

**VILNIAUS UNIVERSITETAS
MEDICINOS FAKULTETAS
ODONTOLOGIJOS INSTITUTAS**



Eglė Eidukytė

5 kursas, 2 grupė

Magistro baigiamasis darbas

**Holografinių vaizdų projekcijų ant dantų modelių galimybių
vertinimas
Accuracy Evaluations of Holographic Images Projections on
Dental Models**

Darbo vadovas

Dr. Prof. Vygandas Rutkūnas

Vilnius

2023

Turinys

1. SANTRAUKA	3
2. ĮVADAS	5
2.1. Tyrimo tikslas	6
2.2. Tyrimo uždaviniai	6
2.3. Tyrimo hipotezė	6
3. LITERATŪROS APŽVALGA	7
3.1. Mišri realybė	7
3.2. Įrenginiai, skirti atvaizduoti papildytą realybę	8
3.3. Duomenų paruošimas	8
3.4. Sekiklis	9
3.5. Sekiklio atpažinimas ir sekimas	10
3.6. Kalibracija	11
4. MEDŽIAGOS IR METODAI	12
4.1. Tiriamojo darbo tipas	12
4.2. Prietaisas	12
4.3. Programinė įranga	12
4.4. Objektų gamyba	12
4.4.1. Dantų lanko modelio gamyba	13
4.4.2. Sekiklių gamyba ir atpažinimas	13
4.5. Kalibracija	15
4.5.1. Kalibravimo pieštuko gamyba	15
4.5.2. Kalibracijos pradžia	16
4.5.3. Kalibravimo taškų pažymėjimas	17
4.5.4. Kalibravimo pabaiga	17
4.6. Kalibravimo įvertinimui atliekamas tyrimas	17
4.7. Statistinė analizė	19
5. REZULTATAI	19
6. REZULTATŲ APTARIMAS	22
7. IŠVADOS	23
8. PADĖKA	24
9. LITERATŪROS SĄRAŠAS	25

1. SANTRAUKA

Darbo aktualumas: Mišrios realybės įrenginys gali būti naudojamas renkant individualius paciento duomenis, gautus atliekant kompiuterinės tomografijos (KT) arba magnetinio rezonanso tyrimus (MRT), ir iš jų vaizduojant hologramas. Jos naudingos įvairioje klinikinėje praktikoje norint pagerinti gydymo efektyvumą. Klinikinių procedūrų metu būtų naudinga realiu laiku vizualizuoti paciento anatomiją, chirurginius planus ar kitą procedūrai svarbią informaciją. Siekiant, kad ši technologija būtų naudinga, esminis veiksnys būtų didinti hologramų projekcijų tikslumą.

Darbo tikslas: Įvertinti holografinių vaizdų projekcijų ant dantų modelių tikslumą naudojant skirtingus sekiklius.

Medžiagos ir metodai: „HoloLens 2” įrenginiui buvo sukurta programėlė, leidžianti vartotojams matyti hologramas tam tikroje vietoje realiu laiku. Pagrindinis siekis - virtualus vaizdas turi sutapti su realiu vaizdu. Tikslumui pagerinti pagamintas „L” formos sekiklis su kontrastingų raštų lipdukais. Jis palygintas su „Navident” dinaminės navigacijos sekikliu. Kalibracijai pagamintas pieštukas, kurio viename gale yra kubas su kontrastingų raštų lipdukais. Kalibravimo įvertinimui atliktas tyrimas, kuris parodo hologramos projekcijos tikslumą.

Rezultatai: Naudojant „Navident“ sekiklį vidutinė kampo, susidariusio tarp kalibravimo metu pažymėtų taškų pozicijų ir fiksuotų taškų pozicijų virtualiame dantų modelyje plokštumų, vertė 5,06 laipsniais didesnė nei naudojant „L“ formos sekiklį. Visi atstumai tarp taškų yra statistiškai reikšmingi ($p < 0,05$). Įvertintos kalibravimo metu pieštuku žymėtų taškų svyravimo vidutinės reikšmės keturiose taškų pozicijose: tiksliausias taško vidurkis (0,57 mm) su mažiausiu standartiniu nuokrypiu (SN) (0,44 mm) yra naudojant „L“ formos sekiklį, o didžiausią taškų preciziškumo vidurkį (2,15 mm) ir SN turi ketvirtasis taškas (7,67 mm) naudojant „Navident“ sekiklį. Su „Navident“ sekikliu atstumai kiekvienoje taško pozicijoje didesni nei „L“ formos sekiklio.

Išvados: Holografinis vaizdas stabilesnis naudojant sekiklį, kuris yra kampuotas, padengtas charakteringu nesikartojančių geometrinių formų kontrastingų spalvų piešiniu. Tuo pačiu kalibravimas yra svarbi procedūra holografinio vaizdo padėties ant realaus objekto tikslumui. Taip pat, kampas tarp kalibravimo metu pažymėtų taškų pozicijų ir fiksuotų taškų pozicijų hologramoje (virtualiame dantų modelyje) plokštumų yra reikšmingas tikslumui.

Raktiniai žodžiai: papildyta realybė, mišri realybė, hologramos, tikslumas, sekiklis, kalibracija.

SUMMARY

Relevance of problem: A mixed reality device has the capability to utilize patient-specific data acquired from computer tomography (CT) and magnetic resonance imaging (MRI) scans to display holographic images. These devices are becoming increasingly popular in various clinical practices as they enhance the effectiveness of treatment. Real-time visualization of anatomy, surgical plans, and other relevant information would be advantageous in numerous clinical procedures. However, it's crucial to ensure the accuracy of holographic projections for this technology to be truly beneficial.

The aim of the problem: Evaluate the accuracy of holographic image projections onto a dental model using different trackers.

Materials and methods: An application has been developed for the ‘‘HoloLens 2,’’ device that allows users to see holograms in a specific location in real time. The main goal is to ensure that the hologram matches the real-world environment accurately. To improve precision, an ‘‘L’’-shaped tracker with contrasting stickers was produced and compared to the ‘‘Navident’’ dynamic navigation tracker. For calibration purposes, a pen with a cube containing contrasting stickers was created. A study was conducted to assess the accuracy of hologram projection during calibration.

Results: The average angle between the positions of the marked points during calibration and the fixed points' positions in the hologram value using the "Navident" tracker is 5.06 degrees higher than using the "L" shaped tracker. Both average angle values are statistically significant ($p=0.041$). All distances between the points are statistically significant ($p<0.05$). The average values of pen oscillation were evaluated in four-point positions during the calibration: the most accurate point average (0.57 mm) with the smallest standard deviation (SD) (0.44 mm) was achieved using the "L" shaped tracker, while the fourth point achieved the highest point precision average (2.15 mm) and SD (7.67 mm) using the "Navident" tracker. With the "Navident" tracker, distances at each point are greater than those of the "L" shaped tracker.

Conclusion: A holographic image is more stable when using a tracker that is angled and covered with a distinctive, non-repeating geometric pattern in contrasting colours. Calibration is also an important procedure for the accuracy of the holographic image's position on the real object. Additionally, the angle between the positions of the marked points during calibration and the fixed points' positions in the planes of hologram (virtual dental model) is significant for accuracy.

Keywords: augmented reality, mixed reality, hologram, tracker, calibration.

2. ĮVADAS

Odontologijoje šypsenos atkūrimas yra pasiekiamas naudojant skirtingas vaizdines metodikas, kurios yra būtinos bendradarbiavimui tarp gydytojo odontologo, dantų technikų laboratorijos ir paciento [1]. Pirmieji eksperimentai su medicininiais vaizdais datuojami 1895 m., kai W. C. Röntgenas atrado rentgeno spinduliuotę. Tai yra medicininį vaizdų naudojimo klinikinėje praktikoje pradžios taškas [2]. Dvimačius (2D) nuotraukų ir rentgenogramų trūkumus padėjo įveikti būdai, skirti fiksuoti dantų, veido minkštųjų ir kietųjų audinių duomenis, kad būtų galima sukurti trimačius (3D) virtualius modelius [3]. Naujausia medicininį vaizdų gavimo technologija turi daug potencialo, nes gali būti naudojama informacijai gauti ir jai vizualizuoti realiu laiku. Realiojo laiko duomenų prieinamumas tampa vis svarbesnis, nes juos naudojant diagnostika ir gydymas dažnai tampa greitesni ir patikimesni. Papildytos (angl. augmented reality) arba mišrios realybės (angl. mixed reality) technologijų naudojimas suteikia dar didesnes galimybes įgyvendinti šią technologiją klinikinėje praktikoje, nes jos leidžia sujungti realią aplinką su projektuojamais kompiuteriniais vaizdais.

Papildyta realybė (PR) – tai technologija, kuri uždeda kompiuteriu sukurtą holografinį vaizdą ant vartotojo vaizdo realiame pasaulyje. Ji dažniausiai painiojama su virtualia realybe, nes abi turi daug bendrų aspektų, tačiau rezultatai yra visiškai skirtingi. Virtuali realybė, kaip rodo pavadinimas, yra virtuali aplinka, kurioje vartotojo pojūčiai yra stimuliuojami kompiuterio sukurtais vaizdais, tuo tarpu papildyta realybė sukuria sąveiką tarp realios aplinkos ir virtualių objektų [4]. Tam tikra prasme, papildyta realybė gali būti laikoma virtualios realybės subkategorija [5].

