

Nuove prospettive di utilizzo dei modelli dentali tridimensionali in ortodonzia

New perspectives on the use of three-dimensional dental models in orthodontics

L. Huanca Ghislanzoni*, I. Perondi, C. Tagliatesta, C. Sforza
Dipartimento di Scienze Biomediche per la Salute, Università degli Studi di Milano

Ricevuto il
23 luglio 2012
Accettato il
4 febbraio 2013

*Autore di riferimento
Luis Huanca Ghislanzoni
dottor.acca@gmail.com

RIASSUNTO

OBIETTIVI. Descrivere i modelli tridimensionali virtuali, strumento di imaging con cui l'ortodontista ha scarsa confidenza poiché il suo utilizzo è stato a lungo prerogativa dell'industria ortodontica. I tempi sono maturi per l'uso delle impronte tridimensionali nella pratica clinica quotidiana e nella ricerca.

MATERIALI E METODI. Vengono descritti i mezzi che permettono di trasformare i modelli fisici in gesso in modelli virtuali. Sono quindi discussi i possibili vantaggi, quali la modalità di archiviazione dei file e la possibilità di effettuare misure convenzionali (analisi degli spazi). È infine affrontato il tema delle sovrapposizioni.

RISULTATI E CONCLUSIONI. L'esperienza clinica è necessaria per giudicare i setup virtuali eseguiti dall'odontotecnico e guidarlo nella realizzazione di movimenti biologicamente plausibili. La possibilità di sovrapporre per compenetrazione i modelli virtuali apre prospettive inusuali di visualizzazione e confronto dei risultati

terapeutici sia nel singolo paziente sia in gruppi di pazienti.

PAROLE CHIAVE

- ▶ 3D
- ▶ Arcata dentaria
- ▶ Scanner
- ▶ Impronte
- ▶ Modelli studio

ABSTRACT

OBJECTIVES. *Three-dimensional virtual models are described. Since orthodontic manufacturers have been for long almost the only operators in the field, orthodontists are non familiar with this imaging instrument. Times are ripe for the use of three-dimensional virtual casts in everyday clinical practice and research.*

MATERIALS AND METHODS. *This paper reports about the instruments for processing a stone model into a virtual model. Possible advantages like storage of 3D files and the possibility of taking conventional measures (space analysis),*

are then discussed. Finally the question of the superimposition is considered.

RESULTS AND CONCLUSIONS. Clinical experience is the key factor when judging biological plausibility of dental

movement led by a technician, when preparing a virtual setup. The possibility of superimposing virtual models opens up unusual visual perspectives and comparison when considering treatment results of a single patient or a group of patients.

KEY WORDS

- ▶ 3D
- ▶ Dental arch
- ▶ Scanner
- ▶ Impressions
- ▶ Study models

1. INTRODUZIONE

L'ortodonzia contemporanea ha da tempo abbracciato la terza dimensione [1], sia nel campo delle applicazioni cliniche [2-4] sia nel campo diagnostico.

La ricerca finanziata dall'industria e finalizzata alla realizzazione di manufatti personalizzati e ad alta precisione (allineatori trasparenti, bracket customizzati sia vestibolari sia linguali) [2-5] rende la conoscenza degli strumenti legati all'utilizzo dei modelli dentali tridimensionali (3D) un must per l'ortodontista contemporaneo. Attraverso la conoscenza delle nuove prospettive che si aprono con l'uso dei modelli 3D, i clinici possono assumere quella consapevolezza necessaria a interpretare i complessi step di elaborazione delle immagini 3D e interagire al meglio con i provider di prodotti dentali [6]. Gli ortodontisti padroni di tali conoscenze avranno altresì la possibilità di comprendere fino in fondo i risultati della ricerca, che si sta sempre più orientando verso la terza dimensione.

La vera protagonista della svolta verso il 3D è stata, finora, la tomografia computerizzata a fascio conico (Cone Beam Computed Tomography, CBCT) che ha aggiunto la trasversalità al classico approccio diagnostico radiografico basato sull'analisi della sagittalità e della verticalità. A oggi l'utilizzo della CBCT è rimasto prevalentemente una prerogativa dei centri di ricerca universitari. Il mondo accademico, in parallelo a una fiorente

ricerca, sta cercando di mettere a fuoco i reali vantaggi clinici che conseguono all'impiego di questa tipologia di radiografia che espone il paziente a una dose di radiazioni comunque maggiore, seppure di poco, all'approccio diagnostico tradizionale [7,8]. Per questo motivo, a oggi, l'occasione di imbattersi in un'immagine radiografica 3D è riservata per lo più a casi speciali (un esempio per tutti i canini inclusi) [9], laddove il centro radiografico di riferimento si sia dotato di una macchina in grado di eseguire TC a basso dosaggio.

A livello di ricerca la CBCT è seguita, per numero di pubblicazioni, dalla stereofotogrammetria [10,11]. Si tratta di un metodo non invasivo per acquisire immagini 3D di superficie, in particolare del viso, attraverso lo scatto contemporaneo di almeno due fotografie da prospettive diverse. La stereofotogrammetria richiede l'utilizzo di sistemi ad alta precisione, il cui costo è a oggi proibitivo in rapporto alle possibili applicazioni cliniche, che sono ancora completamente da definire. L'elemento di forza di questo sistema risiede nella non invasività unita al buon grado di precisione nella riproduzione dei dettagli 3D.

