



(11)

EP 3 212 113 B1

(12)

FASCICULE DE BREVET EUROPEEN

(45) Date de publication et mention
de la délivrance du brevet:

11.12.2019 Bulletin 2019/50

(21) Numéro de dépôt: **15786928.0**

(22) Date de dépôt: **27.10.2015**

(51) Int Cl.:

A61B 1/00 (2006.01)	A61C 7/12 (2006.01)
A61C 13/00 (2006.01)	A61C 19/04 (2006.01)
G06T 17/00 (2006.01)	G06T 7/33 (2017.01)
G06T 7/73 (2017.01)	G16H 50/50 (2018.01)
A61C 7/00 (2006.01)	A61C 9/00 (2006.01)
A61B 1/32 (2006.01)	A61C 19/06 (2006.01)
A61C 19/10 (2006.01)	A61B 5/00 (2006.01)
A61B 5/06 (2006.01)	G06K 9/00 (2006.01)

(86) Numéro de dépôt international:

PCT/EP2015/074859

(87) Numéro de publication internationale:

WO 2016/066637 (06.05.2016 Gazette 2016/18)

(54) **PROCÉDÉ DE CONTRÔLE D'UN TRAITEMENT ORTHODONTIQUE**

VERFAHREN ZUR ÜBERWACHUNG EINER ZAHNBEHANDLUNG

METHOD FOR MONITORING AN ORTHODONTIC TREATMENT

(84) Etats contractants désignés:

**AL AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB
GR HR HU IE IS IT LI LT LU LV MC MK MT NL NO
PL PT RO RS SE SI SK SM TR**

(30) Priorité: **27.10.2014 FR 1460310**

(43) Date de publication de la demande:
06.09.2017 Bulletin 2017/36

(60) Demande divisionnaire:
19204880.9

(73) Titulaire: **Dental Monitoring
75008 Paris (FR)**

(72) Inventeurs:

- **SALAH, Philippe**
93170 Bagnolet (FR)
- **AYACHE, William**
92200 Neuilly-sur-Seine (FR)

• **DEBRAUX, Laurent**
75020 Paris (FR)

• **GHYSELINCK, Guillaume**
59169 Cantin (FR)

• **PELLISSARD, Thomas**
92110 Clichy (FR)

(74) Mandataire: **Nony**
11 rue Saint-Georges
75009 Paris (FR)

(56) Documents cités:
WO-A1-2013/090843 WO-A2-2006/065955
US-A1- 2005 048 432

- **I. AHMAD: "Digital dental photography. Part 8:
intra-oral set-ups", BDJ, vol. 207, no. 4, 22 août
2009 (2009-08-22) , pages 151-157, XP055209322,
ISSN: 0007-0610, DOI: 10.1038/sj.bdj.2009.715**

EP 3 212 113 B1

Il est rappelé que: Dans un délai de neuf mois à compter de la publication de la mention de la délivrance du brevet européen au Bulletin européen des brevets, toute personne peut faire opposition à ce brevet auprès de l'Office européen des brevets, conformément au règlement d'exécution. L'opposition n'est réputée formée qu'après le paiement de la taxe d'opposition. (Art. 99(1) Convention sur le brevet européen).

Description

Domaine technique

[0001] La présente invention concerne un procédé de contrôle du positionnement de dents d'un patient et un programme informatique pour la mise en œuvre de ce procédé.

Etat de la technique

[0002] Il est souhaitable que chacun fasse régulièrement contrôler sa dentition, notamment afin de vérifier que la position de ses dents n'évolue pas défavorablement. Lors d'un traitement orthodontique, cette évolution défavorable peut notamment conduire à modifier le traitement. Après un traitement orthodontique, cette évolution défavorable, appelée « récédive », peut conduire à une reprise d'un traitement. Enfin, de manière plus générale et indépendamment de tout traitement, chacun peut souhaiter suivre les déplacements éventuels de ses dents.

[0003] Classiquement, les contrôles sont effectués par un orthodontiste ou un dentiste qui seuls disposent d'un appareillage adapté. Ces contrôles sont donc coûteux. En outre, les visites sont contraignantes.

[0004] US 2009/0291417 décrit un procédé permettant de créer, puis de modifier des modèles tridimensionnels, notamment pour la fabrication d'appareils orthodontiques.

[0005] Un autre document dans la technique est illustré par WO 2006/065955 A2.

[0006] Un objectif de la présente invention est de répondre, au moins partiellement, aux problèmes susmentionnés.

Résumé de l'invention

[0007] L'invention fournit un procédé de contrôle du positionnement de dents d'un patient, ledit procédé comportant les étapes suivantes :

- a) réalisation d'un modèle de référence tridimensionnel numérique des arcades du patient, ou « modèle de référence initial » et, pour chaque dent, définition, à partir du modèle de référence initial, d'un modèle de référence tridimensionnel numérique de ladite dent, ou « modèle de dent » ;
- b) acquisition d'au moins une image bidimensionnelle desdites arcades, dite « image actualisée », dans des conditions d'acquisition réelles ;
- c) analyse de chaque image actualisée et réalisation, pour chaque image actualisée, d'une carte actualisée relative à une information discriminante ;
- d) optionnellement, détermination, pour chaque image actualisée, de conditions d'acquisition virtuelles grossières approximant lesdites conditions d'acquisition réelles ;

e) recherche, pour chaque image actualisée, d'un modèle de référence final correspondant au positionnement des dents lors de l'acquisition de l'image actualisée, la recherche étant de préférence effectuée au moyen d'une méthode métaheuristique, de préférence évolutionniste, de préférence par recuit simulé, et

f) pour chaque modèle de dent, comparaison des positionnements dudit modèle de dent dans le modèle de référence initial et dans le modèle de référence obtenu à l'issue des étapes précédentes, dit « modèle de référence final », afin de déterminer le déplacement des dents entre les étapes a) et b).

[0008] Comme on le verra plus en détail dans la suite de la description, un procédé selon l'invention permet, à partir d'une simple image des dents, prise sans pré-positionnement précis des dents par rapport à l'appareil d'acquisition d'images, par exemple d'une photographie prise par le patient, d'évaluer avec précision le déplacement des dents depuis la réalisation du modèle de référence initial. Cette évaluation peut en outre être effectuée par un simple ordinateur ou un téléphone mobile.

[0009] Selon l'invention, l'étape e) comporte

- une première opération d'optimisation permettant de rechercher des conditions d'acquisition virtuelles correspondant au mieux aux conditions d'acquisition réelles dans un modèle de référence à tester déterminé à partir du modèle de référence initial, et
- une deuxième opération d'optimisation permettant de rechercher, en testant une pluralité de dits modèles de référence à tester, le modèle de référence correspondant au mieux au positionnement des dents du patient lors de l'acquisition de l'image actualisée à l'étape b).

[0010] De préférence, une première opération d'optimisation est effectuée pour chaque test d'un modèle de référence à tester lors de la deuxième opération d'optimisation.

[0011] De préférence, la première opération d'optimisation et/ou la deuxième opération d'optimisation, de préférence la première opération d'optimisation et la deuxième opération d'optimisation mettent en œuvre une méthode métaheuristique, de préférence évolutionniste, de préférence un recuit simulé.

[0012] De préférence, l'étape e) comporte les étapes suivantes :

- e1) définition du modèle de référence à tester comme étant le modèle de référence initial puis,
- e2) suivant les étapes suivantes, test de conditions d'acquisition virtuelles avec le modèle de référence à tester afin d'approximer finement lesdites conditions d'acquisition réelles ;