Mišri realybė (MR) yra naujausia vaizdinė technologija. Literatūroje įprasta vartoti šį terminą, kai kalbame apie technologijas, kuriose virtualus turinys sąveikauja su vartotojais ir realiu pasauliu [6]. Tai panašu į papildytą realybę, tačiau mišrios realybės sistema rodo holografinį vaizdą, sukurtą iš radiologinių vaizdų (kompiuterinės tomografijos (KT) arba magnetinio rezonanso tomografijos (MRT)) realioje aplinkoje [7]. Holografinis vaizdas yra sudėtinis šviesos bangų laukas, kuris suteikia stebėtojui galimybę matyti 3D vaizdą lygiai tokį patį, kaip ir tikrovėje [8]. Pagrindinis mišrios realybės bruožas yra galimybė suderinti virtualias vizualizacijas su paciento individualia informacija [9]. Pavyzdžiui, idealus gydymo rezultatas gali būti parodytas pacientui ar gydytojų komandos nariams: įvairūs protezavimo virtualūs vaizdai būtų įvertinti realiu laiku pacientui sėdint odontologinėje kėdėje [10]. Taigi, ši technologija yra nauja galimybė efektyviau gydyti pacientus.

Kadangi virtualūs objektai yra atkuriami naudojant tris erdvės matmenis bei vartotojo ir paciento judesius, labai svarbus tikslumas. Tam naudojami sekikliai (angl. *trackers*), kurie turi

didelę įtaką geresnio rezultato pasiekimui. Taip pat, kalibracija (angl. *calibration*) yra reikšmingas procesas, norint tinkamai naudoti tokias technologijas. KT ir MRT duomenų taškai iš paciento vaizdo duomenų turi būti sujungti su taškais realybėje į tas pačias erdvines koordinates. Labai svarbu, jog registracijos procesas būtų tikslus, reikalautų mažai laiko ir nesukeltų žalingo šalutinio poveikio pacientui [4].

Apibendrinant galima pasakyti, kad PR ir MR apima skaitmeninio turinio vizualizavimą realiame pasaulyje, tačiau MR leidžia skaitmeniniam turiniui sąveikauti ir reaguoti į realaus pasaulio aplinką realiuoju laiku. Ši tema prieštaringa, nes tai yra neseniai atsiradusi technologija, kurios panaudojimo galimybėmis tiki ne visi, tačiau šis vaizdavimo metodas turi didelį potencialą odontologijoje. Kadangi tai pakankamai nauja tema, akivaizdu, kad yra ribotas tyrimų skaičius apie holografinių vaizdų projekcijas ant dantų modelių galimybes.

2.1. Tyrimo tikslas

Įvertinti holografinių vaizdų projekcijų ant dantų modelio galimybes naudojant skirtingus sekiklius.

2.2. Tyrimo uždaviniai

1. Pamatuoti ir įvertinti holografinių vaizdų projekcijas naudojant skirtingus sekiklius ant dantų modelio.
2. Palyginti holografinių vaizdų tikslumą naudojant skirtingus sekiklius.
3. Palyginti holografinių vaizdų preciziškumą naudojant skirtingus sekiklius.

2.3. Tyrimo hipotezė

1. Kampas tarp kalibravimo metu pažymėtų taškų pozicijų ir fiksuotų taškų pozicijų hologramoje (virtualiame dantų modelyje) plokštumų yra reikšmingas tikslumui.
2. Sukurtas „L“ formos sekiklis yra tikslesnis nei „Navident“ sekiklis.

3. LITERATŪROS APŽVALGA

Skaitmeninės programos šiandien plačiai naudojamos visose dantų medicinos srityse, todėl 3D vaizdavimas rodo didelį potencialą ir sulaukia vis daugiau dėmesio [11]. Atsiradus KT, 3D veido vaizdavimui ir skaitmeniniam modelių nuskaitymui, padidėjo 3D skaitmeninio vaizdo panaudojimas, tačiau ribas plečia galimybė 3D objektų failus vizualizuoti kaip hologramas [12, 13]. Holograma saugo visą informaciją apie virtualaus objekto išskleidžiančias šviesos bangas. Pirmieji pranešimai apie ankstyvąją holografinę technologiją datuojami XIX amžiuje, bet tik pastaruoju metu sparčiai ir įvairiapusiškai vystoma ši technologija, kuri duoda daug vilčių medicinoje, nes leidžia perteikti sudėtingas struktūras [14]. Literatūros apžvalgoje pristatysiu pagrindinius elementus, leidžiančius naudoti holografinių vaizdų projektavimo galimybes klinikinėje praktikoje: mišrią realybę, papildytos realybės įrenginius, duomenų paruošimą, sekiklius ir kalibraciją.

3.1. Mišri realybė

Mišri realybė (MR) yra nauja holografinė technologija, kuri sujungia virtualios realybės ir papildytos realybės (PR) ypatybes [15]. Bet koks 3D modelis, pavyzdžiui, galimos rekonstrukcijos protezų dizainas, gali būti papildytas individualiais paciento duomenimis, kad būtų galima iš anksto imituoti įvairius būsimus rezultatus be jokių atliekamų intervencijų [16]. Šiuos skaitmeninius modelius galima peržiūrėti realiu laiku ir palengvinti bendravimą ne tik su pacientu, siekiant išsiaiškinti sudėtingus gydymo etapus, bet ir tarp specialistų, kad gydymas būtų nuspėjamas ir efektyvesnis. Ateityje galimybės toliau augs ir palengvins kasdienybę, nes patobulinus tikslumą, šią technologiją galima būtų naudoti per pačias intervencijas [17, 18]. Šiuo metu ši technologija labiau naudojama pasiruošimo etape: gydytojai turi galimybę peržiūrėti ir išnagrinėti individualią paciento organų ir audinių sandarą. Tai chirurgui padeda greičiau ir aiškiau perprasti sudėtingus struktūrinius ryšius, parengti geresnę ir saugesnę operacijos planą. Taip buvo atlikta viršutinio žandikaulio Le Forte I osteotomija ir patikrintas prieš operacinio planavimo tikslumas, kai naudojama MR su sekikliais ir „HoloLens 2“ akiniais. Sekiklis buvo prijungtas prie antkaulio tol, kol buvo patvirtinta, kad viršutinio žandikaulio padėties perkėlimas yra toks, koks buvo nurodytas atliekant virtualią operaciją su „HoloLens 2“ akiniais. Visų apskaičiuotų taškų XYZ ašyse nuokrypio intervalas buvo nuo 2,93 mm iki 3,93 mm. [18]. Taigi, atliekant tolimesnius tyrimus, MR turi galimybę pagerinti įvairių intervencijų efektyvumą.

3.2. Įrenginiai, skirti atvaizduoti papildytąją realybę

PR atvaizduoti yra skirti keli plačiajai rinkai pasiekiami variantai: „Magic Leap 1“ (Plantation, Florida, JAV), „Hololens“ (Microsoft, Redmond, WA) ir „Hololens 2“ (Microsoft, Redmond, WA) įrenginiai bei išmanūs telefonai, kurie yra populiariausi papildytosios realybės atvaizdavimo prietaisai. Visgi, išmanūs telefonai nėra tinkami medicininiam tikslams dėl savo mažo ekrano dydžio bei trūkstanto interaktyvumo [19]. „Microsoft HoloLens“, išleistas 2016 m., buvo vienas iš pirmųjų įrenginių, įdiegusių PR komerciniu mastu ir suteikė galimybę biomedicinos sričiai plėsti šią technologiją [20]. Vėlesnis „HoloLens 2“ su padidintu matymo lauku (52°), mažesniu svoriu (566 g) ir pailgėjusiu akumuliatoriaus veikimo laiku (3 val.), buvo išleistas 2019 m. lapkritį [21]. „HoloLens 2“ procesorius yra integruotas ir nėra jokios papildomos įrangos, išskyrus pačias ausines, skirtingai nei „Magic Leap 1“, kurios navigacija priklauso nuo nuotolinio valdymo pulto. Abiejuose įrenginiuose yra puikūs procesoriai ir grafikos apdorojimas (angl. *Graphic Processing Unit*), tačiau „HoloLens 2“ įrenginys taip pat aprūpintas funkcijomis, kurios įrenginyje vykdo visus kompiuterinio matymo algoritmus (galvos sekimą, rankos sekimą, akių žvilgsnio sekimą, erdvinį žemėlapių sudarymą ir pan.) [6]. Šios visos savybės yra reikalingos siekiant sukurti sistemą, kuri realiu laiku galėtų sekti paciento burnos poziciją, siekiant suprojektuoti virtualų vaizdą. [20] Taigi, šiuo metu vienas pažangiausių ir labiausiai deramas medicininiam pritaikymui yra laikomas „HoloLens 2“ įrenginys.

3.3. Duomenų paruošimas

Skaitmeninis vaizdavimas ir komunikacija medicinoje (angl. *Digital Imaging and Communications in Medicine*, DICOM) yra pirmaujantis medicininį vaizdų informacijos srities standartas visame pasaulyje. 3D spausdinimas iš DICOM vaizdų tapo paprastesnis tobulėjant technologijoms, tokioms kaip medicinos inžinerija, vaizdo gavimo inžinerija, ir tobulėjant bei mažėjant aparatinės ir programinės įrangos sąnaudoms. Pacientams būdingi 3D modeliai dabar naudojami daugelyje situacijų burnos ir žandikaulių chirurgijos srityse, įskaitant švietimą, chirurginį planavimą ir operacijų rezultatų vizualinį nuspėjimą [22, 23, 24, 25]. Hologramos vaizdavimui reikia apdoroti DICOM vaizdus. Šis etapas susideda iš trijų dalių: vaizdo segmentavimas ir virtualaus turinio ruošimas, vaizdo projektavimas bei MR pritaikymas. Viena iš tyrimų procesas prasideda nuo KT angiografijos duomenų gavimo paciento blauzdoje. Tiriamos kojos anatomicinės sritys buvo suskirstytos naudojant dviejų taškų krypties dalelių sekimo mikrorheologijos (angl. *two-point directional particle tracking microrheology*, D2PTM (3D Systems Inc., Rock Hill, SC, JAV)) programinę įrangą: kaulai, arterinės kraujagyslės ir kojų oda.

