb deviáció az SPA-nál.

Alsó állcsonton az X tengelynél az összes mérési pont deviált az ellenoldal felé. Az SPA eltérése szignifikánsan alacsonyabb volt a #29 - #31 fogaknál, de hasonló a #19 - #28 fogak közt a többihez képest. Az Y tengelynél az összes mérési pont ventralisan tért el. Az SPA deviációja szignifikánsan alacsonyabb volt, mint az SPB-é a #29 - #31 fogaknál és kisebb volt a #31-es fognál, mint az SPD-é. A Z tengely mentén minden mérési pont progresszíven coronalis irányban tért el a középvonalig, onnantól a deviáció fokozatosan megközelített a kezdeti nullpontot. Az összes eltérés a legnagyobb volt az SPA esetén és kisebb mértékű az SPB-ben, SPC-ben, SPD-ben.

Felső fogív esetén csak a #6 és #9 fogak között volt különbség az oralis és a vestibularis mérési pontok között az X tengelyen, míg az alsó fogívnél a #27 fognál az X tengely, valamint a #24 és #25 fognál az Y tengely mentén voltak megfigyelhetőek különbségek. A három különböző minta illesztési módszer között jelentős különbség jelentkezik a fogívtól és a scannelési mintázattól függetlenül. Az identikus pontok közötti összesített átlagos deviáció, mely a scannelési origónál történt illesztés szerint lett számolva, szignifikánsan magasabb volt, mint az összfelszínnek közelítő illesztésekor kapott átlagos eltérés, valamint szignifikánsan magasabb érték, mint az identikus pontok közötti átlagos eltérés összfelszínnek illesztése esetén. Ugyancsak összfelszíni illesztés esetén a teljes felület összes pontját vizsgálva, a teljes átlag deviációs érték szignifikánsan alacsonyabb volt, mint az identikus pontok átlagértéke.

A scannelési mintázatok összehasonlítása a scannelési origónál történt illesztéssel azt mutatta, hogy a felső fogív esetén az SPD szignifikánsan kisebb deviációt mutat, mint az SPA, de hasonló volt az SPB-hez és az SPC-hez. Az alsó fogívnél az SPD szignifikánsan kisebb eltérést mutat, mint az SPA és az SPB, de hasonló volt az SPC-hez. A másik két illesztési módszerrel nem figyelhető meg statisztikai különbség egyik fogívnél sem. Szignifikáns korreláció volt található a scannelési origónál mért eltérés és az átlagos teljes

fogív deviáció között, a három módszer bármelyikével számított módon. A korreláció szignifikáns volt a két összefelszíni illesztési módszer (surface-full és ident-full) között is, azonban az ident-orig és az összefelszín alapú illesztési módszerek között nem volt összefüggés.

4.3. A stitching mechanizmus okozta torzítás összehasonlítása az új módszer segítségével, 7 intraoralis scanner és a hagyományos lenyomatvételi technika alkalmazása esetén, teljes állcsonton

A fogankénti komplex 3D deviációt vizsgálva az első modellben mind a fő hatások, mind a fog, mind a scanner, mind kölcsönhatásuk szignifikáns volt. Az értékek folyamatosan emelkednek a scannelési origó irányából kiindulva és ez a tendencia szint ez összes IOS-nél megfigyelhető az Element1 és Element2 kivételével, ahol az anterior régióban csökkeni kezd. A legjelentősebb deviáció a PlanScan esetében volt kimutatható.

Az összefelszíni deviáció a scannelési origó figyelembevétele nélkül alig látható, szemben a scannelési origóban végzett „local best fit” illesztéssel. Az origótól legtávolabbi fog (#2) 3D-s képénél szemléletesen látható a halmazott torzulás, amit az identikus pontok közötti deviáció okoz. Ez sokkal nagyobb mértékű, mint a felszínnek közötti eltérés. A scannelési origótól a végpontig tartó, megnövekedett deviáció nem látható a fizikai lenyomat alapján készülő mintánál.

Az első statisztikai modellben, a szignifikáns scanner fő hatás a scannerek közötti különbségre utal függetlenül a fogankénti eltéréstől. A páros posthoc analízis alapján a fizikai minta deviációja szignifikánsan alacsonyabb volt, mint a legtöbb scanner értéke, kivétel a Trios 3 és a CS 3600. A Trios 3 deviációja szignifikánsan alacsonyabb volt, mint a PlanScané és az Emeraldé, az Omnicam értéke pedig alacsonyabb volt, mint a PlanScan és az Emerald értékei. Az Element 2 és az Emerald szignifikánsan alacsonyabb deviációs értékkel rendelkezett, mint a PlanScan. A CS 3600 nem különbözött jelentősen más scannerektől.

A legalacsonyabb precision a fizikai mintánál jelentkezett (20 μ m). Az összes IOS-nak ehhez képest szignifikánsan nagyobb volt a

standard deviációja. Trios 3 (89 μm), Element 2 (123 μm), Omnicam (125 μm), Emerald (166 μm), Element 1 (300 μm), CS 3600 (326 μm), PlanScan (561 μm). Ez a sorrend közelítőleg megfelel a trueness értékek sorrendjének. A PlanScan standard deviációja szingifikánsan nagyobb volt, mint a Trios 3, Element 2 és az Omnicam értéke.

A tengelyenkénti eltérést vizsgálva a scanner, tengely és kölcsönhatásuk szignifikáns volt a második modellben.