e21) détermination de conditions d'acquisition

- virtuelles à tester ;
- e22) réalisation d'une image de référence bidimensionnelle du modèle de référence à tester dans lesdites conditions d'acquisition virtuelles à tester ; 5
- e23) traitement de l'image de référence pour réaliser au moins une carte de référence représentant ladite information discriminante ;
- e24) comparaison des cartes actualisée et de référence de manière à déterminer une valeur pour une première fonction d'évaluation, ladite valeur pour la première fonction d'évaluation dépendant des différences entre lesdites cartes actualisée et de référence et correspondant à une décision de poursuivre ou de stopper la recherche de conditions d'acquisition virtuelles approxima- 10
- nt lesdites conditions d'acquisition réelles avec plus d'exactitude que lesdites conditions d'acquisition virtuelles à tester déterminées à la dernière occurrence de l'étape e21) ; 20
- e25) si ladite valeur pour la première fonction d'évaluation correspond à une décision de poursuivre ladite recherche, modification des conditions d'acquisition virtuelles à tester, puis reprise à l'étape e22) ; 25
- e3) détermination d'une valeur pour une deuxième fonction d'évaluation, ladite valeur pour la deuxième fonction d'évaluation dépendant des différences entre les cartes actualisée et de référence dans les conditions d'acquisition virtuelles approxima- 30
- nt au mieux lesdites conditions d'acquisition réelles et résultant de la dernière occurrence de l'étape e2), ladite valeur pour la deuxième fonction d'évaluation correspondant à une décision de poursuivre ou de stopper la recherche d'un modèle de référence approxima- 35
- nt le positionnement des dents lors de l'acquisition de l'image actualisée avec plus d'exactitude que ledit modèle de référence à tester utilisé à la dernière occurrence de l'étape e2), et si ladite valeur 40
- pour la deuxième fonction d'évaluation correspond à une décision de poursuivre ladite recherche, modification du modèle de référence à tester par déplacement d'un ou plusieurs modèles de dents puis reprise à l'étape e2). 45
- [0013]** Un procédé selon l'invention peut encore comporter une ou plusieurs des caractéristiques optionnelles suivantes :
- à l'étape a), on détermine un plan d'occlusion suivant les opérations suivantes :
 - I. détermination des points du modèle de référence initial qui appartiennent à une arcade et qui sont à une distance de l'autre arcade qui est inférieure à une distance prédéterminée, de préférence à une distance inférieure à 3 mm de
 - l'autre arcade, dits « points de contact » ;
 - II. optionnellement, filtrage d'une partie des points de contact, de préférence de manière que le nombre de points de contact appartenant à l'arcade supérieure soit identique au nombre de points de contact appartenant à l'arcade inférieure, de préférence en éliminant les points d'une arcade les plus éloignés de l'autre arcade ;
 - III. régression linéaire, de préférence par la méthode des moindres carrés, sur l'ensemble des points de contact restant de manière à déterminer le plan d'occlusion ;
 - à l'étape a), on effectue les opérations suivantes :
 - i. projection, dans un plan d'occlusion, des points de contact entre les dents des arcades supérieure et inférieure du patient, les points de contact et/ou le plan d'occlusion étant de préférence déterminés, suivant les étapes I à III ;
 - ii. détermination du barycentre des projections desdits points de contact et création d'un référentiel, dans le plan d'occlusion, centré sur ledit barycentre ;
 - iii. détermination, dans ledit référentiel, de la fonction parabolique, présentant le plus grand coefficient de corrélation avec l'ensemble des projections des points de contact ;
 - iv. rotation de l'ensemble des projections des points de contact autour du barycentre, et reprise de l'opération précédente *iii* jusqu'à ce que l'ensemble des projections des points de contact ait parcouru un secteur déterminé, de préférence supérieur à 90°, supérieur à 180°, voire d'environ 360° ;
 - v. identification du coefficient de corrélation le plus élevé pour l'ensemble des positions angulaires de l'ensemble des projections des points de contact autour du barycentre, et de l'axe de la fonction parabolique correspondante ;
 - vi. détermination d'un plan longitudinal médian du modèle de référence initial, ledit plan passant par ledit axe et étant perpendiculaire au plan d'occlusion ;
 - à l'étape a), on délimite au moins partiellement un modèle de dent en suivant les opérations suivantes :
 - i'. détermination, au moins partielle, des bords gingivaux intérieur et extérieur de l'arcade de la dent concernée, de préférence par analyse des variations de l'orientation de la surface du modèle de référence initial ;
 - ii'. projection, dans le plan d'occlusion, des bords gingivaux intérieur et extérieur ;
 - iii'. identification des déformations des projections des bords gingivaux intérieur et extérieur

- correspondant aux régions interdentaires, les sommets de ces déformations étant appelés « point de rapprochement » (dans une région interdendaire, les deux projections présentent chacune une pointe, les deux pointes pointant sensiblement l'une vers l'autre, l'extrémité d'une pointe étant un point de rapprochement) ;
- iv'. détermination du plus court chemin, à la surface du modèle de référence initial, entre deux points de rapprochement de bords gingivaux intérieur et extérieur, respectivement, d'une région interdendaire, de préférence par une méthode métaheuristique, de préférence évolutionniste, de préférence par recuit simulé, ledit plus court chemin délimitant au moins partiellement un modèle de dent ;
- une image actualisée est acquise moins de 7 jours après l'étape a), puis les étapes c) à f) sont mises en œuvre à partir de cette image actualisée ;
 - à l'étape b), on utilise un appareil d'acquisition porté à la main (et en particulier qui n'est pas immobilisé, par exemple au moyen d'un support reposant sur le sol) et/ou la tête du patient n'est pas immobilisée ;
 - à l'étape b), on utilise un appareil individuel choisi dans le groupe formé par un appareil photo connecté, une montre intelligente, une tablette numérique, un scanner 3D portable et un ordinateur couplé un système d'acquisition d'images, telle une webcam ou un appareil photo numérique, pour mettre en œuvre l'étape b) et de préférence au moins une des étapes, de préférence toutes les étapes c) à f) ;
 - à l'étape b), on utilise un appareil d'acquisition d'images fournissant une image actualisée infrarouge ;
 - à l'étape b), on utilise un écarteur comportant une, de préférence plus de deux marques de repérage, de préférence non alignées, et, de préférence, on utilise la représentation des marques de repérage sur l'image actualisée pour
 - à l'étape c), redécouper l'image et/ou,
 - à l'étape d), évaluer grossièrement les conditions d'acquisition réelles ;
 - à l'étape c), l'information discriminante est choisie dans le groupe constitué par une information de contour, une information de couleur, une information de densité, une information de distance, une information de brillance, une information de saturation, une information sur les reflets et des combinaisons de ces informations ;
 - à l'étape d), on utilise des données fournies par l'appareil d'acquisition et, de préférence, concernant son orientation ;
 - à l'étape e2), les conditions d'acquisition virtuelles recherchées comprennent des paramètres de calibration de l'appareil d'acquisition mis en œuvre à l'étape b) ;
 - on met en œuvre une optimisation par une méthode métaheuristique, de préférence évolutionniste, de préférence par recuit simulé pour :
 - à l'étape a), déterminer au moins partiellement un bord gingival délimitant un modèle de dent et/ou,
 - à l'étape e2), rechercher les conditions d'acquisition virtuelles correspondant aux conditions d'acquisition réelles et/ou,
 - à l'étape e), rechercher un modèle de référence correspondant à l'image actualisée ;
 - ladite méthode métaheuristique est choisie dans le groupe formé par
 - les algorithmes évolutionnistes, de préférence choisie parmi:

les stratégies d'évolution, les algorithmes génétiques, les algorithmes à évolution différentielle, les algorithmes à estimation de distribution, les systèmes immunitaires artificiels, la recombinaison de chemin Shuffled Complex Evolution, le recuit simulé, les algorithmes de colonies de fourmis, les algorithmes d'optimisation par essaims particuliers, la recherche avec tabous, et la méthode GRASP ;
 - l'algorithme du kangourou,
 - la méthode de Fletcher et Powell,
 - la méthode du bruitage,
 - la tunnelisation stochastique,
 - l'escalade de collines à recommencements aléatoires,
 - la méthode de l'entropie croisée, et
 - les méthodes hybrides entre les méthodes métaheuristiques citées ci-dessus.
- [0014]** De préférence, l'étape b) est exécutée par une personne sans formation universitaire à l'orthodontie et/ou en dehors de tout cabinet médical, de dentisterie ou d'orthodontie, et/ou sans recours à un dispositif de stabilisation mécanique de l'appareil d'acquisition et/ou sans recours à d'autres appareils qu'un téléphone mobile et/ou sans recours à une jauge étalon de calibration.
- [0015]** L'invention concerne aussi l'utilisation d'un procédé selon l'invention pour
- détecter une récurrence, et/ou

- déterminer une vitesse d'évolution d'un changement de positionnement des dents, et/ou
- optimiser la date de prise de rendez-vous chez un orthodontiste ou un dentiste, et/ou
- évaluer l'efficacité d'un traitement orthodontique, et/ou
- évaluer l'évolution du positionnement de dents vers un modèle théorique correspondant à un positionnement déterminé des dents, en particulier un positionnement amélioré des dents, et/ou
- en dentisterie.

[0016] Selon l'invention le procédé est mis en œuvre pendant un traitement orthodontique, notamment pour en contrôler le déroulement, l'étape a) étant mise en œuvre moins de 3 mois, moins de 2 mois, moins de 1 mois, moins d'une semaine, moins de 2 jours après le début du traitement, c'est-à-dire après la pose d'un appareil destiné à corriger le positionnement des dents du patient, dit « appareil de contention actif ».

[0017] Selon un exemple non revendiqué le procédé peut être également mis en œuvre après un traitement orthodontique, pour vérifier que le positionnement des dents n'évolue pas de façon défavorable (« récidive »). L'étape a) est alors de préférence mise en œuvre moins de 3 mois, moins de 2 mois, moins de 1 mois, moins d'une semaine, moins de 2 jours après la fin du traitement, c'est-à-dire après la pose d'un appareil destiné maintenir les dents en position, dit « appareil de contention passif ».

[0018] L'invention concerne également :

- un programme d'ordinateur, et en particulier un applicatif spécialisé pour téléphone mobile, comprenant des instructions de code de programme pour l'exécution d'une ou plusieurs, de préférence toutes les étapes b) à f), lorsque ledit programme est exécuté par un ordinateur,
- un support informatique sur lequel est enregistré un tel programme, par exemple une mémoire ou un CD-ROM, et
- un appareil personnel, en particulier un téléphone mobile ou une tablette, dans lequel est chargé un tel programme.

[0019] L'invention concerne enfin un système comportant

- un scanner tridimensionnel apte à mettre en œuvre l'étape a) d'un procédé selon l'invention,
- un appareil personnel, de préférence un téléphone mobile, chargé avec un programme selon l'invention.

Définitions

[0020] Par « patient », on entend toute personne pour laquelle un procédé est mis en œuvre afin d'en contrôler

les dents, que cette personne soit malade ou non.