D2PTM - atskiras modulinis programinės įrangos paketas, skirtas atlikti ir sujungti visus 3D modelio rengimo veiksmus vienoje darbo vietoje. Tada iš visų segmentuotų vietų sugeneruojami 3D tinkeliai ir išsaugoti stereolitografijos (STL) formatu [26]. STL yra failo formatas, dažniausiai naudojamas 3D spausdinimui ir vaizdų projektavimui kompiuterio pagalba. [27] Vaizdo projektavimui reikalingas programinės įrangos sukūrimas. Naudojant „HoloLens 2“ yra galimi keli pasirinkimai. „Microsoft“ pateikia programavimo technologijų palyginimą, iš kurio galima pastebėti, kad „Unity 3D“ („Unity Technologies“, San Franciskas, Kalifornija, JAV) technologija yra tinkamiausia naujos sistemos kūrimui, nes leidžia manipuluoti daugiausia įrenginio funkcijų: duomenis galima pateikti/manipuluoti gestais, akies žvilgsniu arba balsu, palaikomas garsas, aptinkamas QR kodas ir kt. Taip pat, ji palaiko teikiamas „HoloLens 2“ programinės įrangos kūrimo bibliotekas [19]. Gauti virtualūs blauzdos modeliai buvo importuoti į „Unity 3D“ programinę įrangą, papildytą specialiu programinės įrangos kūrimo rinkiniu, skirtu PR programėlėms kurti („Vuforia Engine“ paketas, PTC, Inc., Bostonas, MA, JAV) [28]. „Vuforia Engine“ programinė įranga gali padėti tyrėjams, studentams ar gydytojams, neturintiems informacinių technologijų įgūdžių, lengvai sukurti PR programėlę patogiu būdu ir naudoti ją įvairių organų vizualizacijoms bei lokalizacijoms. Tai leidžia plačiai panaudoti šią technologiją įvairioms medicinos reikmėms [29]. Taigi, hologramos vaizdavimui reikia atrasti programinę įrangą, kuri apdorotų DICOM failus ir automatiškai susegmentuotų juose saugomą dantų informaciją, ir kitą, kurios pagalba būtų galima tai pavaizduoti 3D forma.

3.4. Sekiklis

Sekimas yra reikalingas tam, kad pacientui pasislinkus, holograma laikytųsi savoje vietoje [30]. Sekimo metodas, naudojant tik įtaisyta priekinę kamerą MR akiniuose, negali atitikti klinikinio tikslumo reikalavimų, todėl alternatyva yra sekiklio įtraukimas [31]. Literatūroje aprašomi atvejai ir naudojami sekikliai labai priklauso nuo konkretaus paciento, naudojamos įrangos ir technologinių resursų [32]. Naudojant „HoloLens 2“ ir „Vuforia Engine“, buvo pasirinktas 3D natūralaus dydžio (300 mm) sekiklis, t. y. pats tiriamas objektas. Norint įvertinti registracijos paklaidą, buvo lyginamas pagal paciento duomenis atspausdintas 3D blauzdos profilis ir virtualusis 3D blauzdos profilis, projektuojamas kaip holografinis vaizdas. Buvo pasiektos registracijos paklaidos X ir Y ašyse (2.7 ± 1.2 mm; 4.2 ± 2.4 mm) [26]. Kitas sekiklio pavyzdys - 3D atspausdintas registracijos kubas, kurio kraštinės ilgis yra 60 mm (WEILAI 8000 derva, Shenzhen Wenext Technology Co., Ltd, Kinija). Trijuose matomuose registracijos kubo paviršiuose buvo skirtingos formos įdubimai, o ant nematomo paviršiaus buvo pritvirtintas elektromagnetinis jutiklis (Aurora Mini 6DOF Sensor 610029, Northern Digital Inc., Kanada).

Buvo pasiekti X, Y ir Z kryptimis nuokrypiai: 1.55 ± 0.27 mm, 1.71 ± 0.40 mm ir 2.84 ± 0.78 mm. [31]. 3D dvejomis kontrastingomis spalvomis spausdintas sekiklis buvo panaudotas neurologijos srityje – neuronavigacijoje [33]. Tai – vaizdu valdoma kompiuterinė neurochirurgijos sritis, kurioje KT ar MRT duomenis galima perkelti į operacinę lauką [34]. Holografiniai vaizdai buvo pritaikyti matymui mobiliuosiuose įrenginiuose, naudojant papildytos realybės šviesos aptikimo ir nuotolio (angl. Light Detection and Ranging, LiDAR) kamerą. Su paciento KT ir MR vaizdais buvo sukurtos 3D intrakranijinių navikų segmentacijos, atlikta priešoperacinė žymens ir patologijos registracija. Nustatyta, kad mobiliojo įrenginio LiDAR kamera sėkmingai perdengia virtualių naviko segmentų vaizdus pagal 3D spausdinto sekiklio padėtį. Išmatuota taikymo paklaida svyravo nuo 0,5 iki 3,5 mm (vidurkis $1,70 \pm 1,02$ mm, mediana 1,58 mm) [33]. Sekiklis buvo naudojamas ir dinaminės navigacijos sistemoje „Navident“ (Toronto, Canada, 2015), kuri leidžia odontologui iš anksto suplanuoti ir paruošti dantų implantacijos planą, kuris yra išsaugojamas sistemoje ir vėliau naudojamas operacijos metu. Operacijos metu sistema realiu laiku padeda odontologui nustatyti, kur turėtų būti atliekamas grežimas skirtas naujo dantų implanto įtvirtinimui. Šio proceso metu vaizdas matomas kompiuterio ekrane sekant odontologo grąžtą, prie kurio yra pritvirtintas sekiklis ir nuolatos atvaizduojant informaciją apie dabartinę grąžto poziciją erdvėje ir nuokrypį nuo suplanuotos procedūros vietos. Kaip teigia tiek paties „Navident“ kūrėjai [35], tiek ir kiti moksliniai straipsniai, sistema veikia tiksliai 0.7 – 1 mm pozicijos ir 4° pasisukimo paklaidos ribose [36, 37, 38]. Apibendrinus, galima teigti, kad naudojant sekiklį pasiekiamas geresnis tikslumas. Remiantis literatūroje pateikta informacija, galima teigti, kad sekiklio rekomenduojamos savybės yra kuo mažiau pasikartojantys vaizdai paviršiuose, kampuočumas, spalvų kontrastingumas.

3.5. Sekiklio atpažinimas ir sekimas

Norint įtraukti sekiklį, jį reikia užregistruoti tam, kad MR įrenginys jį atpažintų. Sekimo algoritmas ir registracija tarp virtualaus turinio ir realios aplinkos gali būti įgyvendinta naudojant modelio taikinio (angl. *model target*) funkciją. Šis būdas leidžia apmokyti objektų atpažinimą pagal objekto 3D modelį, jei turime jo STL failą [26]. Taip pat, yra kita sekiklio atpažinimo ir sekimo technologija – objekto taikiklis (angl. *object target*). Naudojant šią technologiją, sekiklis yra nuskenuojamas telefono pagalba ir yra surenkami įvairūs objektą apibūdinantys sekimo taškai [39]. Taigi, galimi du sekiklio registracijos būdai, kurie padeda jį atpažinti ir sekti.

3.6. Kalibracija

Realizavus sekiklio atpažinimą ir sekimą, pereinama prie esminio veiksmo hologramų tikslumui – kalibracija. Tai yra gautų paciento anatomijos duomenų erdvinis suderinimas su realia aplinka [40]. Procesas paprastai susideda iš dviejų etapų. Pirmasis etapas – registracija. Registracija yra svarbiausia MR technologijos techninė grandis, kuri tiesiogiai lems sėkmę [41]. Pradinės registracijos metu nustatoma kompiuteriu sukurto modelio vieta realioje aplinkoje [42]. Registracija realiuoju laiku gali padėti pagerinti gydytojo veiksmus ne tik prieš intervencijas, bet ir jų metu. Šis registracijos metodas yra pagrįstas rankiniu žymekliu, kuris yra naudojamas nustatyti identifikavimo taškus hologramoms ant realių objektų. Tada kamera akiniuose identifikuoja vaizdą. Literatūroje rašoma, jog registracijos metu gydytojas turi laikyti žymeklį ir jį suderinti su iš anksto nustatytais virtualiais taškais PR įrenginio sistemoje. Dažniausiai naudojami keturi arba penki registracijos taškai siekiant sumažinti atsitiktines klaidas [19]. Jei tiriamojoje vietoje yra akivaizdžių anatominių ypatybių arba dirbtinių dėmių, rankinis registravimo metodas yra priimtinesnis [43]. Tokios technikos pavyzdys buvo pademonstruotas tyrime, kuriame buvo tiriamas 3D vaizdo naudojimo efektyvumas operacijose. Kalibravimas buvo atliktas gydytojui žymint taškus ant paciento galūnės. Šeši atvejų tyrimai parodė teigiamus rezultatus, nes sutrumpėjo operacijos ir atitinkamai bendrinės neįtautos laikas [28]. Vienos operacijos metu kaulo gręžimo laikas sumažėjo 52,1% naudojant „HoloLens 2“ bei aprašytą kalibravimo būdą [31]. Kitas galimas kalibravimo būdas – automatinis. Automatiškai būdu taškai išrenkami 3D modelį suskirstant į mažus stačiakampius gretasienius (į 400 stačiakampių gretasienių) ir išrenkant aukščiausiai esančius taškus kiekviename stačiakampio gretasienio apibrėžtame tūryje. Atlikus šių taškų radimą yra išrenkami 4 aukščiausi taškai esantys iš anksto nurodytose eilėse ir nurodytoje dantų lanko pusėje. Antras etapas – hologramos vaizdavimas. Šiuo procesu siekiama rasti optimalų apskaičiavimą nuo „HoloLens“ koordinatės iki užregistruotų taškų koordinačių, ant kurių projektuojasi holograma. Po kalibracijos jau vyksta sekimas: vadovaujant optinei sekimo sistemai, virtualus objektas dinamiškai keičia vietą, kai juda realus objektas, pavyzdžiui, žmogus [43]. Taigi, norint, jog holograma atsidurtų tinkamoje vietoje ir būtų palaikomas jos sekimas, reikalinga kalibracija.