Összességében az átlagos deviáció (teljes fogíven) a Z tengelyen szignifikánsan magasabb volt, mint az X tengelyen és az Y tengelyen. A jelentős scanner x tengely interakció azt jelzi, hogy az IOS-ek között különbség jelentkezik a tengelyenkénti deviációkban. A legtöbb IOS esetében a teljes fogívre vonatkozó deviáció a Z tengely mentén volt a legnagyobb, míg a másik két tengelyen esetén az értékek egymáshoz hasonlóak voltak. Kivétel a Planmeca eszközei (PlanScan és Emerald), ahol az X tengelyek deviációi hasonlóak voltak a Z tengelyek értékeihez.

5. KÖVETKEZTETÉSEK

A Dental Teacher vizsgálat korlátain belül bebizonyosodott, hogy a preparáció elemző rendszer képes javítani a hallgatók tanulási görbéjét egy összetett üreg-előkészítési feladat esetén. Továbbá értékes segítséget nyújtott a hallgatóknak a preparálás megfelelő dimenzióinak elsajátításában.

Az általunk kidolgozott és javasolt új módszer az IOS pontosságának mérésére érzékenyebb lehet, mint bármelyik korábbi módszer, melyek jelentősen alábecsülik a deviációt. Használható a fogfelszínek, az IOS technika és a scannelési mintázatok hatásának megértésére, különösen teljes fogívre kiterjedő alkalmazás esetén. Javasolt a különböző hardverrel és szoftverrel működő scannerek közötti deviációt ezzel vizsgálni teljes fogív esetén. Jelen módszer rávilágít arra, hogy a 3D-s rögzítés legérzékenyebb pontja a triangulációs mérés, így ezek az információk lehetővé teszik a gyártók számára, hogy javítsák IOS-technológiájuk teljesítményét.

Ezen újszerű mérési technika további bizonyítást nyert a fizikai lenyomat indirekt scannelésével, hiszen amíg a stitching error az IOS-ek egyik leggyengébb pontja, addig a labor scannereket nem érinti. A módszer hozzájárulhat a scannerek trueness értékei közti statisztikai különbségek szenzitívebb detektáláshoz. Az IOS-ek legnagyobb deviációja a mélységmérésben történik. Az emberi cadaver esetén teljes fogív fizikai lenyomata lett a legjobb és a legpontosabb, azonban a viszonylag újabb IOS rendszerek (Trios 3, Omnicam, Element 2, Emerald) klinikailag is elfogadható eredménnyel bírnak.

6. SAJÁT PUBLIKÁCIÓK JEGYZÉKE

6.1. Disszertációhoz kapcsolódó közlemények

Nagy Zs; Simon B; Mennito A; Evans Z; Renne W; Vág J
Comparing the trueness of seven intraoral scanners and a physical impression on dentate human maxilla by a novel method BMC ORAL HEALTH 20 : 1 Paper: 97 , 10 p. (2020)

Nagy Z; Vág J; Mennito A; Renne W
Comparison of distortion of seven intraoral scanners caused by stitching mechanism BMC ORAL HEALTH 19 : S1 Paper: P16 (2019)

Vág J; **Nagy Zs;** Simon B; Mikolicz Á; Kövér E; Mennito A; Evans Z; Renne W

A novel method for complex three-dimensional evaluation of intraoral scanner accuracy

INTERNATIONAL JOURNAL OF COMPUTERIZED DENTISTRY 22 : 3 pp. 239-249. , 11 p. (2019)

Vág J; Kövér E; Mikolicz Á; **Nagy Z**

Assessment of distortion caused by stitching during full arch intraoral scanning BMC ORAL HEALTH 19 : S1 Paper: P15 (2019)

Nagy ZA; Simon B; Toth Z ; Vag J

Evaluating the efficiency of the Dental Teacher system as a digital preclinical teaching tool. EUROPEAN JOURNAL OF DENTAL EDUCATION 22 : 3 pp. e619-e623. , 5 p. (2018)

Vág J; **Nagy Zs**; Simon B; Tóth Zs

Use of a preparation validating software (Dental Teacher® - KaVo) for pre-clinical teaching method enhancing learning procedure and performance

In: White, Deborah (szerk.) Science and the Competent Dentist an Inter-professional Perspective
(2016) p. 23

6.2. Disszertációtól független közlemények

Vág J; **Nagy Zs**; Bocklet C; Kiss T; Nagy Á; Simon B; Mikolicz Á; Renne W

Marginal and internal fit of full ceramic crowns milled using CAD/CAM systems on cadaver full arch scans
BMC ORAL HEALTH 20 : 1 Paper: 189 , 12 p. (2020)

Nagy Zs; Nemes J; Nyárasdy I

Lokalizált agresszív parodontitisben szenvedő páciens komplett fogászati ellátása: Esetismertetés FOGORVOSI SZEMLE 108 : 4 pp. 131-136. , 6 p. (2015)

Gyurkovics, M; Barta A; Bartha K; Bíró ÁB; Döbrentey Zs; Fazekas R; Gánti B; Györfi A; Herczegh A; Jelencsics D; **Nagy Zs** et al.
A fogorvoslás fejlődése az elmúlt 20 évben
ORVOSTOVÁBBKÉPZŐ SZEMLE 20 : 1. ksz. pp. 18-28. , 11 p. (2013)