[0021] Par « professionnel des soins dentaires », on entend un dentiste, un orthodontiste ou un laboratoire d'orthodontie.

5 **[0022]** Par « dentiste », on entend un dentiste ou un assistant dentaire travaillant sous la responsabilité d'un dentiste.

[0023] Par « dentition », on entend les deux arcades dentaires du patient.

10 **[0024]** On appelle "téléphone mobile" un appareil de moins de 500 g, doté d'un capteur lui permettant de capturer des images, capable d'échanger des données avec un autre appareil éloigné de plus de 500 km du téléphone mobile, et capable d'afficher lesdites données, et notamment lesdites images.

15 **[0025]** Les « conditions d'acquisition » précisent la position et l'orientation dans l'espace d'un appareil d'acquisition d'images relativement aux dents du patient ou à un modèle de dents du patient, et de préférence la calibration de cet appareil d'acquisition d'images.

20 **[0026]** La « calibration » d'un appareil d'acquisition est constituée par l'ensemble des valeurs des paramètres de calibration. Un paramètre de calibration est un paramètre intrinsèque à l'appareil d'acquisition (à la différence de sa position et de son orientation) dont la valeur influence l'image acquise. Par exemple, l'ouverture de diaphragme est un paramètre de calibration qui modifie la profondeur de champ. Le temps d'exposition est un paramètre de calibration qui modifie la luminosité (ou
25 « l'exposition ») de l'image. La distance focale est un paramètre de calibration qui modifie l'angle de vue, c'est-à-dire le degré de « zoom ». La « sensibilité » est un paramètre de calibration qui modifie la réaction du capteur d'un appareil d'acquisition numérique à la lumière incidente.
30

35 **[0027]** De préférence, les paramètres de calibration sont choisis dans le groupe formé par l'ouverture de diaphragme, le temps d'exposition, la distance focale et la sensibilité.

40 **[0028]** Le "plan d'occlusion" est le plan qui fournit la meilleure corrélation linéaire avec l'ensemble des points de contact entre les dents de l'arcade supérieure d'une part et les dents de l'arcade inférieure d'autre part.

45 **[0029]** Le "plan longitudinal médian" est le plan sensiblement vertical lorsque le patient tient la tête droite, qui sépare de manière sensiblement symétrique des parties droite et gauche de chaque arcade.

[0030] Une « tablette » est un ordinateur portable à écran tactile.

50 **[0031]** Un scanner 3D est un appareil permettant d'obtenir une représentation en trois dimensions d'un objet.

[0032] Par "image", on entend une image en deux dimensions, comme une photographie. Une image est formée de pixels.

55 **[0033]** Une "information discriminante" est une information caractéristique qui peut être extraite d'une image ("image feature"), classiquement par un traitement informatique de cette image.

[0034] Une information discriminante peut présenter un nombre variable de valeurs. Par exemple, une information de contour peut être égale à 1 ou 0 selon qu'un pixel appartient ou non à un contour. Une information de brillance peut prendre un grand nombre de valeurs. Le traitement de l'image permet d'extraire et de quantifier l'information discriminante.

[0035] Des conditions d'acquisition sont dites "virtuelles" lorsqu'elles correspondent à une simulation dans laquelle l'appareil d'acquisition serait dans lesdites conditions d'acquisition (positionnement et de préférence calibration théoriques de l'appareil d'acquisition).

[0036] Par "comprenant un" ou "comportant un" ou "présentant un", on entend "comportant au moins un", sauf indication contraire.

Brève description des figures

[0037] D'autres caractéristiques et avantages de l'invention apparaîtront encore à la lecture de la description détaillée qui va suivre et à l'examen du dessin annexé dans lequel :

- la figure 1 représente un logigramme illustrant la mise en œuvre d'un procédé selon l'invention,
- la figure 2 représente un exemple de modèle de référence initial,
- la figure 3 illustre le traitement effectué pour déterminer le plan d'occlusion,
- la figure 4 (4a-4d) illustre l'étape nécessaire pour déterminer les modèles de dent dans un modèle de référence,
- la figure 5 (5a-5d) illustre l'acquisition d'images actualisées, ainsi que l'opération de découpage,
- la figure 6 (6a-6b) illustre le traitement d'une image actualisée permettant de déterminer le contour des dents, et
- la figure 7 illustre schématiquement la position relative de marques de repérage 12 sur des images actualisées 14₁ et 14₂ d'un écarteur 10, selon la direction d'observation (trait interrompu), et
- les figures 8a et 8b illustrent deux vues d'un modèle tridimensionnel avec deux distances focales différentes.

Description détaillée

[0038] Un procédé selon l'invention comporte les étapes mentionnées ci-dessus.

[0039] **A l'étape a)**, un modèle de référence initial des arcades, ou d'une partie des arcades du patient est créé (voir figure 2).

[0040] Le modèle de référence initial est un modèle numérique en trois dimensions des arcades du patient, par exemple du type .stl ou .Obj, .DXF 3D, IGES, STEP, VDA, ou Nuages de points. Avantageusement, un tel modèle, dit « 3D », peut être observé selon un angle quelconque.

[0041] Pour le suivi d'un traitement orthodontique, le modèle de référence initial est de préférence préparé au début du traitement. Le modèle de référence initial peut correspondre à un positionnement des dents du patient avant le traitement ou à un positionnement des dents du patient que le traitement se propose d'atteindre. Dans ce cas, le modèle de référence initial est classiquement calculé à partir d'un premier modèle tridimensionnel correspondant au positionnement des dents du patient avant le traitement.

[0042] Selon un exemple non revendiqué, pour le contrôle de la récurrence, le modèle de référence initial est de préférence préparé moins de six mois, de préférence moins de trois mois, de préférence encore moins d'un mois après la fin du traitement orthodontique, généralement immédiatement après la fin du traitement. Il correspond ainsi à un positionnement sensiblement optimal des dents.

[0043] Selon un exemple non revendiqué, le modèle de référence initial peut être également préparé indépendamment de tout traitement, par exemple parce que le patient souhaite surveiller les mouvements de ses dents.

[0044] Le modèle de référence initial peut être préparé à partir de mesures effectuées sur les dents du patient ou sur un modèle physique de ses dents, par exemple un modèle en plâtre.

[0045] Le modèle de référence initial est de préférence créé au moyen d'un appareil professionnel, par exemple au moyen d'un scanner 3D, de préférence mis en œuvre par un professionnel de la santé, par exemple par un orthodontiste ou un laboratoire d'orthodontie. Dans un cabinet d'orthodontie, le patient ou le modèle physique de ses dents peuvent être avantageusement disposés dans une position précise et l'appareil professionnel peut être perfectionné. Il en résulte un modèle de référence initial très précis. Le modèle de référence initial fournit de préférence une information sur le positionnement des dents avec une erreur inférieure à 5/10 mm, de préférence inférieure à 3/10 mm, de préférence inférieure à 1/10 mm.

Orientation du modèle de référence initial :

[0046] De préférence, on détermine l'orientation du modèle de référence initial dans l'espace, et notamment, de préférence, le plan d'occlusion et le plan longitudinal médian.

[0047] Le plan d'occlusion et le plan longitudinal médian peuvent être déterminés manuellement, de manière approximative. Les inventeurs ont cependant découvert des procédés permettant de déterminer ces plans par traitement informatique.

[0048] De préférence, le modèle de référence est un modèle des arcades bouche fermée, c'est-à-dire dans une position dans laquelle des dents de l'arcade supérieure sont en contact avec des dents de l'arcade inférieure.

[0049] Classiquement, le modèle de référence initial

fourni par un scanner tridimensionnel permet de distinguer l'arcade supérieure de l'arcade inférieure. Généralement, le modèle est fourni sous la forme de deux fichiers correspondant respectivement à ces arcades, et comportant des données permettant de positionner les modèles de ces arcades l'un par rapport à l'autre dans la position d'occlusion.

[0050] De préférence, pour estimer les points de contact entre les dents des arcades supérieure et inférieure, on détermine l'ensemble des points du modèle de l'arcade supérieure et de l'arcade inférieure qui sont à une distance inférieure à une limite prédéterminée, cette limite étant de préférence inférieure à 3 mm, de préférence d'environ 2 mm. Tous les autres points de ces modèles sont ensuite ignorés, ce qui conduit à la représentation de la figure 3b. Une régression linéaire permet alors de déterminer le plan d'occlusion (« plan 1 » sur la figure 3c).

[0051] Le modèle de référence initial peut ainsi être orienté suivant le plan d'occlusion (Fig. 3d).

[0052] Si le modèle de référence initial ne comporte pas de données permettant de positionner les arcades supérieure et inférieure l'une par rapport à l'autre, on utilise de préférence un mordu d'occlusion faisant apparaître les points de contact entre les dents supérieures et les dents inférieures, puis on repositionne les modèles des arcades supérieure et inférieure par rapport à ce mordu d'occlusion.

[0053] Le plan longitudinal médian est perpendiculaire au plan d'occlusion, mais son orientation n'est pas connue.

[0054] De préférence, on procède de la manière suivante pour déterminer l'orientation du plan longitudinal médian :

On considère des axes [Ox] et [Oy] dans le plan d'occlusion, le point O étant le barycentre des projections normales des points de contact sur le plan d'occlusion.