Viską apibendrinus galima teigti, kad PR ir MR panaudojimas yra platus, tačiau nedidelis skaičius atliktų tyrimų skatina toliau domėtis kaip pagerinti hologramų vaizdavimą naudojant MR technologiją.

4. MEDŽIAGOS IR METODAI

4.1. Tiriamojo darbo tipas

Ekspirimentinis tyrimas.

4.2. Prietaisas

Hologramų projekcijoms peržiūrėti ir vertinti naudojami „Microsoft“ akiniai „HoloLens 2“ (1 pav.).



1 paveikslas. „HoloLens 2“ akiniai. [45]

4.3. Programinė įranga

- Python(3.9) – statistiniams skaičiavimams, duomenų bei objektų vizualizavimui.
- Solidworks (Dassault Systèmes, Vélizy-Villacoublay, France) – sekiklių modeliavimui.
- Unity 2020.3.17 + Mixed Reality Toolkit + Vuforia Engine 10.5 – hologramų vaizdavimo sistemos sukūrimui.

4.4. Objektų gamyba

Objektai spausdinti 3D spausdintuvu iš šviesiai rudos dervos (DentaMODEL™, Asiga, Sydney, Australia).

4.4.1. Dantų lanko modelio gamyba

Viršutinio žandikaulio KT vaizdas buvo suformuotas kaip DICOM atvaizdas. Jis buvo išsaugotas STL formatu ir atspausdintas 3D spausdintuvu (2 pav.).



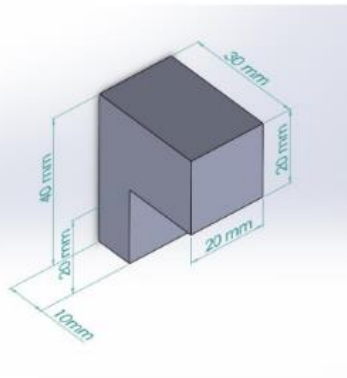
2 paveikslas. Tyrime naudotas viršutinio žandikaulio dantų modelis.

4.4.2. Sekiklių gamyba ir atpažinimas

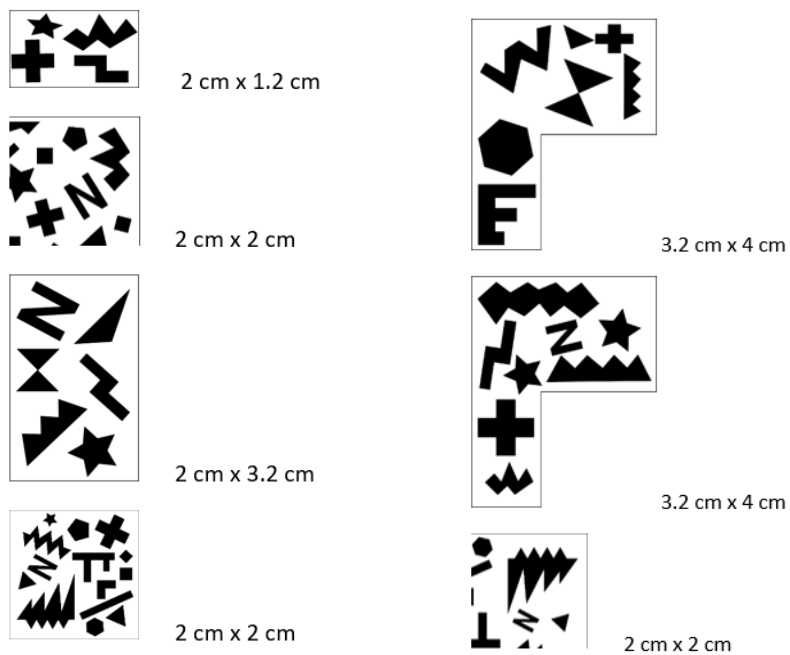
- a) Laikiklio gamyba: prie dviejų priekinio vedimo technikai naudojamų įkandimo plokštumų pritvirtinta 3,6 cm metalinė viela.
- b) Prie vieno laikiklio su savaime kietėjančiu kompozitu pritvirtintas „Navident“ sekiklis (3 pav.).
- c) Prie kito laikiklio su savaime kietėjančiu kompozitu pritvirtinta „L“ formos figūra, kurios išmatavimai yra žinomi (4 pav.). Ji atspausdinta 3D spausdintuvu ir padengta lipdukais su kontrastingais raštais, skirtais atpažinimui ir sekimui (5 pav.)
- d) Sekikliai su laikikliais tvirtinami ant dantų lanko modelio toje pačioje vietoje naudojant vinilo polisiloksano sąkandžio registrą.



3 paveikslas. „Navident“ sekiklis

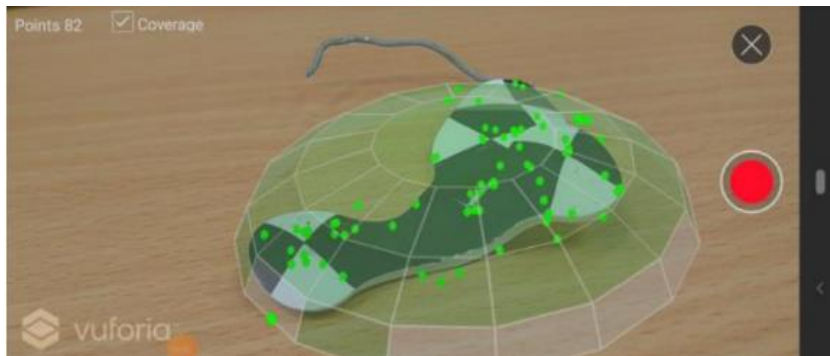


4 paveikslas. „L“ formos sekiklis (kairėje) ir jo matmenys (dešinėje).



5 paveikslas. Kontrastingų raštų lipdukai, klijuoti ant „L“ formos sekiklio.

Paruošus sistemos projektą, sekiklių atpažinimui buvo naudota „Vuforia“ bibliotekos objekto taikinių technologija. Sekikliai buvo nuskenuoti telefono pagalba ir taip surinkti įvairūs jį apibūdinantys sekimo taškai (6 pav.). Nuskenuoto objekto informacija buvo išsaugota .od plėtinio faile, kuris buvo įkeliamas į programinės įrangos kūrimo įrankį „Vuforia Developer Portal“ ir ten apmokomas įkelto objekto atpažinimas. Ta informacija yra išeksportuojama kaip „Unity“ paketas, kuris įkeliamas į sistemos projektą.



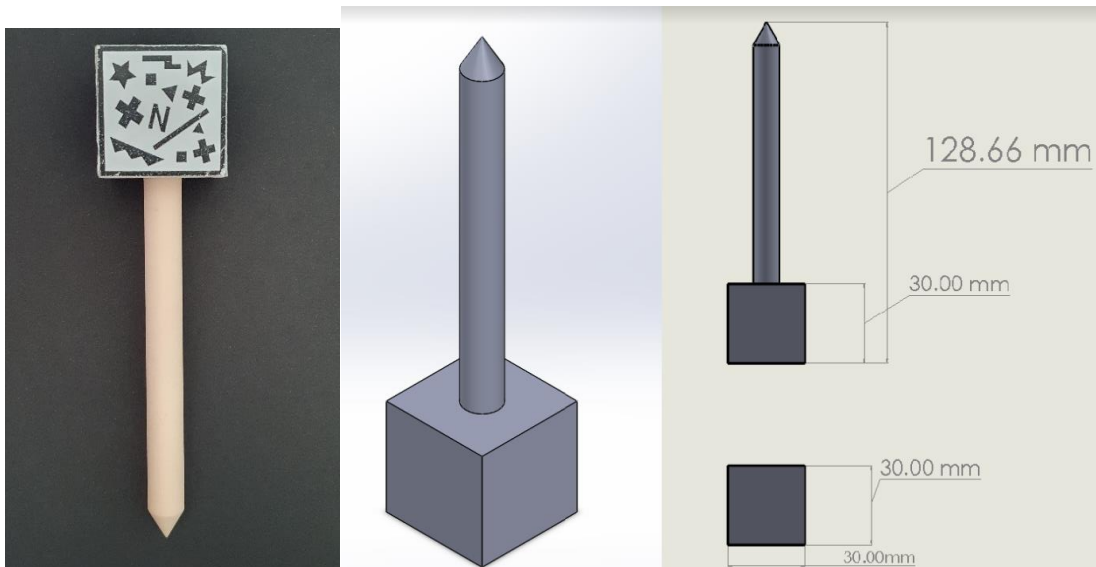
6 paveikslas. „Navident“ sekiklis su atpažinimo taškais naudojant „Vuforia“ bibliotekos objekto taikinio technologiją.