I ricercatori che si occupano dell'imaging 3D in ortodonzia sembrano invece essersi dimenticati dei modelli dentali 3D. Eccezion fatta per un'iniziale attenzione seguita all'immissione sul mercato dei primi scanner in grado di trasformare i modelli in gesso in immagini 3D [12-

14], i ricercatori hanno obliato questo strumento fino a tempi molto recenti. La comparsa sul mercato dei primi scanner intraorali ha di fatto destato un nuovo interesse sul tema [15,16].

La facilità di archiviazione dei file rispetto ai gessi tradizionali e la possibilità di eseguire un'accurata analisi dentale, propagandate come i principali vantaggi di questa modalità di imaging, non sono che la punta dell'iceberg di un mondo con molte altre potenzialità. Lo scopo del presente lavoro è quindi quello di illustrare nei dettagli le opportunità e le prospettive di utilizzo dei modelli dentali 3D.

2. DALLE ARCADE DENTARIE AI FILE TRIDIMENSIONALI

Sebbene la ricerca abbia proposto una serie di strumenti per trasformare i modelli in gesso in immagini 3D (sistemi olografici, tecnologia laser, scansione per distruzione, TC) [17,18], a oggi il metodo che risulta più diffuso è la scansione laser, per la quale si utilizzano scanner poco ingombranti che sono in dotazione a molti laboratori odontotecnici [14].

Il processo di acquisizione prevede il posizionamento del modello in gesso di un'arcata dentaria all'interno dello scanner. Una piattaforma rotante cui è ancorato il modello, o invero un sistema rotante di lenti di acquisizione, permette di registrare l'arcata dentaria nella sua interezza compresi i sottosquadri.

Laddove serva anche la riproduzione

della relazione con l'arcata antagonista, è necessario fornire una chiave di occlusione. Tale chiave può essere la tradizionale cera di masticazione in massima intercuspiazione o, ancora meglio, una registrazione in silicone. Un modo alternativo di riprodurre l'occlusione è quello in cui i modelli in gesso delle due arcate opposte vengono vincolati tra di loro in massima intercuspiazione (per esempio con un elastico) e sono così scansionati contemporaneamente.

Molti scanner sono in grado di acquisire le immagini 3D direttamente dalle impronte, senza passare per lo sviluppo dei gessi. In questi casi sono richieste impronte di precisione in silicone. L'accuratezza dell'impronta è la premessa all'eventuale realizzazione di manufatti ad alta precisione (mascherine trasparenti e bracket customizzati vestibolari o linguali) [19]. Nel caso della scansione dalle impronte, l'unica chiave di occlusione che è possibile fornire è la registrazione del morso in massima intercuspiazione. Sebbene ancora poco diffusi, gli scanner intraorali offrono la possibilità di evitare completamente lo step di presa dell'impronta in modo tradizionale. Gli scan-

ner intraorali, generalmente montati su manipoli di dimensioni modeste, sono in grado di scansionare direttamente in bocca e trasformare le arcate dentarie in immagini 3D che appaiono in tempo reale sullo schermo [15]. In questo caso la chiave di occlusione è data dall'acquisizione della registrazione della superficie vestibolare delle due arcate dentarie in massima intercuspiazione.

I file in formato STL sono i più diffusi e leggibili per le immagini 3D. Non tutti gli scanner consentono il salvataggio in questo formato, poiché alcune aziende preferiscono archiviare le immagini in un formato proprietario (legato al proprio software) e chiedere all'ortodontista di pagare una "tassa" per la conversione del file in un formato universale. Sarebbe auspicabile una standardizzazione dei file di output in STL, in quanto esiste un'ampia scelta di software di visualizzazione gratuiti.

La superficie 3D si definisce "mesh" ed è costituita da un numero elevatissimo di punti, uniti tra di loro da piccole superfici triangolari, che sono visibili zoomando molto sulla superficie del modello. La visualizzazione classica privilegia un pro-

cesso di arrotondamento (smoothing) delle superfici che trasforma i modelli 3D in una fedele replica a schermo dei modelli in gesso (fig. 1a,b).

3. L'UTILIZZO TRADIZIONALE DEI MODELLI 3D: ARCHIVIAZIONE DEI MODELLI DI STUDIO E ANALISI DEGLI SPAZI

Uno dei vantaggi più tangibili dei modelli 3D è il risparmio di spazio fisico, laddove sia abitudine dell'ortodontista archiviare i modelli iniziali e finali dei propri pazienti. La gipsoteca può essere abolita a favore di un disco fisso capiente. I file 3D misurano in media tra i 5 e i 15 MB per arcata dentaria, a seconda dello scanner utilizzato (sono da preferirsi file di dimensioni inferiori a parità di qualità percepita).