- Dans ce référentiel (xOy), on recherche la courbe, de préférence parabolique, présentant le plus grand coefficient de corrélation avec l'ensemble desdites projections.
- L'ensemble des projections des points de contact est ensuite déplacé dans le plan d'occlusion, par rotation autour du point O, et on recommence l'étape précédente à partir de cette nouvelle position angulaire des projections des points de contact.

[0055] Le cycle des opérations précédentes est poursuivi, de préférence jusqu'à avoir fait tourner l'ensemble des points de contact de 360° autour du barycentre O. On compare ensuite les coefficients de corrélation correspondant aux différentes orientations de l'ensemble des points de contact. L'axe de la courbe qui conduit au coefficient de corrélation le plus élevé est alors considéré comme inclus dans le plan longitudinal médian, ce qui permet de définir exactement l'orientation de ce dernier.

[0056] L'orientation dans l'espace du modèle de réfé-

rence initial est ainsi parfaitement déterminée, de manière rapide.

Création des modèles de dent

[0057] Dans le modèle de référence initial, une partie qui correspond à une dent, ou « modèle de dent », est délimitée par un bord gingival qui peut être décomposé en un bord gingival intérieur (du côté de l'intérieur de la bouche par rapport à la dent), un bord gingival extérieur (orienté vers l'extérieur de la bouche par rapport à la dent) et deux bords gingivaux latéraux. Les bords gingivaux correspondent à des régions dans lesquelles l'orientation de la surface définie par le modèle de référence initial subit des modifications de fortes amplitudes. Ces variations d'orientation peuvent être identifiées selon des techniques connues, par exemple en identifiant les changements de direction de la normale à la surface modélisée. La figure 4a représente une vue du modèle de référence initial traitée pour faire apparaître ces changements de direction. La figure 4b montre le bord gingival intérieur qui peut être extrait par l'analyse de l'image de la figure 4a.

[0058] Plusieurs vues du modèle de référence initial sont ainsi analysées, ce qui permet de déterminer les bords gingivaux intérieur et extérieur en trois dimensions, comme représenté sur la figure 4c.

[0059] Par ailleurs, en projection dans le plan d'occlusion, les contours gingivaux intérieur et extérieur d'une arcade se rapprochent de part et d'autre d'une dent. Pour déterminer un bord gingival latéral d'une dent, on recherche le plus court chemin, sur la surface du modèle de référence initial, entre les deux points des bords gingivaux intérieur et extérieur ainsi rapprochés et qui se font sensiblement face. La recherche du plus court chemin entre deux points sur un modèle tridimensionnel fait appel à des techniques d'optimisation bien connues. De préférence, cette recherche résulte d'une méthode métaheuristique, de préférence évolutionniste, de préférence d'un recuit simulé.

[0060] Deux bords gingivaux latéraux adjacents et les parties des bords gingivaux intérieur et extérieur qui connectent ces bords gingivaux latéraux permettent ainsi de délimiter une dent au niveau de la gencive. En tenant compte du fait qu'une dent s'étend depuis le contour gingival vers le plan d'occlusion, il est ainsi possible de déterminer les parties du modèle de référence initial qui correspondent aux différentes dents (« modèles de dent »). La figure 4d représente l'ensemble des modèles de dent d'une arcade.

[0061] Le modèle de référence initial peut être stocké dans une base de données centralisée, regroupant les modèles de référence initiaux d'une pluralité de patients. Cette base de données peut être physiquement installée dans un établissement spécialisé. Elle peut être également installée dans un laboratoire ou un cabinet d'orthodontie, ce qui limite les transferts d'informations confidentielles.

[0062] Dans un mode de réalisation, le modèle de référence initial est remis au patient. De préférence, un fichier informatique correspondant au modèle de référence initial est enregistré sur un support amovible, par exemple sur une clé USB ou sur une carte électronique, de préférence sur un téléphone mobile, une tablette ou un ordinateur portable du patient, et en particulier sur l'appareil personnel qui sera de préférence utilisé aux étapes b) et suivantes. De préférence, le patient ou un professionnel des soins dentaires charge le modèle de référence initial dans ledit appareil individuel ou le met à disposition pour chargement dans ledit appareil individuel. Le patient charge de préférence le modèle de référence initial à partir d'internet.

[0063] Dans un mode de réalisation préféré, le modèle de référence n'est pas remis au patient. De préférence, le modèle de référence est seulement rendu disponible à un établissement spécialisé pour mettre en œuvre les étapes c) à f). Il peut rester stocké dans l'établissement dans lequel il a été réalisé à l'étape a) et où, de préférence, les étapes c) à f) sont mises en œuvre.

[0064] A l'étape b), on prend une image actualisée des arcades au moyen d'un appareil d'acquisition d'images. L'étape b) est de préférence réalisée par le patient ou un proche du patient, mais peut être réalisée par un dentiste.

Moment de l'acquisition

[0065] De préférence, l'image actualisée est prise après un intervalle de temps Δt après l'étape a). L'intervalle de temps Δt peut être prédéterminé. Il peut être constant, quelle que soit l'occurrence du procédé, c'est-à-dire que cet intervalle concerne la première exécution du procédé ou une exécution ultérieure. Il peut être variable, et dépendre par exemple des résultats obtenus suite à une exécution antérieure du procédé. En particulier, pour le contrôle de la récurrence, l'intervalle de temps Δt peut être d'autant plus court que cette exécution a permis de détecter une dérive importante.

[0066] Dans un mode de réalisation préféré, l'intervalle de temps Δt est déterminé par l'orthodontiste, en fonction d'un planning des contrôles. En fonction de l'évolution de la position des dents, l'orthodontiste peut modifier ce planning et modifier en conséquence l'intervalle de temps Δt . Dans un mode de réalisation, le procédé selon l'invention est exécuté plusieurs fois, les intervalles de temps entre chaque exécution pouvant être identiques ou différents. Les intervalles des temps entre deux exécutions successives peuvent être tous déterminés avant la première exécution pour correspondre à un planning de contrôles élaboré par l'orthodontiste.

[0067] L'intervalle de temps Δt peut être également indéterminé et dépendre par exemple de décisions du patient. Par exemple, la création d'une image actualisée peut être effectuée à l'occasion d'un rendez-vous chez le dentiste ou à tout moment lorsque le patient le souhaite, voire indépendamment de tout traitement ortho-

dontique.

[0068] L'intervalle de temps Δt est de préférence déterminé pour correspondre à une évolution potentiellement significative du positionnement des dents.

[0069] Par exemple, pour le contrôle de la récurrence, l'intervalle de temps Δt est de préférence inférieur à trois mois lors de la première année après le traitement. Après cette première année, l'intervalle de temps Δt est de préférence supérieur à un mois, voire supérieur à six mois ou supérieur à douze mois. En particulier pour la détection d'une dérive des dents, un intervalle de temps compris entre six mois et dix-huit mois est adapté.

[0070] De préférence, au moins un rappel informant le patient de la nécessité de créer une image actualisée est adressé au patient. Ce rappel peut être sous forme papier ou, de préférence, sous forme électronique, par exemple sous la forme d'un courriel, d'une alerte automatique de l'appliquatif spécialisé mobile ou d'un SMS. Un tel rappel peut être envoyé par le cabinet ou le laboratoire d'orthodontie ou par le dentiste ou par l'appliquatif spécialisé mobile du patient, par exemple.

[0071] Dans un mode de réalisation préféré, une image actualisée est acquise avant que les dents n'aient pu se déplacer significativement, sensiblement au même moment que la création du modèle de référence initial, de préférence moins de 7 jours, moins de 3 jours, moins de 1 jour après l'étape a), c'est-à-dire avant que les dents n'aient pu se déplacer significativement. La mise en œuvre du procédé avec cette image actualisée permet avantageusement de vérifier que le procédé ne conduit à la détection d'aucune différence entre les modèles de référence initial et final, et donc fonctionne correctement.

[0072] Dans un mode de réalisation, l'image actualisée peut être acquise avant la création du modèle de référence initial. Par exemple, les étapes a) et b) peuvent être effectuées à la fin et au début d'un traitement orthodontique, respectivement. Il est ainsi notamment possible d'évaluer l'efficacité du traitement en l'absence de modèle 3D en début de traitement. L'intervalle de temps Δt séparant les étapes a) et b) dans ce mode de réalisation peut notamment prendre les valeurs décrites ci-dessus pour Δt .

Appareil d'acquisition d'images

[0073] De préférence, l'appareil d'acquisition d'images est un appareil personnel couramment disponible dans le commerce, par exemple un téléphone mobile, un appareil photo dit « connecté », une montre dite « intelligente », ou « smartwatch », ou une tablette ou un ordinateur personnel, fixe ou portable, comportant un système d'acquisition d'images, comme une webcam ou un appareil photo, de préférence un appareil photo numérique. Même si l'image actualisée peut en particulier être créée par un dentiste, elle l'est de préférence par le patient lui-même ou par un de ses proches.

[0074] En particulier, l'image actualisée peut être créée par une personne qui n'a pas de connaissances

particulières en orthodontie, et en particulier qui ne possède aucun diplôme d'orthodontie ou de dentisterie.

[0075] De préférence, le même appareil d'acquisition est utilisé pour prendre toutes les images actualisées.

[0076] L'appareil d'acquisition d'images pèse de préférence moins de 3 kg, moins de 2 kg, moins de 1 kg, moins de 500 g, de préférence moins de 300 g.