4.5. Kalibracija

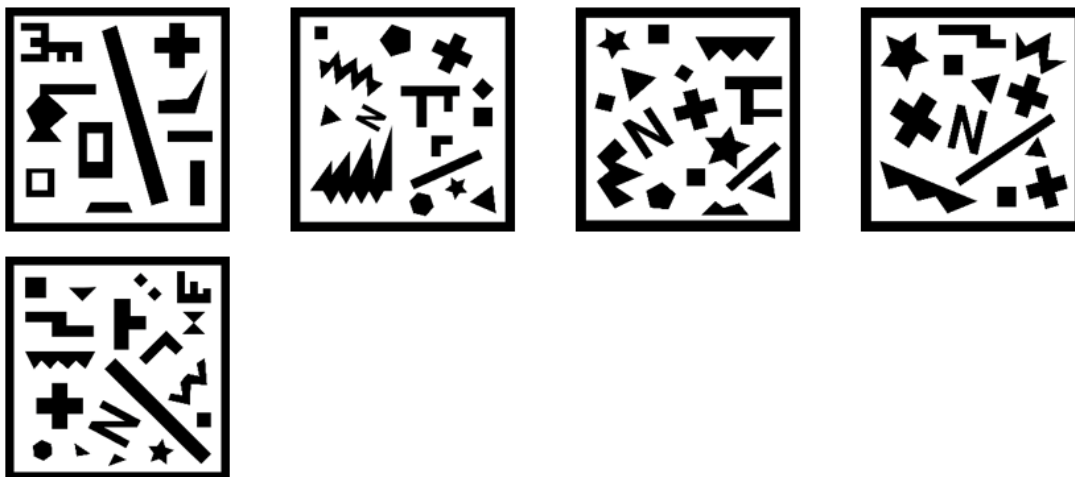
Kalibracija atliekama rankiniu būdu.

4.5.1. Kalibravimo pieštuko gamyba

Kalibravimo taškams pažymėti sukurtas pieštukas, kurio visi išmatavimai yra žinomi (7 pav.). Jis atspausdintas 3D spausdintuvu. Pieštuko kubas (3x3x3 cm) buvo padengtas lipdukais, turinčiais kontrastingus raštus, skirtus jo atpažinimui ir sekimui (8 pav.). Pieštuko atpažinimas ir sekimas buvo apmokytas pasitelkiant modelio taikinio technologiją.



7 paveikslas. Kalibracijos pieštukas (kairėje) ir jo matmenys (dešinėje).



8 paveikslas. Kontrastingų raštų lipdukai, klijuoti ant kalibracijos pieštuko kubo.

4.5.2. Kalibracijos pradžia

Vienas iš sekiklių uždedamas ant dantų modelio. Užsidėjus „Microsoft HoloLens 2“ akinius įjungiami programėlė, kurioje matoma lentelė su galimomis funkcijomis.

- a) Renkamės norimą sekiklį iš dviejų programėlėje. Pasirinkus sekiklį, jis turi būti akinių matymo lauke ir laukiame, kol bus atpažintas. Tam, kad įsitikintume, jog sekiklis sekamas, turime matyti baltą kubelį šalia sekiklio.
- b) Programėlėje renkamasi kalibracijos funkcija. Kalibracijos būdas rankinis, todėl paimame kalibracijos pieštuką ir jį laikome matymo lauke tol, kol akiniai atpažįsta. Kalibracijos pieštukas atpažintas, kai matome, jog aplink pieštuką susidaro baltas holografinis kontūras.

4.5.3. Kalibravimo taškų pažymėjimas

Ijungus kalibravimo pieštuko sekimą, įjungiamas kalibravimo taškų žymėjimo gidas, kuris rodo kokį tašką reikia pažymėti. Naudotojas su kalibravimo pieštuku pažymi reikiamą kalibravimo tašką ir pasako balso komandą „Save“. Kai ši komanda yra atpažįstama, taško pozicijos informacija yra surenkama ir išsaugoma, t. y. atraminiai taškai yra surišami su tais pačiais taškais virtualioje erdvėje. Išsaugojus informaciją, parodoma sekančio kalibravimo taško pozicija žymėjimo gide. Keturi atraminiai taškai pažymimi dantų paviršiuose nurodyta tvarka: 17 danties centrinė duobutė, 16 danties centrinė duobutė, 15 danties distalinė duobutė ir 27 danties centrinė duobutė (9 pav.). Pažymėjimo ir išsaugojimo žingsniai iš viso kartojami 4 kartus, kol visų kalibravimo taškų informacija yra surenkama ir išsaugoma.



9 paveikslas. Atraminiai taškai, žymimi kalibracijos metu.

4.5.4. Kalibravimo pabaiga

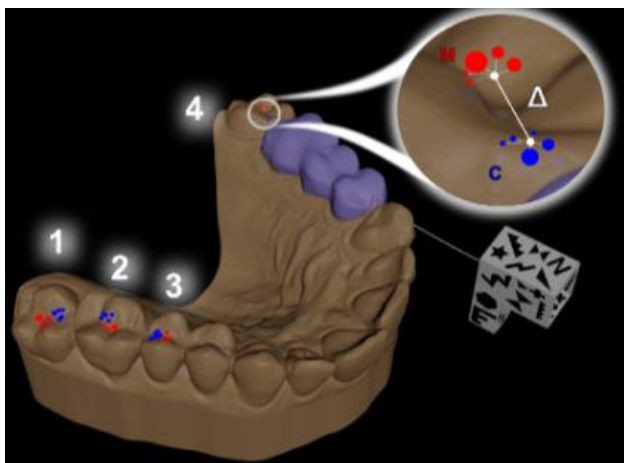
Pažymėjus paskutinį atraminį tašką yra atliekamas 3D modelio kalibravimas ir holograma atsiduria ant realaus dantų modelio. Procesas yra užbaigiamas nustojant sekti kalibravimo pieštuką ir išjungiant žymėjimo gidą.

4.6. Kalibravimo įvertinimui atliekamas tyrimas

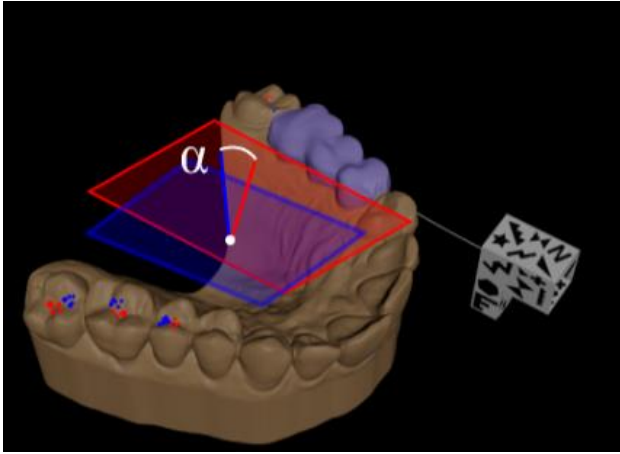
„Navident“ dinaminės sekimo sistemos sekiklis buvo naudojamas kaip kontrolinė grupė, skirta palyginti su „L“ formos sekikliu.

- a) Atliekami pasikartojantys bandymai (20 kartų), surenkant duomenis:
 - 1) kalibravimo taškų koordinates ant virtualaus paviršiaus;
 - 2) kalibravimo pieštuko taškus ant realaus paviršiaus;
 - 3) sekiklio charakteringųjų taškų koordinates;
 - 4) „Hololens 2“ įrenginio judėjimą.
- b) Surinkti duomenys apdorojami, skaičiuojant/atvaizduojant:
 - 1) Kalibravimo pieštuko taškų išsibarstymą (10 pav.):
 - Tarpusavio išsibarstymas vidurinio imties taško atžvilgiu;
 - Atstumai nuo modelio kalibravimo taškų išsibarstymo.
 - 2) Modelio ir kalibravimo plokštumų normalių kampą (11 pav.);
 - 3) Modelio, kameros ir dantų lanko kalibracijos taškų atstumai nuo pradžios taško. Pradžios tašku laikoma Hololens 2 įjungimo metu fiksuojamas koordinačių pradžios taškas (0,0,0).

Kalibravimo metu gautos keturių taškų pozicijos. Virtualaus dantų modelio ir registruotų taškų pieštuku preciziškumas apibūdinamas kaip svyravimas aplink jų vidurkį. Absoliuti paklaida tarp šių dviejų taškų vidurkių žymima Δ (10 pav.). Kampas tarp šių taškų plokštumų normalių žymimas α (11 pav.).



10 paveikslas. Kalibravimo taškų išsibarstymo surinkimas. Kalibravimo pieštuko taškai žymimi mėlyna spalva (C), virtualaus dantų modelio taškų išsidėstymas žymimas raudona spalva (M). Balti taškai (Δ) – absoliuti taškų paklaida.



11 paveikslas. Plokštumų kampo (α) grafinis vaizdavimas. Mėlynos spalvos plokštuma apibrėžta keturiais kalibravimo taškais, raudonos spalvos plokštuma – keturiais taškais fiksuotais po kalibravimo virtualiame dantų lanke.