La diffusione degli scanner per modelli in molti laboratori odontotecnici renderà – in un futuro prossimo – assai comune questa modalità di archiviazione dei modelli di studio. I laboratori che si sono già dotati di tale tecnologia caricano

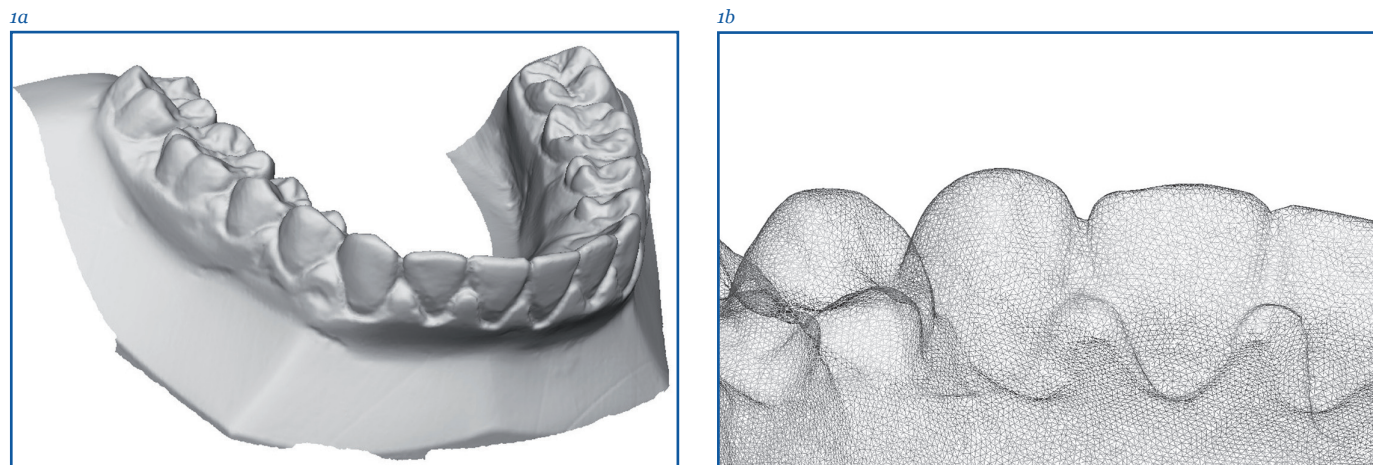


Fig. 1a,b a) Immagine classica di modello 3D con superficie liscia (smoothed). b) Particolare della mesh (superficie): la precisione della riproduzione è tanto maggiore quanto più densa è la nuvola di punti che sono uniti da linee a formare triangoli

i file su un server dedicato e forniscono credenziali di accesso ai propri clienti, garantendo la privacy e svincolandosi dalla necessità di consegna del modello fisico a favore di una consegna virtuale via e-mail. Lo scambio di record clinici tra colleghi è altrettanto facilitato dalla loro natura elettronica [20].

L'esigenza di eseguire un'analisi dello spazio sui modelli è pienamente assolta dai modelli 3D, anzi è resa più agevole [21,22]. Non è necessario dotarsi di un calibro, in quanto tale strumento è uno dei tool di base di tutti i software di visualizzazione di modelli 3D forniti dai vari provider. Alcuni laboratori offrono un servizio di analisi dei modelli standardizzata (per esempio indice di Bolton, analisi degli spazi) che svincola il clinico dalla necessità di svolgere personalmente queste misurazioni. La letteratura ha approvato la corrispondenza tra le misure effettuate nel modo tradizionale e sui modelli 3D, decretandone un'equivalenza, laddove non una lieve superiorità in

termini di precisione a favore del metodo computerizzato [21-23].

I board nazionali e internazionali che certificano la qualità del trattamento clinico degli ortodontisti hanno, in buona parte, già previsto per il futuro prossimo l'inserimento dei modelli 3D come record clinico alternativo ai tradizionali modelli in gesso.

4. L'UTILIZZO MODERNO DEI MODELLI 3D: SETUP VIRTUALI E CONFRONTO "PRIMA/DOPO" TRA MODELLI

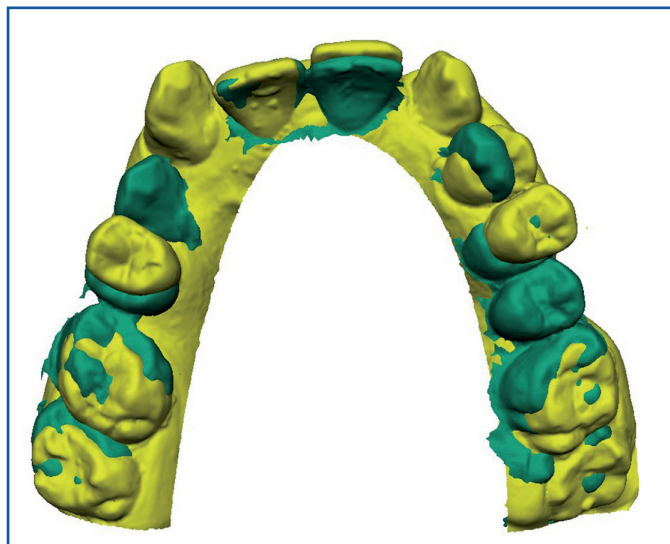
Il clinico che ha avuto modo di familiarizzare con i principali fornitori di mascherine trasparenti conosce da tempo il concetto di setup virtuale. Il setup virtuale è la riproposizione digitale del classico setup manuale, fatto salvo il risparmio di una notevole quantità di tempo per il tecnico che esegue il setup. È interessante osservare come alcuni provider di appa-

recchi customizzati continuino a preferire il setup manuale, di cui poi eseguono una scansione 3D [5].