[0077] L'étape b) peut donc avantageusement être réalisée à distance de l'étape a), c'est-à-dire dans un lieu différent de celui dans lequel est réalisée l'étape a), en particulier à plus de 50 m, plus de 100 m, plus de 1 km du lieu où est réalisée l'étape a), en particulier hors cabinet orthodontique. Dans un mode de réalisation, l'étape b) n'est pas réalisée dans un cabinet dentaire, un cabinet d'orthodontie ou un laboratoire d'orthodontie, sauf, éventuellement, lors d'une séance destinée à former le patient.

[0078] De préférence, l'image actualisée est une photographie, en particulier une photographie panoramique. Dans un mode de réalisation, l'image actualisée est extraite d'un film.

[0079] Dans un mode de réalisation préféré, le procédé utilise plusieurs images actualisées pour disposer d'au moins une représentation de chaque dent, de préférence au moins trois images actualisées correspondant à une vue de face, une vue à droite et une vue à gauche des dents du patient.

[0080] De préférence, à l'étape b), on prend au moins une image actualisée en position bouche fermée et au moins une image actualisée en position bouche ouverte. L'image bouche fermée permet avantageusement d'identifier les déplacements relatifs entre les deux arcades. L'image actualisée bouche ouverte permet avantageusement de bien identifier les contours des dents, sans que les dents de l'arcade supérieure ne viennent masquer les dents de l'arcade inférieure ou réciproquement.

[0081] Des images actualisées peuvent être prises soit pour l'arcade supérieure, soit pour l'arcade inférieure, soit, de préférence, pour les deux arcades.

[0082] Plusieurs images similaires (représentant sensiblement les mêmes dents) peuvent être également utiles afin de rechercher le meilleur score. En fonction des conditions d'acquisition, une information discriminante pourra en particulier conduire à des scores différents selon l'image actualisée utilisée.

[0083] De préférence, on utilise un écarteur lors de l'étape b), comme représenté sur les figures 5a et 5c. La première fonction de l'écarteur est d'écarter les lèvres afin d'améliorer la visibilité des dents. De préférence, un écarteur est remis au patient, par exemple lors d'un rendez-vous avec son orthodontiste ou son dentiste.

[0084] L'appareil d'acquisition d'images fournit de préférence des images en couleurs, et/ou des images infrarouges de la bouche du patient, voire du visage du patient. Les images en couleurs représentent de préférence la bouche du patient avec les couleurs réelles de cette bouche. Les images infrarouges permettent avantageusement de faire apparaître les dents avec un excellent

contraste.

[0085] De préférence, l'appareil d'acquisition d'images comporte un applicatif spécialisé permettant de mettre en œuvre l'étape b), mais aussi, de préférence, des étapes suivantes, de préférence l'ensemble des étapes suivantes. De préférence encore, cet applicatif gère des rappels et informe le patient de la nécessité de créer une image actualisée.

[0086] De préférence, l'applicatif spécialisé est chargé dans l'appareil d'acquisition d'images à partir d'un support physique comme une clé USB ou un CD-ROM, ou est téléchargé sur internet ou par voie hertzienne. Dans un mode de réalisation, l'applicatif spécialisé est fourni au patient par le cabinet et/ou le laboratoire d'orthodontie. Il peut en particulier prendre la forme d'un applicatif du type de ceux couramment téléchargés sur les iPhones de la marque Apple® ou les appareils de toutes marques mettant en œuvre les systèmes d'exploitation Android® ou tout autre système d'exploitation.

[0087] L'appareil d'acquisition d'images comporte de préférence un appareil photo ou une caméra vidéo ou infrarouge, que l'utilisateur, par exemple le patient ou un de ses proches, positionne au moyen d'un viseur ou d'un écran, avant de l'actionner.

Moyens détrompeurs

[0088] Un procédé selon l'invention ne requiert pas un positionnement précis de l'appareil d'acquisition d'images par rapport aux dents.

[0089] Dans un mode de réalisation, aucune contrainte de positionnement permettant d'assurer une disposition de l'appareil d'acquisition d'images à moins de 30 cm, moins de 20 cm, de 10 cm ou moins de 5 cm d'un emplacement déterminé n'est imposée.

[0090] De préférence, l'appareil d'acquisition d'images comporte cependant des moyens détrompeurs facilitant son positionnement approximatif par rapport au patient avant l'acquisition de l'image actualisée.

[0091] L'utilisateur peut être guidé par des messages écrits et/ou vocaux pour l'acquisition. Par exemple, l'appareil personnel peut annoncer « prenez une photo de face », émettre un signal pour informer l'utilisateur que la photo est acceptable ou qu'au contraire, il doit refaire une photo, annoncer « prenez une photo de droite », de préférence en affichant une flèche pour orienter l'utilisateur, etc. La fin du processus d'acquisition peut être également annoncée par l'appareil. L'appareil peut également aider au positionnement, par exemple par des messages visuels (par exemple par affichage de flèches), et/ou sonores (comme une succession de bips dont la fréquence augmente à mesure que le positionnement de l'appareil s'améliore), et/ou écrits et/ou vocaux (« plus haut », plus bas », etc.).

[0092] Les moyens détrompeurs peuvent en particulier comporter des références qui apparaissent sur le viseur ou l'écran. Les références peuvent par exemple comporter une ligne destinée à être alignée avec la direction

générale de la jointure entre les dents supérieures et/ou les dents inférieures lorsque les dents sont serrées par le patient, ou une ligne verticale destinée à être alignée avec la jointure entre les deux incisives supérieures. Les références peuvent également faire référence à d'autres parties du patient. Par exemple, elles peuvent être constituées par des marques correspondant à la position des yeux ou prendre la forme d'un contour dans lequel doit être positionné la bouche ou le visage du patient.

[0093] La ou les références sont de préférence "immobiles" sur l'écran, c'est-à-dire qu'elles ne se déplacent pas sur l'écran lorsque l'appareil d'acquisition est en mouvement.

[0094] Dans un mode de réalisation préféré, la ou les références correspondent chacune à une marque de repérage portée par un référentiel rapporté sur le patient, c'est-à-dire que le patient ne présentait pas avant la mise en œuvre du procédé, de préférence portée par un écarteur dentaire. Un référentiel peut être également une pièce mordue par le patient.

[0095] La marque de repérage peut présenter une surface supérieure à 0,5 mm², de préférence supérieure à 1 mm², de préférence supérieure à 2 mm², de préférence supérieure à 5 mm², de préférence supérieure à 10 mm², voire supérieure à 20 mm², voire supérieure à 30 mm², et/ou inférieure à 50 mm².

[0096] De grandes dimensions conférées à une marque de repérage ou une multiplication des marques de repérage permettent avantageusement d'améliorer la précision du positionnement de l'appareil d'acquisition.

[0097] Les marques de repérage peuvent être identiques ou différentes.

[0098] Les marques de repérage peuvent être notamment différentes selon leur position, par exemple selon qu'elles sont en partie supérieure ou en partie inférieure du référentiel, et en particulier de l'écarteur, ou à droite ou à gauche du référentiel, et en particulier de l'écarteur.

[0099] La marque de repérage peut être identique ou différente de la référence correspondante. Elle est de préférence de forme géométrique, par exemple un point, un ou plusieurs traits, par exemple parallèles, une étoile, un cercle, un oval, un polygone régulier, notamment un carré, un rectangle ou un losange.

[0100] La marque de repérage peut être également une image, une lettre, un chiffre ou une séquence de lettres et/ou de chiffres.

[0101] La marque de repérage est de préférence d'une couleur différente de la surface de l'écarteur qui l'environne, de préférence de manière à offrir un contraste élevé.

[0102] Une marque de repérage peut être visible ou invisible à l'œil nu, pourvu qu'elle apparaisse sur l'écran de l'appareil d'acquisition.

[0103] Pour améliorer la précision, les marques de repérage sont de préférence écartées les unes des autres de manière que, lorsqu'elles correspondent à leurs références respectives sur l'écran, au moins des première et deuxième marques de repérage soient à moins de 3

cm, de préférence moins de 2 cm, de préférence moins de 1 cm, de préférence moins de 0,5 cm, de premier et deuxième bords, respectivement, de l'écran. Les premier et deuxième bords sont de préférence des bords opposés de l'écran.

[0104] La marque de repérage peut présenter une ou plusieurs dimensions et/ou une forme et/ou une couleur identique(s) ou différente(s) de celle(s) de la référence correspondante.

[0105] La « correspondance » d'une référence et d'une marque de repérage est une disposition prédéfinie de l'une par rapport à l'autre. Elle indique un positionnement particulier de l'appareil d'acquisition par rapport à la marque de repérage. La correspondance dépend de la nature de la référence et de la marque de repérage. La situation prédéfinie, qui correspond à des conditions d'acquisition cibles, peut notamment être une superposition, totale ou partielle, une juxtaposition, ou un alignement de la référence et de la marque de repérage.

[0106] La superposition exacte de la référence et de la marque de repérage permet non seulement déterminer la direction vers laquelle l'objectif de l'appareil d'acquisition doit pointer et/ou la distance entre l'appareil d'acquisition et l'écarteur, mais aussi, si la référence et/ou la marque de repérage sont asymétriques, l'orientation de l'appareil d'acquisition autour de cette direction.