4.7. Statistinė analizė

Statistiškai reikšmingam skirtumui įvertinti tarp „Navident“ ir „L“ tipo sekiklių kalibravimo preciziškumo rezultatuose kiekvienoje pozicijoje pasirinktas neparametrinis Mann-Whitney U testas. Atstumui tarp taškų ir skirtumui tarp dantų lanko plokštumos ir sekiklio plokštumos susidariusių kampų vidurkių vertinimui pasirinktas Stjudento t testas. Normaliam duomenų pasiskirstymui buvo įvertintas Šapiro-Vilko testas, dispersijų homogeniškumui vertinti buvo pasitelktas Leveno testas. Visų testų $\alpha=0.05$. Duomenys buvo apdorojami naudojant Python(3.9).

5. REZULTATAI

„Navident“ ir „L“ formos sekiklių kalibravimo laikai pateikti 1 - oje lentelėje. Vidutinis kalibravimo laikas „L“ formos sekiklio atveju 34 sekundėmis trumpesnis lyginant su „Navident“ sekikliu. Sekiklių kampų tarp pažymėtų taškų pozicijų ir fiksuotų taškų pozicijų hologramoje plokštumų normalių dydžiai pateikti 2 – oje lentelėje. Naudojant „Navident“ sekiklį vidutinė kampo tarp plokštumų vertė yra 5,06 laipsniais su standartiniu nuokrypiu (SN) 5,64 laipsniais didesnė nei naudojant „L“ formos sekiklį. Įvertinus stjudento t kriterijaus p reikšmę (0,041), stebėta, kad abiejų sekiklių kampų vidutinės reikšmės yra statistiškai reikšmingos. Visi atstumai tarp taškų yra statistiškai reikšmingi ($p<0,05$).

Sekiklis	Laikas, s
„Navident“	119(52)
„L“ formos	85(38)

1 lentelė. Kalibravimo atlikimo laiko vidurkis ir standartinis nuokrypis

Sekiklis	Kampas, °
„Navident“	15,53(9,71)
„L“ formos	10,45(4,07)

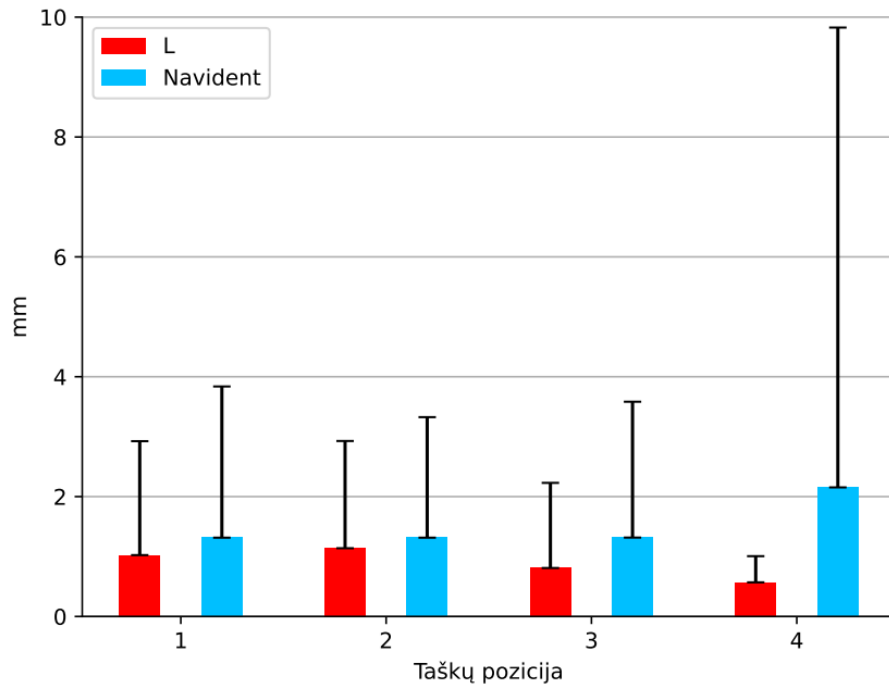
2 lentelė. Kampų tarp plokštumų vidurkis ir standartinis nuokrypis

Taškų pozicijos	1	2	3	4
P reikšmė	0,003	0,0001	0,011	0,008

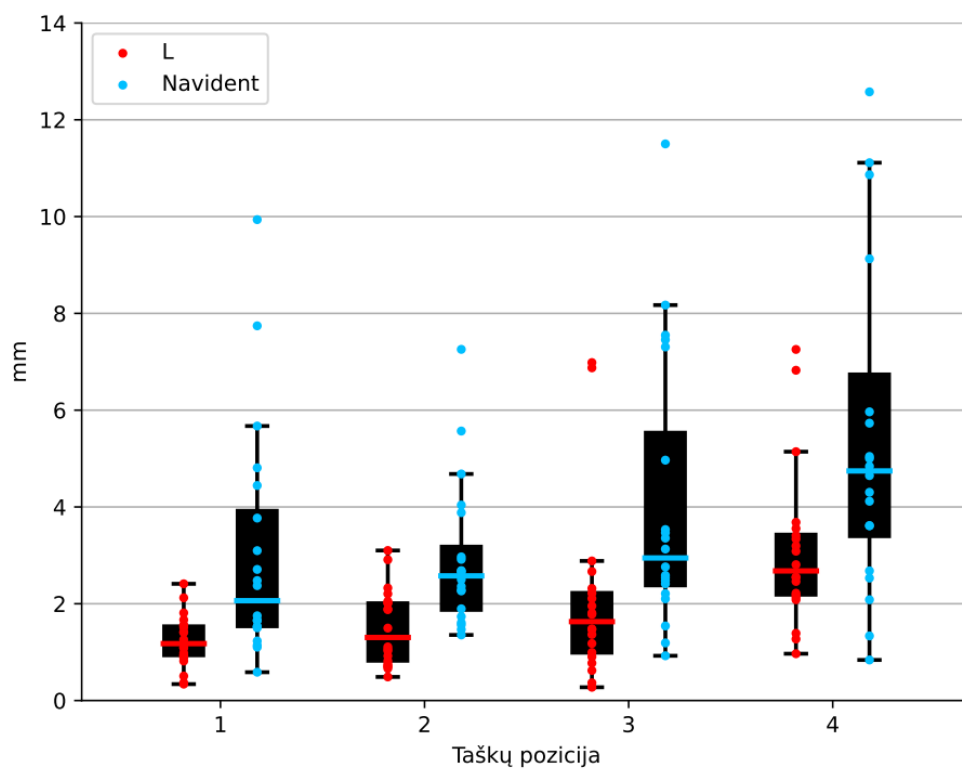
3 lentelė. Atstumų tarp taškų p reikšmės (Stjudento t kriterijaus rezultatai)

Įvertintos pieštuko svyravimo kalibravimo metu vidutinės reikšmės keturiose taškų pozicijose atvaizduotos 12 paveiksle. „L“ formos sekiklio rezultatų vidutinė reikšmė kiekvienoje taškų pozicijoje mažesnė lyginant su „Navident“ sekikliu. Tiksliausias taško vidurkis (0,57 mm) su mažiausiu SN (0,44 mm) yra ketvirtasis naudojant „L“ formos sekiklį, o didžiausią taškų preciziškumo vidurkį (2,15 mm) ir SN turi ketvirtasis taškas (7,67 mm) naudojant „Navident“ sekiklį.

Atstumai tarp kalibravimo pieštuko ir virtualaus dantų lanko atitinkamai nuo pirmojo iki ketvirtojo taško pozicijos didėja naudojant abu sekiklius (13 pav.). Su „Navident“ sekikliu atstumai kiekvienoje taško pozicijoje didesni nei „L“ formos sekiklio. Taip pat, naudojant „Navident“ sekiklį pastebimas duomenų išsibarstymo didėjimas nuo pirmojo iki ketvirtojo taško pozicijų.



12 paveikslas. Kalibravimo taškų preciziškumo vidurkis ir standartinis nuokrypis.



13 paveikslas. Atstumai tarp kalibravimo pieštuko ir virtualaus dantų lanko taškų kiekvienoje pozicijoje po kalibravimo.

6. REZULTATŲ APTARIMAS

MR yra vis sparčiau auganti bei turinti platų potencialą odontologijos ir medicinos srityje. Dėl tam tikrų medicininių intervencijų retumo bei kompleksiško, įvairių specialistų gydytojais susiduria su sunkumais jų vykdyme. Kiekvieno paciento organų struktūra skirtinga, todėl tai kelia dar didesnius iššūkius medicinos gydytojui. Galimybė operacijos metu peržiūrėti ir išnagrinėti organų ir audinių sandarą padėtų greičiau ir aiškiau perprasti sudėtingus struktūrinius ryšius ir leistų parengti geresnį ir saugesnį operacijos planą. [44]