L'attenzione dell'ortodontista, nel momento in cui delega il setup a un tecnico che non è un clinico, deve concentrarsi sulla plausibilità dei movimenti preventivi, nel contesto dei limiti biologici del paziente (anatomia, età, parodonto) [24]. A computer è infatti possibile simulare qualsiasi tipo e qualsiasi entità di movimento [25]. Non è sempre facile immaginarsi la realizzabilità di questi movimenti visualizzando una sequenza di immagini 2D che mostrano lievi e progressivi cambiamenti. Nemmeno il confronto diretto di immagini 2D relative al "prima" e al "dopo" consente una particolare attenzione a riguardo.

Una peculiarità esclusiva dei modelli 3D è la possibilità di sovrapporre (si veda il paragrafo dedicato al controverso tema delle sovrapposizioni) e compenetrare due modelli diversi. Per effettuare questa elaborazione di immagini sono necessari

2a



2b

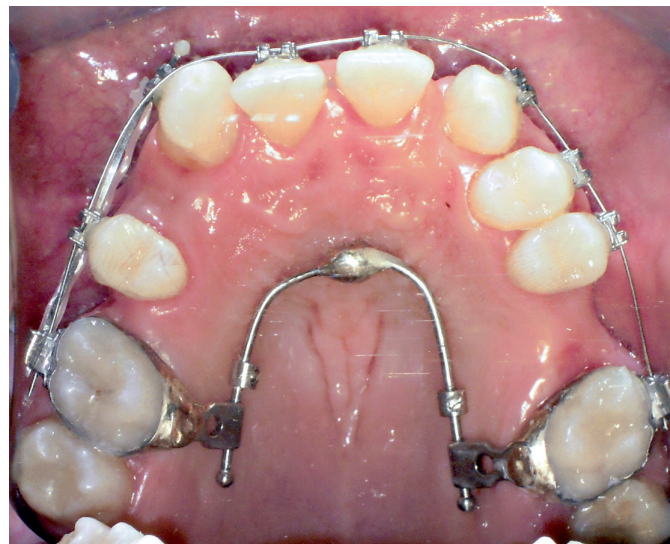


Fig. 2a,b a) Setup virtuale per la programmazione di un caso complesso (in giallo la situazione iniziale, in verde il setup). È stato possibile visualizzare la quantità di movimento di distalizzazione atteso a livello di canini e premolari. b) Si è quindi realizzato un apparecchio su minivite che impedisce un movimento mesiale dei sestri oltre il limite definito dal setup

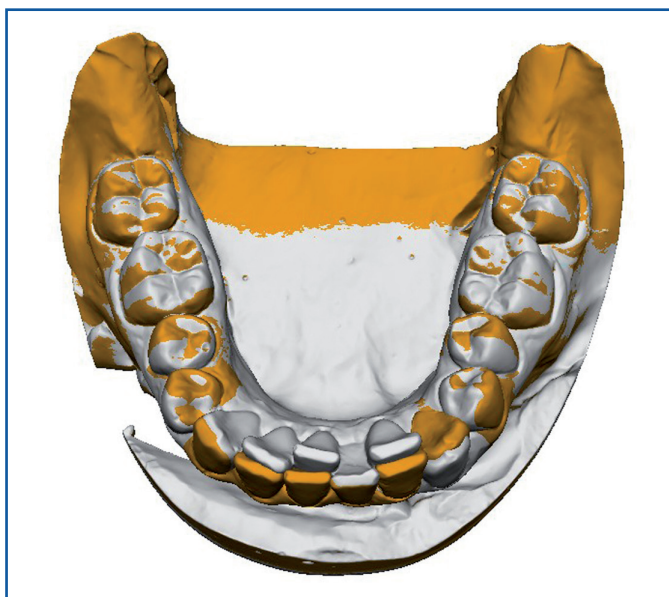


Fig. 3
Sovrapposizione delle impronte iniziali (bianco) e finali (arancio) di una paziente trattata per un affollamento degli incisivi inferiori. Si intuisce come l'allineamento sia avvenuto esclusivamente per vestibolarizzazione degli incisivi

5. L'UTILIZZO DEI MODELLI 3D PER LA RICERCA

A livello di ricerca l'analisi dei modelli classica, basata fondamentalmente su misure lineari e analisi degli spazi, si è arricchita grazie alla possibilità di misurare gli angoli. Si possono pertanto misurare con un buon grado di precisione valori come il tip, il torque, le rotazioni [27-29]. Questi valori "nuovi" per la letteratura possono aiutare a comprendere in modo fine i cambiamenti indotti da una terapia o dalla crescita.

Per esempio, sono stati condotti e sono in corso studi volti a cercare di comprendere il reale effetto di meccaniche espansive a bassa frizione (fig. 5): la possibilità di calcolare i valori di torque permette di misurare il grado di vestibolarizzazione dei denti che tali meccaniche comportano [30].