[0107] Les dimensions et/ou les surfaces d'une marque de repérage et de la référence correspondante et/ou la distance entre plusieurs marques de repérage et entre des références correspondantes peuvent être utilisées pour régler la distance entre l'appareil d'acquisition et les arcades.

[0108] La référence peut être par exemple

- une ligne fixe, sur laquelle l'utilisateur doit par exemple aligner des marques de repérage,
- une forme, de préférence asymétrique, correspondant à la forme d'une marque de repérage à superposer, par exemple un point que l'utilisateur doit par exemple superposer à la marque de repérage, ou un cercle dans lequel l'utilisateur doit par exemple placer la marque de repérage,
- une forme colorée correspondant à la couleur d'une marque de repérage à superposer,
- une forme complémentaire à la forme d'une marque de repérage, de préférence de manière que la mise en correspondance de la marque de repérage et de la référence conduise à une forme ayant un sens, comme une forme géométrique, une lettre ou un texte, un dessin, ou un motif, par exemple.

[0109] Dans un mode de réalisation préféré, les références sont définies, au moins partiellement, à partir d'informations fournies par le modèle de référence initial. Par exemple, suivant les principes de la « réalité augmentée », la référence peut être une vue du modèle de référence initial, par exemple une vue de face ou une vue de droite ou une vue de gauche du modèle de référé-

rence initial, rendue visible, en transparence, sur l'écran de l'appareil d'acquisition d'images lors de l'acquisition. Il est ainsi très facile pour le patient de superposer approximativement une telle vue avec les dents qu'il doit prendre en photo.

[0110] Dans un mode de réalisation, le positionnement de l'appareil d'acquisition d'images résulte de la seule mise en concordance de références apparaissant sur l'écran dudit appareil d'acquisition avec des marques de repérage correspondantes, de préférence avec des marques de repérage d'un écarteur dentaire.

[0111] Dans un mode de réalisation, la ou les références qui apparaissent sur l'écran sont déterminées en fonction du patient et/ou du traitement thérapeutique. Autrement dit, le programme d'ordinateur est paramétré en fonction du patient afin que les images acquises correspondent spécifiquement aux besoins du patient. Avantageusement, au moment de l'acquisition des images, l'appareil d'acquisition est donc positionné dans une position sensiblement optimale au regard des particularités du patient et/ou du traitement thérapeutique appliqué.

[0112] Comme on le verra plus en détails dans la suite de la description, les marques de repérage de l'écarteur ont de préférence plusieurs fonctions. Elles permettent d'abord de guider le positionnement de l'appareil d'acquisition d'images au moment de l'acquisition des images, au moyen de références correspondantes apparaissant sur l'écran de l'appareil d'acquisition. Elles permettent également, à l'étape c), un redécoupage des images actualisées. Enfin, les marques de repérage, qui apparaissent sur les images, permettent, à l'étape d), de déterminer grossièrement des conditions d'acquisition virtuelles approximant les conditions d'acquisition réelles, ce qui permet d'accélérer le traitement informatique.

[0113] Les étapes c) et suivantes sont de préférence réalisées soit sur un appareil personnel du patient, de préférence avec l'appareil utilisé à l'étape b), soit avec un applicatif chez un professionnel des soins dentaires, soit avec un serveur tiers dédié.

[0114] **A l'étape c)**, chaque image actualisée est analysée de manière à réaliser, pour chaque image actualisée, une carte actualisée relative à au moins une information discriminante.

Redécoupage

[0115] L'analyse de l'image peut comporter un redécoupage de l'image actualisée afin d'isoler la partie pertinente, en particulier pour supprimer, au moins partiellement, de l'image actualisée les éléments qui n'ont pas fait l'objet du modèle de référence initial, comme le nez ou les yeux du patient ou l'écarteur. Ce redécoupage, ou « croppage », est facilité par la représentation de marques de repérage sur l'image actualisée.

[0116] En particulier, de préférence, comme représenté sur les figures 5a et 5c, l'écarteur 10 porte au moins trois marques de repérage 12 non alignées. Si l'écarteur

est en plusieurs parties, par exemple classiquement en deux parties, chaque partie porte de préférence au moins trois marques de repérage non alignées.

[0117] La forme d'une marque de repérage, par exemple une forme asymétrique, peut être également utilisée pour repérer la position de l'écarteur sur l'image actualisée.

[0118] De préférence, les marques de repérage présentent des formes et/ou des couleurs facilitant leur identification sur une image actualisée. Par exemple, elles peuvent être de couleur noire alors que le reste de l'écarteur est de couleur blanche.

[0119] Dans un mode de réalisation, les marques de repérage présentent des formes et/ou des couleurs permettant de les identifier individuellement. Par exemple, elles peuvent être chacune de couleur différente.

[0120] L'identification des marques de repérage sur l'image actualisée permet d'identifier la zone de l'image actualisée contenant les éléments ayant fait l'objet du modèle de référence initial, c'est-à-dire les dents et les gencives. L'image actualisée peut alors être rognée en conséquence. La comparaison des figures 5a et 5b, ou 5c et 5d, illustre l'effet du redécoupage sur une image actualisée.

Carte actualisée

[0121] Une carte actualisée représente une information discriminante dans le référentiel de l'image actualisée. Par exemple, la figure 6b est une carte actualisée relative au contour des dents obtenue à partir de l'image actualisée de la figure 6a.

[0122] L'information discriminante est de préférence choisie dans le groupe constitué par une information de contour, une information de couleur, une information de densité, une information de distance, une information de brillance, une information de saturation, une information sur les reflets et des combinaisons de ces informations.

[0123] L'homme de l'art sait comment traiter une image actualisée pour faire apparaître l'information discriminante. Ce traitement comporte par exemple l'application de masques ou de filtres bien connus, fournis avec des logiciels de traitement d'images.

[0124] **A l'étape optionnelle d)**, on détermine, de manière grossière, les conditions d'acquisition réelles lors de l'étape b). Autrement dit, on détermine au moins la position relative de l'appareil d'acquisition d'images au moment où il a pris l'image actualisée (position de l'appareil d'acquisition dans l'espace et orientation de cet appareil). L'étape d) permet avantageusement de limiter le nombre de tests sur des conditions d'acquisition virtuelles lors de l'étape e), et permet donc d'accélérer considérablement l'étape e).

[0125] On utilise de préférence une ou plusieurs règles heuristiques. Par exemple, de préférence, on exclut des conditions d'acquisition virtuelles susceptibles d'être testées à l'étape e), les conditions qui correspondent à une position de l'appareil d'acquisition d'images derrière les

dents ou à une distance des dents supérieure à 1 m.

[0126] Dans un mode de réalisation préféré, comme illustré sur la figure 7, on utilise des marques de repérage représentées sur l'image actualisée, et en particulier des marques de repérage 12 de l'écarteur, pour déterminer une région de l'espace sensiblement conique délimitant des conditions d'acquisition virtuelles susceptibles d'être testées à l'étape e), ou "cône de test".

[0127] Précisément, on dispose de préférence au moins trois marques de repérage 12 non alignées sur l'écarteur 10, par exemple, et on mesure précisément leurs positions relatives sur l'écarteur.

[0128] Les marques de repérage sont ensuite repérées sur l'image actualisée, comme décrit précédemment. De simples calculs trigonométriques permettent de déterminer approximativement la direction selon laquelle l'image actualisée a été prise. Un cône orienté selon cette direction, dont le sommet est au niveau de l'écarteur et dont le demi-angle au sommet est de préférence inférieur à 10°, de préférence inférieur à 5°, par exemple de 3° peut alors être défini comme "cône de test". Le demi-angle au sommet correspond à un degré d'incertitude. Plus le demi-angle au sommet est petit, plus grande est la probabilité que les conditions d'acquisition virtuelles correspondant aux conditions d'acquisition réelles soient hors du cône de test.

[0129] Par exemple, lorsque l'image actualisée est prise perpendiculairement au plan des trois marques de repérage sur l'écarteur, on peut en déduire que l'appareil d'acquisition était sensiblement dans un cône de test dont l'axe est sensiblement perpendiculaire à ce plan lors de la prise de l'image actualisée. Si les positions relatives des trois marques de repérage sur l'image actualisée sont différentes de celles que les marques de repérage occupent sur l'écarteur, l'axe du cône de test dans lequel est limitée la recherche du positionnement de l'appareil d'acquisition lors de l'acquisition de l'image actualisée est incliné par rapport au plan des marques de repérage, comme représenté sur la figure 7. Dans un mode de réalisation particulier, comme illustré sur les figures 5a et 5c, l'écarteur comporte des parties gauche et droite indépendantes, qui comportent chacune au moins trois marques de repérage, de préférence au moins quatre marques de repérage. Un cône de test gauche peut être ainsi déterminé au moyen des marques de repérage de la partie gauche et un cône de test droit peut être déterminé au moyen des marques de repérage de la partie droite de l'écarteur. Les conditions d'acquisition virtuelles susceptibles d'être testées peuvent être ensuite limitées à des positions de l'appareil d'acquisition dans l'espace appartenant à ces deux cônes de test. On peut aussi considérer que la meilleure évaluation de la position de l'appareil d'acquisition correspond à la position moyenne entre la meilleure position dans le cône de test gauche et la meilleure position dans le cône de recherche droit.