Didelis dėmesys skirtas naujo sekiklio sukūrimui, kalibravimo procesui bei šių dviejų aspektų priklausomybei vienai nuo kitos. Iš tirtų sekiklių geriausiai veikė „L“ formos kontrastingas sekiklis, kurio sekimas buvo pastovus ir sukamųjų judesių sukelti nuokrypiai buvo minimalūs. Naudojant „Navident“ sekiklį kartais įvykdavo vizualiai matomas hologramos atsitiktinis padėties pasikeitimas kalibravimo metu, nors žiūrėjimo kampas išliko pastovus. Gauti rezultatai parodė, kad „Navident“ sekiklis turi per mažai atpažinimo taškų, kai yra skenuojamas naudojant modelio taikinio technologiją. „L“ formos sekiklis turėjo daugiau atpažinimo taškų. Jo atpažinimas buvo lėtesnis, tačiau šis sekiklis buvo pastovias ir tiksliausias sekimo aspektu, dėl ko jis buvo pasirinktas kaip geresnis sekiklis. Kalibravimo pieštuko atpažinimas taip pat lėtas. Tam gali turėti įtakos spalva, nes padėjus ant kontrastingos spalvos, pavyzdžiui juodos, paviršiaus atpažinimas šiek tiek geresnis nei laikant rankoje (galimai susilieja odos spalva su objektų spalva). Kalibravimo procesas su abiem sekikliais buvo trumpas. Galima teigti, kad tai priklauso nuo objektų (kalibravimo pieštuko bei sekiklio) atpažinimo. Taip pat, kalibravimo tikslų veikimą gali riboti santykinai mažos galios „HoloLens 2“ skaičiavimo įranga, trūkstamas jutiklio tikslumas ir skiriamoji geba [19]. Atliekant kalibraciją, geresnis taškų preciziškumas yra naudojant „L“ formos sekiklį. Šis matavimas priklauso nuo kalibravimo procedūros baigties, kampo, iš kurio žiūrima į realų dantų modelį, bei virtualaus dantų modelio taškų iki sekiklio. Matuojant kampus tarp plokštumų, gauti statistiškai reikšmingi duomenys ($p=0.041$). Hologramoje taškai yra fiksuoti – jų tarpusavio atstumai nesikeičia net ir po kalibravimo, tačiau taškai, kuriuos registruojame ant realaus modelio kalibracijos pieštuku, atstumai keičiasi. Šių taškų išsidėstymas priklauso nuo pieštuko atpažinimo stabilumo, dėl to dažniausiai jie būna tik apytiksliai panašūs į virtualaus dantų lanko taškų padėtį realiame dantų lanke. Turėdami įrenginio kuo mažesnius sukamųjų judesių nuokrypius, didesnę sekiklio bei kalibracijos pieštuko atpažinimo taškų amplitudę bei preciziškesnę kalibravimo procedūrą, galime holografinius vaizdus tiksliau panaudoti realiai klinicinei odontologinei situacijai.

Tyrimų, kuriuose būtų naudojama ta pati programinė įranga kartu su panašiais sekikliais nėra. Tai yra pirmasis tyrimas, kuriame naudota „Unity“, „Mixed Reality Toolkit“ ir „Vuforia Engine“ programinės įrangos ir jų paketai, pritaikyti „Hololens 2“ įrenginiui, kartu su sukurtu „L“ formos bei „Navident“ sekikliais. „L“ formos sekiklis panašiausias dėl paviršiuje turinčių kontrastingų raštų į vieną iš sekiklių, kurį naudojo Gorkem Yavas ir kiti. Jie naudojo tą pačią programinę įrangą sistemos sukūrimui kaip šiame tyrime, tačiau skyrėsi hologramų vaizdavimo prietaisais, kuris buvo mobilusis įrenginys ir jame naudojama LiDAR kamera. Išmatuota taikymo paklaida svyravo nuo 0,5 iki 3,5 mm (vidurkis $1,70 \pm 1,02$ mm, mediana 1,58 mm). Tačiau, naudojant nešiojamus ant galvos tvirtinamus prietaisus, kaip „Hololens 2“, specialistui patogiau, nes nereikia žiūrėti į kitą ekraną [33]. Taigi, sekikliai ir jų charakteristika yra reikalingi hologramų tikslumui naudojant papildytą ar mišrią realybę.

Nors šiame tyrime galima pastebėti naudingus atradimus ir išvagas, tačiau yra kelios kryptys, kur reiktų tobulinimo. Norint panaudoti tokią atliktą MR technologiją klinikinėse situacijose, reiktų toliau gerinti kalibracijos procesą, sekiklio formą, jo montavimą ant dantų lanko, pačią programinę įrangą, siekti priimtino atraminių taškų nustatymo. Vienas didžiausių iššūkių yra tikslios kalibracijos atlikimas klinikinėje darbo vietoje. Taip pat, „HoloLens 2“ įrenginyje patobulinius įrenginio anksčiau minėtas savybes, atitinkamai patobulėtų ir hologramų projektavimas ant realių objektų. Patobulinius šiuos prietaisus odontologijoje galimi geresni klinikinės praktikos rezultatai, mažesnės sveikatos priežiūros išlaidos ir praplėstos galimybės: dantų implantacijose implanto navigacija, preparacijų paruošimas prieš protezavimą, sklandesnės dantų šalinimo procedūros, dantų šaknų kanalų gydymai ir kt. Pastaraisiais metais vis daugiau išleistų publikacijų šia tema, todėl galima teigti, kad susidomėjimas tokia technologija auga. Atliekant tolimesnius tyrimus (*in vitro* ir *in vivo*) ir patobulinius MR technologiją, būtų galima ją naudoti dar plačiau odontologijoje pačioje klinikinėje praktikoje.

7. IŠVADOS

1. Holografinis vaizdas stabilesnis naudojant sekiklį, kuris yra kampuotas, padengtas charakteringu nesikartojančių geometrinių formų juodai baltu piešiniu.
2. Kalibravimas yra svarbi procedūra holografinio vaizdo padėties ant realaus objekto tikslumui.
3. Kampas tarp kalibravimo metu pažymėtų taškų pozicijų ir fiksuotų taškų pozicijų hologramoje (virtualiame dantų modelyje) plokštumų yra reikšmingas tikslumui.

8. PADĖKA

Noriu labai padėkoti savo darbo vadovui prof. med. dr. Vygandui Rutkūnui už suteiktas galimybes susipažinti su naujausiomis technologijomis, paskatinimą, vertingus patarimus bei pagalbą, rengiant mokslinį darbą. Esu labai dėkinga Kauno Technologijų Universiteto prof. dr. Tomui Blažauskui, doc. Dariui Jegelevičiui, informatikui Karoliui Butkui bei biomedicinos inžinieriui Mykolui Akulauskui už programinės sistemos sukūrimą, indėlį tyrime, visapusišką pagalbą bei vertingus patarimus rašant mokslinį darbą.

Galiausiai, noriu padėkoti savo šeimos nariams ir draugams, kurie suteikė nepaliojamą paramą ir padrąšinimą įgyvendinant savo idėjas ir tikslus.

Interesų konfliktų nebuvo.

9. LITERATŪROS ŠARĀŠAS

1. Touati R., Richert R., Millet C., Farges J., Sailer I. & Ducret M. (2019). Comparison of Two Innovative Strategies Using Augmented Reality for Communication in Aesthetic Dentistry: A Pilot Study. *Journal of Healthcare Engineering*, 2019, 1–6. <https://doi.org/10.1155/2019/7019046>
2. Vávra P., Roman J., Zonča P., Ihnát P., Němec M., Kumar J., Habib N. A. & El-Gendi A. (2017). Recent Development of Augmented Reality in Surgery: A Review. *Journal of Healthcare Engineering*, 2017, 1–9. <https://doi.org/10.1155/2017/4574172>
3. Ayoub A. & Pulijala Y. The application of virtual reality and augmented reality in Oral & Maxillofacial Surgery. *BMC Oral Health*, 2019, 19(1). <https://doi.org/10.1186/s12903-019-0937-8>
4. Farronato M., Maspero C., Lanteri V., Fama A., Ferrati F., Pettenuzzo A. & Farronato D. Current state of the art in the use of augmented reality in dentistry: a systematic review of the literature. *BMC Oral Health*, 2019, 19(1). <https://doi.org/10.1186/s12903-019-0808-3>
5. Kwon H., Park Y., & Han J. Augmented reality in dentistry: a current perspective. *Acta Odontologica Scandinavica*, 2018, 76(7), 497–503. <https://doi.org/10.1080/00016357.2018.1441437>
6. Zari G., Condino S., Cutolo F. & Ferrari V. Magic Leap 1 versus Microsoft HoloLens 2 for the Visualization of 3D Content Obtained from Radiological Images. *Sensors*, 2023, 23(6), 3040. <https://doi.org/10.3390/s23063040>
7. Verhey J. T., Haglin J. M., Verhey E. M. & Hartigan D. E. Virtual, augmented, and mixed reality applications in orthopedic surgery. *International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery*, 2020, 16(2). <https://doi.org/10.1002/rcs.2067>
8. Corda R., Giusto D. D., Liotta A., Song W. & Perra C. Recent Advances in the Processing and Rendering Algorithms for Computer-Generated Holography. *Electronics*, 2019, 8(5), 556. <https://doi.org/10.3390/electronics8050556>
9. Joda T., Bornstein M. M., Jung R. E., Ferrari M., Waltimo T. & Zitzmann N. U. Recent Trends and Future Direction of Dental Research in the Digital Era. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, 17(6), 1987. <https://doi.org/10.3390/ijerph17061987>
10. Li J., Sommer C., Wang H., Lepidi L., Joda T. & Mendonça G. Creating a virtual patient for completely edentulous computer-aided implant surgery: A dental technique. *Journal of Prosthetic Dentistry*, 2021, 125(4), 564–568. <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2020.02.026>