Oltre a misure lineari e angolari sono possibili anche misure di superficie e di volume (per esempio la superficie e il volume del palato) [31]. Passando da una a tre dimensioni, cresce altresì il grado di variabilità delle misure e sono quindi necessari protocolli che vanno validati caso per caso [32,33].

software che prevedano la possibilità di confrontare i modelli (file con estensione .STI) tra di loro. La sovrapposizione/compenetrazione di due modelli colorati in modo differente permette una visualizzazione immediata e intuitiva dei cambiamenti posizionali degli elementi dentari. Tali cambiamenti sono rappresentativi delle variazioni "prima vs dopo", dove con "dopo" si può intendere sia un setup virtuale (con la finalità di verificare se il setup sia adeguato, fig. 2a,b) sia

l'impronta del caso finito (con la finalità di analizzare in modo retrospettivo i cambiamenti subiti dall'arcata dentaria, fig. 3).

La finezza dell'analisi può essere amplificata con l'uso di scale colore (fig. 4a,b) che indicano le zone che si sono mantenute pressappoco inalterate (generalmente rappresentate in colore verde) e le zone dove vi è stato un movimento in termini di allargamento (generalmente in blu) o di contrazione (generalmente in rosso) [26].

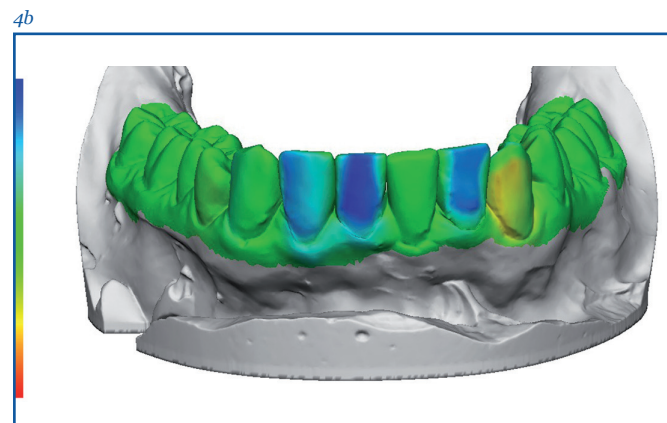
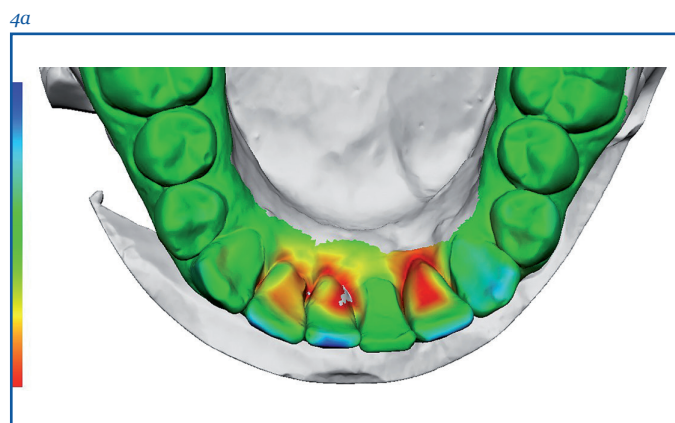


Fig. 4a,b Visualizzazione mediante scale colore degli spostamenti dentali del caso di fig. 3 (in rosso -2 mm, in blu +2 mm, in verde nessun cambiamento): a) visione oclusale; b) visione vestibolare

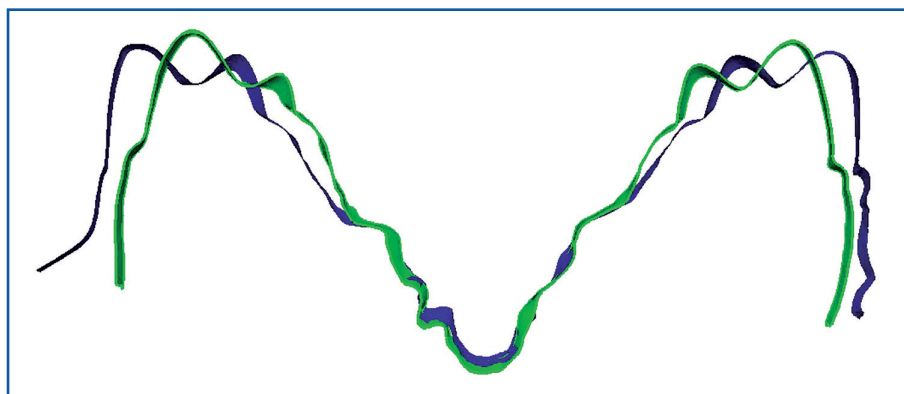


Fig. 5 Sezione di 2 mm tagliata a livello del primo premolare superiore in un paziente trattato con apparecchi a bassa frizione e meccaniche espansive (in verde prima del trattamento, in blu a fine trattamento): le impronte tridimensionali sono un valido strumento di ricerca per chiarire che cosa succede veramente in questi casi