[0130] La position des marques de repérage sur l'image actualisée permet également d'évaluer l'assiette de

l'appareil d'acquisition lors de la capture de l'image actualisée. Par exemple, si on sait que deux marques de repérage sont sensiblement alignées selon une direction horizontale lors de l'acquisition de l'image actualisée, la direction de la droite contenant ces deux points sur l'image actualisée fournit une indication sur l'orientation de l'appareil d'acquisition dans les conditions d'acquisition réelles.

[0131] Enfin, la taille des marques de repérage sur l'image actualisée ou leur espacement peuvent permettre d'évaluer la distance entre l'appareil d'acquisition d'images et les dents lors de l'acquisition de l'image actualisée, et donc de réduire le cône de test à un tronc de cône.

[0132] A l'étape optionnelle d), on peut également utiliser des données fournies par l'appareil d'acquisition et concernant son orientation, par exemple des données gyroscopiques.

[0133] De préférence, à l'étape d), on détermine, de manière grossière, la calibration de l'appareil d'acquisition réelle lors de l'étape b).

[0134] La façon dont chaque paramètre de calibration agit sur l'image acquise est bien connue. En particulier, le fonctionnement d'un appareil d'acquisition peut être classiquement modélisé de manière à pouvoir tester une calibration particulière sur l'image acquise. Les inventeurs ont inversé un tel modèle, sans difficulté technique particulière, afin que par l'analyse de la représentation de l'écarteur, il soit possible d'évaluer grossièrement la calibration de l'appareil d'acquisition lors de l'étape b).

[0135] Par exemple, le rapport entre la surface des marques de repérage sur l'image actualisée et la surface de l'image actualisée permet d'évaluer la distance focale de l'appareil d'acquisition lors de l'étape b). La représentation d'une marque de repérage dont on connaît les caractéristiques optiques permettent d'évaluer le temps d'exposition et la sensibilité.

[0136] Dans un mode de réalisation préféré, une marque de repérage est un relief qui ne s'étend pas exclusivement dans le plan général de l'écarteur, correspondant à un plan parallèle au frontal (ou coronal). De préférence, une marque de repérage est un relief qui s'étend dans un plan sensiblement perpendiculaire au plan général de l'écarteur. Le relief peut en particulier présenter la forme d'une languette qui, lorsque l'écarteur est dans sa position de service, s'étend vers le fond de la bouche.

[0137] L'analyse de la représentation de ce relief permet avantageusement d'évaluer la profondeur de champ. Alternativement, deux marques de repérage qui ne sont pas dans un même plan frontal peuvent être utilisées à cet effet.

[0138] L'étape d) ne permet qu'une évaluation grossière des conditions d'acquisition réelles. L'étape d) permet cependant de déterminer un ensemble restreint de conditions d'acquisition virtuelles susceptibles de correspondre aux conditions d'acquisition réelles, et, dans cet ensemble, des conditions d'acquisition virtuelles constituant le meilleur point de départ pour l'étape e1) décrite

ci-après.

[0139] L'étape d) permet également de détecter des images actualisées inadaptées pour la poursuite du procédé, par exemple une image actualisée qui ne ferait pas apparaître les marques de repérage. De préférence, le procédé est alors repris à l'étape c) avec une nouvelle image actualisée.

[0140] Bien entendu, les différentes méthodes pouvant être mises en œuvre à l'étape d) peuvent être combinées.

[0141] L'objectif de l'étape e) est de modifier le modèle de référence initial jusqu'à obtenir un modèle de référence final qui corresponde à l'image actualisée. Idéalement, le modèle de référence final est donc un modèle de référence tridimensionnel numérique à partir duquel l'image actualisée aurait pu être prise si ce modèle avait été réel.

[0142] On teste donc une succession de modèles de référence « à tester », le choix d'un modèle de référence à tester étant de préférence dépendant du niveau de correspondance des modèles de référence « à tester » précédemment testés avec l'image actualisée. Ce choix est de préférence effectué en suivant un procédé d'optimisation connu, en particulier choisi parmi les procédés d'optimisation métaheuristiques, de préférence évolutionnistes, en particulier dans les procédés de recuit simulé.

[0143] A l'étape e1), on détermine que le modèle de référence à tester est le modèle de référence initial lors de la première exécution de l'étape e2).

[0144] A l'étape e2), on commence par déterminer des conditions d'acquisition virtuelles à tester, c'est-à-dire une position et une orientation virtuelles susceptibles de correspondre à la position et l'orientation réelles de l'appareil d'acquisition lors de la capture de l'image actualisée, mais aussi, de préférence, une calibration virtuelle susceptible de correspondre à la calibration réelle de l'appareil d'acquisition lors de la capture de l'image actualisée.

[0145] Les premières conditions d'acquisition virtuelles à tester peuvent être aléatoires. De préférence, elles sont choisies dans l'ensemble limité déterminé à l'étape d), et de préférence encore, correspondent à des conditions d'acquisition virtuelles correspondant, d'après l'étape d), aux conditions d'acquisition virtuelles les plus prometteuses, c'est-à-dire constituant le meilleur tremplin pour approcher, le plus rapidement possible, les conditions d'acquisition réelles (étape e21)).

[0146] On configure ensuite virtuellement l'appareil d'acquisition d'images dans les conditions d'acquisition virtuelles à tester afin d'acquérir une image de référence du modèle de référence dans ces conditions d'acquisition virtuelles à tester. L'image de référence correspond donc à l'image qu'aurait prise l'appareil d'acquisition d'images s'il avait été placé, par rapport au modèle de référence à tester, et optionnellement calibré dans les conditions d'acquisition virtuelles à tester (étape e22)).

[0147] Si l'image actualisée a été prise au même mo-

ment que le modèle de référence a été réalisé, et si les conditions d'acquisition virtuelles sont exactement les conditions d'acquisition réelles, l'image de référence est donc exactement superposable à l'image actualisée. Les différences entre l'image actualisée et l'image de référence résultent d'erreurs dans l'évaluation des conditions d'acquisition virtuelles (si elles ne correspondent pas exactement aux conditions d'acquisition réelles) et de déplacements des dents entre l'étape b) et le modèle de référence à tester.

[0148] Pour comparer les images actualisée et de référence, on compare l'information discriminante sur ces deux images. Plus précisément, on réalise, à partir de l'image de référence, une carte de référence représentant l'information discriminante (étape e23)).

[0149] Les cartes actualisées et de référence, portant toutes les deux sur la même information discriminante, sont ensuite comparées et on évalue la différence entre ces deux cartes au moyen d'un score. Par exemple, si l'information discriminante est le contour des dents, on peut comparer la distance moyenne entre les points du contour des dents qui apparaît sur l'image de référence et les points du contour correspondant qui apparaît sur l'image actualisée, le score étant d'autant plus élevé que cette distance est faible.

[0150] Le score peut être par exemple un coefficient de corrélation.

[0151] De préférence, les conditions d'acquisition virtuelles comprennent les paramètres de calibration de l'appareil d'acquisition. Le score est d'autant plus élevé que les valeurs des paramètres de calibration testées sont proches des valeurs des paramètres de calibration de l'appareil d'acquisition utilisé à l'étape b). Par exemple, si l'ouverture de diaphragme testée est éloignée de celle de l'appareil d'acquisition utilisé à l'étape b), l'image de référence présente des régions floues et des régions nettes qui ne correspondent pas aux régions floues et aux régions nettes de l'image actualisée. Si l'information discriminante est le contour des dents, les cartes actualisée et de référence ne représenteront donc pas les mêmes contours et le score sera faible.

[0152] Le score est ensuite évalué au moyen d'une première fonction d'évaluation. La première fonction d'évaluation permet de décider si le cyclage sur l'étape e2) doit être poursuivi ou stoppé. La première fonction d'évaluation peut par exemple être égale à 0 si le cyclage doit être stoppé ou être égale à 1 si le cyclage doit se poursuivre.

[0153] La valeur de la première fonction d'évaluation peut dépendre du score atteint. Par exemple, il peut être décidé de poursuivre le cyclage sur l'étape e2) si le score ne dépasse pas un premier seuil. Par exemple, si une correspondance exacte entre les images actualisée et de référence conduit à un score de 100%, le premier seuil peut être, par exemple, de 95%. Bien entendu, plus le premier seuil sera élevé, meilleure sera la précision de l'évaluation des conditions d'acquisition virtuelles si le score parvient à dépasser ce premier seuil.

[0154] La valeur de la première fonction d'évaluation peut également dépendre de scores obtenus avec des conditions d'acquisition virtuelles testées précédemment.

[0155] La valeur de la première fonction d'évaluation peut également dépendre de paramètres aléatoires et/ou du nombre de cycles de l'étape e2) déjà effectués.

[0156] En particulier, il est possible qu'en dépit de la répétition des cycles, on ne parvienne pas à trouver des conditions d'acquisition virtuelles qui soient suffisamment proches des conditions d'acquisition réelles pour que le score atteigne ledit premier seuil. La première fonction d'évaluation peut alors conduire à la décision de quitter le cyclage bien que le meilleur score obtenu n'ait pas atteint ledit premier seuil. Cette décision peut résulter, par exemple, d'un nombre de cycles supérieur à un nombre maximal prédéterminé.

[0157] Un paramètre aléatoire dans la première fonction d'évaluation peut également autoriser la poursuite de tests de nouvelles conditions d'acquisition virtuelles, bien que le score apparaisse satisfaisant.