11. Joda T., Gallucci G. O., Wismeijer D. & Zitzmann N. U. Augmented and virtual reality in dental medicine: A systematic review. *Computers in Biology and Medicine*, 2019, 108, 93–100. <https://doi.org/10.1016/j.combiomed.2019.03.012>
12. Talaat S., Ghoneima A., Kaboudan A., Talaat W., Ragy N. & Bourauel C. Three-dimensional evaluation of the holographic projection in digital dental model superimposition using HoloLens device. *Orthodontics & Craniofacial Research*, 2019, 22(S1), 62–68. <https://doi.org/10.1111/ocr.12286>
13. Brun H., Bugge R. a. B., Suther L. K. R., Birkeland S., Kumar R., Pelanis E. & Elle O. J. Mixed reality holograms for heart surgery planning: first user experience in congenital heart disease. *European Journal of Echocardiography*, 2019, 20(8), 883–888. <https://doi.org/10.1093/ehjci/jey184>
14. Dołęga-Dołęgowski D., Proniewska K., Dolega-Dolegowska M., Pregowska A., Hajto-Bryk J., Trojak M., Chmiel J., Walecki P. & Fudalej P. Application of holography and augmented reality based technology to visualize the internal structure of the dental root – a proof of concept. *Head & Face Medicine*, 2022, 18(1). <https://doi.org/10.1186/s13005-022-00307-4>
15. Tang Z., Hu L., Soh H. Y., Yu Y., Zhang W. & Peng X. Accuracy of Mixed Reality Combined With Surgical Navigation Assisted Oral and Maxillofacial Tumor Resection. *Frontiers in Oncology*, 2022, 11. <https://doi.org/10.3389/fonc.2021.715484>
16. Joda T. & Gallucci G. O. The virtual patient in dental medicine. *Clinical Oral Implants Research*, 2015, 26(6), 725–726. <https://doi.org/10.1111/clr.12379>
17. Joda T., Yeung A. W. K., Hung K., Zitzmann N. U. & Bornstein M. M. Disruptive Innovation in Dentistry: What It Is and What Could Be Next. *Journal of Dental Research*, 2021, 100(5), 448–453. <https://doi.org/10.1177/0022034520978774>
18. Koyachi M., Sugahara K. K. O., Matsunaga S., Abe S., Sugimoto M. & Katakura A. Accuracy of Le Fort I osteotomy with combined computer-aided design/computer-aided manufacturing technology and mixed reality. *International Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*, 2021, 50(6), 782–790. <https://doi.org/10.1016/j.ijom.2020.09.026>
19. Andrews C. N., Henry A., Soriano I. M., Southworth M. & Silva J. R. Registration Techniques for Clinical Applications of Three-Dimensional Augmented Reality Devices. *IEEE Journal of Translational Engineering in Health and Medicine*, 2021, 9, 1–14. <https://doi.org/10.1109/jtehm.2020.3045642>
20. Frantz T., Jansen B., Duerinck J. & Vandemeulebroucke J. Augmenting Microsoft’s HoloLens with vuforia tracking for neuronavigation. *Healthcare Technology Letters*, 2018, 5(5), 221–225. <https://doi.org/10.1049/htl.2018.5079>

21. Koop M. M., Rosenfeldt A. B., Owen K., Penko A. L., Streicher M. C., Albright A. & Alberts J. L. The Microsoft HoloLens 2 Provides Accurate Measures of Gait, Turning, and Functional Mobility in Healthy Adults. *Sensors*, 2022, 22(5), 2009. <https://doi.org/10.3390/s22052009>
22. Kikano E., Hokamp N. G., Ciancibello L., Ramaiya N. H., Kosmas C. & Gupta A. Utility of virtual monoenergetic images from spectral detector computed tomography in improving image segmentation for purposes of 3D printing and modeling. *3D Printing in Medicine*, 2019, 5(1). <https://doi.org/10.1186/s41205-019-0038-y>
23. Punyaratabandhu T., Liacouras P. & Pairojboriboon S. Using 3D models in orthopedic oncology: presenting personalized advantages in surgical planning and intraoperative outcomes. *3D Printing in Medicine*, 2018, 4(1). <https://doi.org/10.1186/s41205-018-0035-6>
24. Flores R. L., Liss H. A., Raffaelli S. D., Humayun A., Khouri K. S., Coelho P. G. & Witek L. The technique for 3D printing patient-specific models for auricular reconstruction. *Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery*, 2017, 45(6), 937–943. <https://doi.org/10.1016/j.jcms.2017.03.022>
25. Suojanen J., Leikola J. & Stoor P. The use of patient-specific implants in orthognathic surgery: A series of 32 maxillary osteotomy patients. *Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery*, 2016, 44(12), 1913–1916. <https://doi.org/10.1016/j.jcms.2016.09.008>
26. Cercenelli L. F. B., Badiali G., Battaglia S., Basile F., Marchetti C. & Marcelli E. Augmented Reality to Assist Skin Paddle Harvesting in Osteomyocutaneous Fibular Flap Reconstructive Surgery: A Pilot Evaluation on a 3D-Printed Leg Phantom. *Frontiers in Oncology*, 2021, 11. <https://doi.org/10.3389/fonc.2021.804748>
27. Kamio T., Suzuki M., Asaumi R., & Kawai T. DICOM segmentation and STL creation for 3D printing: a process and software package comparison for osseous anatomy. *3D Printing in Medicine*, 2020, 6(1). <https://doi.org/10.1186/s41205-020-00069-2>
28. Smith R. T., Clarke T. J., Mayer W. J., Cunningham A., Matthews B. S. & Zucco J. E. Mixed Reality Interaction and Presentation Techniques for Medical Visualisations. *Advances in Experimental Medicine and Biology*, 2020, 123–139. https://doi.org/10.1007/978-3-030-47483-6_7
29. Lee D., Yi J., Hong J., Chai Y. J., Kim H. J. & Kong H. Augmented Reality to Localize Individual Organ in Surgical Procedure. *Healthcare Informatics Research*, 2018, 24(4), 394. <https://doi.org/10.4258/hir.2018.24.4.394>
30. Garon M., Boulet P., Doironz J., Beaulieu L. & Lalonde J. Real-Time High Resolution 3D Data on the HoloLens. *International Symposium on Mixed and Augmented Reality*. 2016. <https://doi.org/10.1109/ismar-adjunct.2016.0073>

31. Tu P., Gao Y., Lungu A. J., Li D., Wang H. & Chen X. Augmented reality based navigation for distal interlocking of intramedullary nails utilizing Microsoft HoloLens 2. *Computers in Biology and Medicine*, 2021, 133, 104402. <https://doi.org/10.1016/j.combiomed.2021.104402>
32. Schnutenhaus S., Edelmann C., Knipper A. & Luthardt R. G. Accuracy of Dynamic Computer-Assisted Implant Placement: A Systematic Review and Meta-Analysis of Clinical and In Vitro Studies. *Journal of Clinical Medicine*, 2021, 10(4), 704. <https://doi.org/10.3390/jcm10040704>
33. Yavas G., Caliskan K. E. & Cagli M. S. Three-dimensional–printed marker–based augmented reality neuronavigation: a new neuronavigation technique. *Neurosurgical Focus*, 2021, 51(2), E20. <https://doi.org/10.3171/2021.5.focus21206>
34. Khoshnevisan A. & Allahabadi N. S. Neuronavigation: principles, clinical applications and potential pitfalls. *Iranian Journal of Psychiatry*, 2012.
35. „Navident - ClaroNav,“ ClaroNav [Tinkle]. Available: <https://www.claronav.com/navident/>
36. Stefanelli L. V., DeGroot B. S., Lipton D. & Mandelaris G. A. Accuracy of a Dynamic Dental Implant Navigation System in a Private Practice. *International Journal of Oral & Maxillofacial Implants*, 2019, 34(1), 205–213. <https://doi.org/10.11607/jomi.6966>
37. Jorba-García A., González-Barnadas A., Camps-Font O., Figueiredo R. & Valmaseda-Castellón E. Accuracy assessment of dynamic computer–aided implant placement: a systematic review and meta-analysis. *Clinical Oral Investigations*, 2021, 25(5), 2479–2494. <https://doi.org/10.1007/s00784-021-03833-8>
38. Schneider D. J., Marquardt P., Zwahlen M. & Jung R. E. A systematic review on the accuracy and the clinical outcome of computer-guided template-based implant dentistry. *Clinical Oral Implants Research*, 2009, 20, 73–86. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0501.2009.01788.x>
39. „Getting Started | VuforiaLibrary,“ Vuforia, [Tinkle]. Available: <https://library.vuforia.com/>.
40. Miller Koop M., Rosenfeldt A. B., Owen K., Penko A. L., Streicher M. C., Albright A. & Alberts J. L. The Microsoft HoloLens 2 Provides Accurate Measures of Gait, Turning, and Functional Mobility in Healthy Adults. *Sensors*, 2022, 22(5). <https://doi.org/10.3390/s22052009>
41. Jiang J., Huang Z., Qian W., Zhang Y. & Liu Y. Registration Technology of Augmented Reality in Oral Medicine: A Review. *IEEE Access*, 2019, 7, 53566–53584. <https://doi.org/10.1109/access.2019.2912949>
42. Garon M., Boulet P. O., Doiron J. P., Beaulie L. & Lalonde J. F. Real-Time High Resolution 3D Data on the HoloLens. 2016 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR-Adjunct). <https://doi.org/10.1109/ismar-adjunct.2016.0073>

43. Sun Q., Mai Y., Yang R., Ji T., Jiang X. & Chen X. Fast and accurate online calibration of optical see-through head-mounted display for AR-based surgical navigation using Microsoft HoloLens. *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, 2020, 15(11), 1907–1919. <https://doi.org/10.1007/s11548-020-02246-4>
44. Ito T., Kawashima Y., Yamazaki A. & Tsutsumi T. Application of a virtual and mixed reality-navigation system using commercially available devices to the lateral temporal bone resection. *Annals of Medicine and Surgery*, 2021, 72, 103063. <https://doi.org/10.1016/j.amsu.2021.103063>
45. <https://ms.liftforward.com/en-us/hololens?product=hololens-development-edition>