All'analisi numerica si può affiancare un tipo di analisi per immagini che risulta più immediato [34]. È stato poc'anzi descritto come visualizzare i cambiamenti "prima/dopo" della bocca di un paziente. Volendo si può estendere il ragionamen-

to a un gruppo di pazienti, così come già avviene quando si confrontano i valori cefalometrici. Anziché una media numerica da confrontare, devono essere prodotte arcate medie, rappresentative del campione in analisi. La procedura per

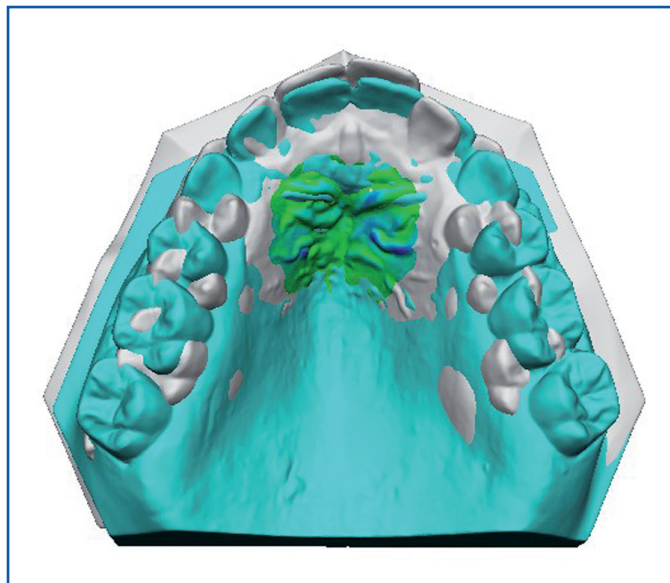
produrre immagini 3D medie è complessa ed è stata definita sia per i volti [11] sia per le arcate [35].

6. LIMITI ATTUALI: SOVRAPPOSIZIONI, INTERCUSPIDAZIONE E COSTO

Si è discusso della possibilità di sovrapporre per compenetrazione due modelli dentari. I criteri con i quali far coincidere le arcate tra di loro sono stati scarsamente descritti e vengono spesso aggirati nella definizione dei protocolli di ricerca. Si tratta, infatti, di un tema controverso che merita un accenno.

Non essendo eticamente accettabili metodi invasivi come quello utilizzato da Björk per la definizione delle strutture di sovrapposizione in cefalometria [36], si è comunque tentato di definire zone a scarsa variabilità sulle quali effettuare

6a



6b

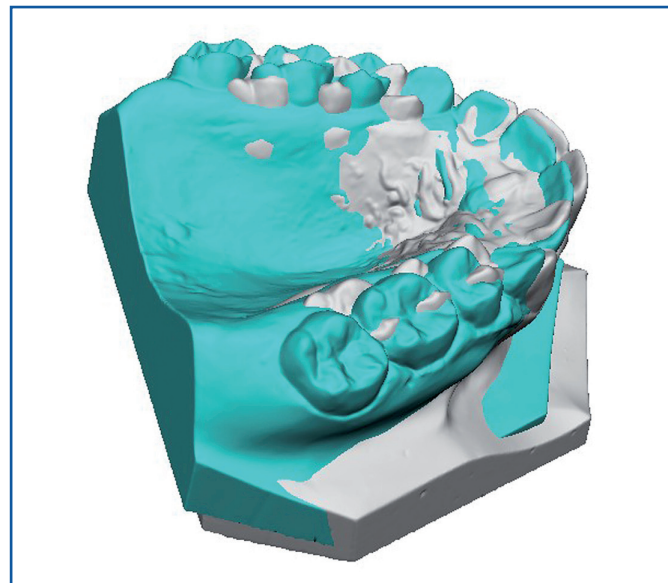


Fig. 6a,b a) Sovrapposizione sulle rughe palatine, secondo i protocolli suggeriti in letteratura, di un caso estrattivo (inizio in bianco, fine in azzurro). È evidenziata la zona di sovrapposizione, che risulta praticamente coincidente per i due modelli (differenze calcolate con il metodo delle scale colore). b) Si può notare come la zona dei molari, lontana dalle rughe, risulti suscettibile di errori in termini di verticalità. Queste apparenti variazioni non sono dovute alla terapia, bensì ai limiti del metodo di sovrapposizione

sovrapposizioni “assolute”. Nell’ambito del cavo orale l’unica zona a scarsa variabilità è costituita dalle rughe palatine, in particolare la porzione più mediale della seconda e terza ruga [37,38]. A livello pratico tale conoscenza si rivela scarsamente utile, sia perché prende in considerazione solo l’arcata superiore sia perché alla prova dei fatti le zone lontane dalle rughe palatine non risultano ben sovrapposte (fig. 6a,b).

Il principale metodo alternativo di sovrapposizione dei modelli dentari è quello del “best fit”, ovvero la ricerca della massima corrispondenza tra due modelli (il rapporto reciproco nel quale lo scarto quadratico medio delle distanze è minore una volta che le immagini sono state sovrapposte sul centroide). Questo tipo di sovrapposizione può avvenire in uno o due step. Il primo step consiste nell’identificazione di punti di repere coincidenti sui modelli e nella successiva applicazione di un algoritmo di best fit (prerogativa di software avanzati). Per affinare la sovrapposizione è possibile, in seguito, selezionare delle superfici (metodo Iterative Closest Point, ICP) e rilanciare il processo di approssimazione dei modelli: essendo le superfici dei modelli costituite da moltissimi punti, il best fit di una zona assunta come riferimento risulta più preciso e richiede un maggiore sforzo di calcolo da parte del computer, poiché la procedura è ripetuta finché la differenza tra le superfici è minimizzata [39].

La sovrapposizione con best fit non consente di visualizzare cambiamenti assoluti, bensì relativi. È quindi adatta a dimostrare variazioni di forma e di posizione. I cambiamenti assoluti possono essere visualizzati solo se vi sono strutture avulse dai processi biologici di rimodellamento, come le miniviti, oppure affidandosi, con

i limiti evidenziati, alle sovrapposizioni sulle rughe palatine [37].

La verifica della precisione nella riproduzione dell’intercuspidazione nei modelli virtuali non è stata sufficientemente indagata in letteratura e ciò costituisce, a oggi, un limite della metodica.

I costi leggermente superiori rispetto a un tradizionale modello in gesso pongono un ulteriore freno alla diffusione dei modelli virtuali. La possibilità per il laboratorio di colare in gesso solo l’arcata e risparmiare il tempo della squadratura dei modelli, ovvero di evitare del tutto la colatura in gesso e acquisire direttamente la scansione dalle impronte, e infine la possibilità di progettare con setup virtuali set di mascherine trasparenti stanno spingendo sempre più laboratori odontotecnici a dotarsi di scanner. In un futuro prossimo è perciò prevedibile che i costi competitivi favoriranno l’utilizzo dei modelli virtuali come scelta elettiva.

7. CONCLUSIONI

In conclusione, gli autori sperano di aver fornito una panoramica completa del mondo dei modelli dentari 3D e ne sostengono l’utilizzo sia come record clinico diagnostico sia come strumento di ricerca.

CONFLITTO DI INTERESSI

Gli autori dichiarano di non avere alcun conflitto di interessi.

FINANZIAMENTI ALLO STUDIO

Gli autori dichiarano di non aver ricevuto finanziamenti istituzionali per il presente studio.

BIBLIOGRAFIA

1. Kau CH, Richmond S, Incrapera A, English J, Xia JJ. Three-dimensional surface acquisition systems for the study of facial morphology and their applica-

- tion to maxillofacial surgery. *Int J Med Robot* 2007;3(2):97-110.
2. Kravitz ND, Kusnoto B, BeGole E, Obrez A, Agran B. How well does Invisalign work? A prospective clinical study evaluating the efficacy of tooth movement with Invisalign. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2009;135(1):27-35.
3. Lagravère MO, Flores-Mir C. The treatment effects of Invisalign orthodontic aligners: a systematic review. *J Am Dent Assoc* 2005;136(12):1724-9.
4. Saxe AK, Louie LJ, Mah J. Efficiency and effectiveness of SureSmile. *World J Orthod* 2010;11(1):16-22.
5. Pauls AH. Therapeutic accuracy of individualized brackets in lingual orthodontics. *J Orofac Orthop* 2010;71(5):348-61.
6. Yuan T, Liao W, Dai N, Cheng X, Yu Q. Single-tooth modeling for 3D dental model. *Int J Biomed Imaging*. 2010;2010. doi:pii: 535329. 10.1155/2010/535329.
7. Holberg C, Steinhäuser S, Geis P, Rudzki-Janson I. Cone-beam computed tomography in orthodontics: benefits and limitations. *J Orofac Orthop* 2005;66(6):434-44.
8. van Vlijmen OJ, Kuijpers MA, Bergé SJ, Schols JG, Maal TJ, Breuning H, et al. Evidence supporting the use of cone-beam computed tomography in orthodontics. *J Am Dent Assoc* 2012;143(3):241-52.
9. Wriedt S, Jaklin J, Al-Nawas B, Wehrbein H. Impacted upper canines: examination and treatment proposal based on 3D versus 2D diagnosis. *J Orofac Orthop* 2012;73(1):28-40.
10. Heike CL, Upson K, Stuhaug E, Weinberg SM. 3D digital stereophotogrammetry: a practical guide to facial image acquisition. *Head Face Med* 2010;6:18.
11. Kau CH, Zhurov A, Richmond S, Bibb R, Sugar A, Knox J, et al. The 3-dimensional construction of the average 11-year-old child face: a clinical evaluation and application. *J Oral Maxillofac Surg* 2006;64(7):1086-92.
12. Kusnoto B, Evans CA. Reliability of a 3D surface laser scanner for orthodontic applications. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2002;122(4):342-8.
13. Keating AP, Knox J, Bibb R, Zhurov AI. A comparison of plaster, digital and reconstructed study model accuracy.

- J Orthod 2008;35(3):191-201.
14. Dalstra M, Melsen B. From alginate impressions to digital virtual models: accuracy and reproducibility. *J Orthod* 2009;36(1):36-41.
 15. Garino F, Garino B. The OrthoCAD iOC intraoral scanner: A six-month user report. *J Clin Orthod* 2011;45(3):161-4.
 16. Syrek A, Reich G, Ranftl D, Klein C, Cerny B, Brodesser J. Clinical evaluation of all-ceramic crowns fabricated from intraoral digital impressions based on the principle of active wavefront sampling. *J Dent* 2010;38(7):553-9.
 17. Mårtensson B, Rydén H. The holo-dent system, a new technique for measurement and storage of dental casts. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 1992;102(2):113-9.
 18. Kuo E, Miller RJ. Automated custom-manufacturing technology in orthodontics. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2003;123(5):578-81.
 19. Miller RJ, Kuo E, Choi W. Validation of Align Technology's Treat III digital model superimposition tool and its case application. *Orthod Craniofac Res* 2003;6(Suppl 1):143-9.
 20. Marcel TJ. Three-dimensional on-screen virtual models. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2001;119(6):666-8.
 21. Leifert MF, Leifert MM, Efstratiadis SS, Cangialosi TJ. Comparison of space analysis evaluations with digital models and plaster dental casts. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2009;136(1):16.e1-4.
 22. Zilberman O, Huggare JA, Parikakis KA. Evaluation of the validity of tooth size and arch width measurements using conventional and three-dimensional virtual orthodontic models. *Angle Orthod* 2003;73(3):301-6.
 23. Naidu D, Scott J, Ong D, Ho CT. Validity, reliability and reproducibility of three methods used to measure tooth widths for Bolton analyses. *Aust Orthod J* 2009;25(2):97-103.
 24. Watanabe K, Koga M. A morphometric study with setup models for bracket design. *Angle Orthod* 2001;71(6):499-511.
 25. Kihara T, Tanimoto K, Michida M, Yoshimi Y, Nagasaki T, Murayama T, et al. Construction of orthodontic setup models on a computer. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2012;141(6):806-13.
 26. Paniagua B, Cevidanes L, Zhu H, Styner M. Outcome quantification using SPHARM-PDM toolbox in orthognathic surgery. *Int J Comput Assist Radiol Surg* 2011;6(5):617-26.
 27. Hayashi K, Araki Y, Uechi J, Ohno H, Mizoguchi I. A novel method for the three-dimensional (3-D) analysis of orthodontic tooth movement-calculation of rotation about and translation along the finite helical axis. *J Biomech* 2002;35(1):45-51.
 28. Grauer D, Proffit WR. Accuracy in tooth positioning with a fully customized lingual orthodontic appliance. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2011;140(3):433-43.
 29. Ferrario VF, Sforza C, Colombo A, Ciusa V, Serrao G. Three-dimensional inclination of the dental axes in healthy permanent dentitions. A cross-sectional study in a normal population. *Angle Orthod* 2001;71(4):257-64.
 30. Cattaneo PM, Treccani M, Carlsson K, Thorgeirsson T, Myrda A, Cevidanes LH, et al. Transversal maxillary dentoalveolar changes in patients treated with active and passive self-ligating brackets: a randomized clinical trial using CBCT-scans and digital models. *Orthod Craniofac Res* 2011;14(4):222-33.
 31. Primožič J, Perinetti G, Richmond S, Ovsenik M. Three-dimensional longitudinal evaluation of palatal vault changes in growing subjects. *Angle Orthod* 2012;82(4):632-6.
 32. de Menezes M, Rosati R, Ferrario VF, Sforza C. Accuracy and reproducibility of a 3-dimensional stereophotogrammetric imaging system. *J Oral Maxillofac Surg* 2010;68(9):2129-35.
 33. Rosati R, Rossetti A, De Menezes M, Ferrario VF, Sforza C. The occlusal plane in the facial context: inter-operator repeatability of a new three-dimensional method. *Int J Oral Sci* 2012;4(1):34-7.
 34. Thiruvengkatchari B, Al-Abdallah M, Akram NC, Sandler J, O'Brien K. Measuring 3-dimensional tooth movement with a 3-dimensional surface laser scanner. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2009;135(4):480-5.
 35. Nam SE, Kim YH, Park YS, Baek SH, Hayashi K, Kim KN, et al. Three-dimensional dental model constructed from an average dental form. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2012;141(2):213-8.
 36. Björk A. The use of metallic implants in the study of facial growth in children: method and application. *Am J Phys Anthropol* 1968;29(2):243-54.
 37. Jang I, Tanaka M, Koga Y, Iijima S, Yozgatian JH, Cha BK, et al. A novel method for the assessment of three-dimensional tooth movement during orthodontic treatment. *Angle Orthod* 2009;79(3):447-53.
 38. Chen G, Chen S, Zhang XY, Jiang RP, Liu Y, Shi FH, et al. Stable region for maxillary dental cast superimposition in adults, studied with the aid of stable miniscrews. *Orthod Craniofac Res* 2011;14(2):70-9.
 39. Khambay B, Nebel JC, Bowman J, Walker F, Hadley DM, Ayoub A. 3D stereophotogrammetric image superimposition onto 3D CT scan images: the future of orthognathic surgery. A pilot study. *Int J Adult Orthodon Orthognath Surg* 2002;17(4):331-41.