[0158] Les fonctions d'évaluation classiquement utilisées dans les procédés d'optimisation métaheuristiques, de préférence évolutionnistes, en particulier dans les procédés de recuit simulé, peuvent être utilisées pour la deuxième fonction d'évaluation.

[0159] Si la valeur de la première fonction d'évaluation indique qu'il est décidé de poursuivre le cyclage sur l'étape e2), on modifie les conditions d'acquisition virtuelles testées (étape e25)) et on recommence un cycle (étape e2)) consistant à réaliser une image de référence et une carte de référence, puis à comparer cette carte de référence avec la carte actualisée pour déterminer un score.

[0160] La modification des conditions d'acquisition virtuelles correspond à un déplacement virtuel dans l'espace et/ou à une modification de l'orientation et/ou, de préférence, à une modification de la calibration de l'appareil d'acquisition. Cette modification peut être aléatoire, à condition cependant que les nouvelles conditions d'acquisition virtuelles à tester appartiennent toujours à l'ensemble déterminé à l'étape d). La modification est de préférence guidée par des règles heuristiques, par exemple en favorisant les modifications qui, d'après une analyse des précédents scores obtenus, apparaissent les plus favorables pour augmenter le score.

[0161] Les figures 8a et 8b illustrent par exemple l'effet d'une modification des conditions d'acquisition virtuelles, en l'occurrence d'une modification de la distance focale, sur l'image de référence.

[0162] Le cyclage sur e2) est poursuivi jusqu'à ce que la valeur de la première fonction d'évaluation indique qu'il est décidé de sortir de ce cyclage et de poursuivre à l'étape e3), par exemple si le score atteint ou dépasse ledit premier seuil.

[0163] L'optimisation des conditions d'acquisition virtuelles à l'étape e2) est de préférence effectuée en utilisant une méthode métaheuristique, de préférence évolutionniste, de préférence un algorithme de recuit simulé.

Un tel algorithme est bien connu pour l'optimisation non linéaire.

[0164] Si on a quitté le cyclage sur l'étape e2), sans qu'un score satisfaisant ait pu être obtenu, par exemple sans que le score ait pu atteindre ledit premier seuil, le procédé peut être arrêté (situation d'échec) ou repris à l'étape c) avec une nouvelle information discriminante et/ou avec une nouvelle image actualisée. Le procédé peut être également poursuivi avec les conditions d'acquisition virtuelles correspondant au meilleur score atteint. Un avertissement peut être émis afin d'informer l'utilisateur de l'erreur sur le résultat.

[0165] Si on a quitté le cyclage sur l'étape e2) alors qu'un score satisfaisant a pu être obtenu, par exemple parce que le score a atteint, voire dépassé ledit premier seuil, les conditions d'acquisition virtuelles correspondent sensiblement aux conditions d'acquisition réelles. De préférence, les conditions d'acquisition virtuelles comprennent les paramètres de calibration de l'appareil d'acquisition. Le procédé conduit ainsi d'évaluer les valeurs de ces paramètres sans qu'il soit nécessaire de connaître la nature de l'appareil d'acquisition ou son réglage. L'étape b) peut donc être réalisée sans précaution particulière, par exemple par le patient lui-même au moyen de son téléphone portable.

[0166] En outre, la recherche de la calibration réelle est effectuée en comparant une image actualisée avec des vues d'un modèle de référence initial dans des conditions d'acquisition virtuelles que l'on teste. Avantageusement, elle ne nécessite pas que l'image actualisée fasse apparaître une jauge étalon de calibration, c'est-à-dire une jauge dont on connaît précisément les caractéristiques permettant déterminer la calibration de l'appareil d'acquisition.

[0167] WO2006/065955, incorporé par référence, décrit l'utilisation d'images pour fabriquer des modèles tridimensionnels dans le domaine des traitements orthodontiques. Cependant, ce document ne décrit pas de procédé permettant d'utiliser de simples photographies, présentant classiquement des images partielles des dents, des portions d'image floues et des reflets variables, prises généralement de manière non simultanée, sans avoir besoin de sélectionner des points remarquables sur les images, et avec un appareil d'acquisition dont la calibration n'est pas connue.

[0168] Dans un procédé de contrôle du positionnement de dents selon l'invention, les images actualisées ne servent pas à créer un modèle tridimensionnel actualisé totalement nouveau, mais seulement à modifier le modèle de référence initial, très précis. Un modèle tridimensionnel actualisé totalement nouveau créé à partir de simples photographies prises sans précautions particulières serait en particulier trop imprécis pour qu'une comparaison avec le modèle de référence initial puisse conduire à des conclusions sur le déplacement des dents.

[0169] Des différences peuvent subsister entre les conditions d'acquisition virtuelles déterminées et les con-

ditions d'acquisition réelles, en particulier si des dents se sont déplacées entre les étapes a) et b). La corrélation entre les images actualisée et de référence peut alors être encore améliorée en reprenant l'étape e2), le modèle de référence à tester étant alors modifié par déplacement d'un ou plusieurs modèles de dents (étape e3)).

[0170] La recherche du modèle de référence approximant au mieux le positionnement des dents lors de l'acquisition de l'image actualisée peut être effectuée comme la recherche des conditions d'acquisition virtuelles approximant au mieux les conditions d'acquisition réelles (étape e2)).

[0171] En particulier, le score est évalué au moyen d'une deuxième fonction d'évaluation. La deuxième fonction d'évaluation permet de décider si le cyclage sur les étapes e2) et e3) doit être poursuivi ou stoppé. La deuxième fonction d'évaluation peut par exemple être égale à 0 si le cyclage doit être stoppé ou être égale à 1 si le cyclage doit se poursuivre.

[0172] La valeur de la deuxième fonction d'évaluation dépend de préférence du meilleur score obtenu avec le modèle de référence à tester, c'est-à-dire des différences entre les cartes actualisée et de référence, dans les conditions d'acquisition virtuelles approximant au mieux les dites conditions d'acquisition réelles.

[0173] La valeur de la deuxième fonction d'évaluation peut également dépendre du meilleur score obtenu avec un ou plusieurs modèles de référence testés précédemment.

[0174] Par exemple, il peut être décidé de poursuivre le cyclage si le score ne dépasse pas un deuxième seuil minimal. La valeur de la deuxième fonction d'évaluation peut également dépendre de paramètres aléatoires et/ou du nombre de cycles des étapes e2) et e3) déjà effectués.

[0175] Les fonctions d'évaluation classiquement utilisées dans les procédés d'optimisation métaheuristiques, de préférence évolutionnistes, en particulier dans les procédés de recuit simulé, peuvent être utilisées pour la deuxième fonction d'évaluation.

[0176] Si la valeur de la deuxième fonction d'évaluation indique qu'il est décidé de poursuivre le cyclage sur les étapes e2) et e3), on modifie le modèle de référence à tester et on recommence un cycle (étapes e2) et e3)) avec le nouveau modèle de référence à tester.

[0177] La modification du modèle de référence à tester correspond à un déplacement d'un ou plusieurs modèles de dents. Cette modification peut être aléatoire. La modification est de préférence guidée par des règles heuristiques, par exemple en favorisant les modifications qui, d'après une analyse des précédents scores obtenus, apparaissent les plus favorables pour augmenter le score.

[0178] De préférence, on recherche le déplacement d'un modèle de dent qui a le plus fort impact sur le score, on modifie le modèle de référence à tester en déplaçant ce modèle de dent, puis on poursuit le cyclage sur les étapes e2) et e3) de manière à optimiser le score. On peut ensuite rechercher, parmi les autres modèles de dent, celui qui a le plus fort impact sur l'amélioration du

score, et à nouveau rechercher le déplacement optimal de cet autre modèle de dent sur le score. On peut poursuivre ainsi avec chaque modèle de dent.

[0179] Ensuite, il est possible de reprendre un cycle sur l'ensemble des modèles de dent et de poursuivre ainsi jusqu'à l'obtention d'un score supérieur à au deuxième seuil. Bien entendu, d'autres stratégies peuvent être utilisées pour déplacer un ou plusieurs modèles de dent dans le modèle de référence à tester et rechercher le score maximal.

[0180] Le cyclage sur les étapes e2) et e3) est poursuivi jusqu'à ce que la valeur de la deuxième fonction d'évaluation indique qu'il est décidé de sortir de ce cyclage et de poursuivre à l'étape f), par exemple si le score atteint ou dépasse ledit deuxième seuil.

[0181] La recherche d'un modèle de référence avec un cyclage sur les étapes e2) et e3) pour rechercher les positions des modèles de dent qui optimisent le score est de préférence effectuée en utilisant une méthode métaheuristique, de préférence évolutionniste, de préférence un algorithme de recuit simulé. Un tel algorithme est bien connu pour l'optimisation non linéaire.

[0182] Si on a quitté le cyclage sur les étapes e2) et e3) sans qu'un score satisfaisant ait pu être obtenu, par exemple sans que le score ait pu atteindre ledit deuxième seuil, le procédé peut être arrêté (situation d'échec) ou repris à l'étape c) avec une nouvelle information discriminante et/ou avec une nouvelle image actualisée.

[0183] S'il est décidé de relancer le procédé à l'étape c) à partir d'une autre information discriminante et/ou d'une autre image actualisée parce que le premier seuil ou le deuxième seuil n'a pas été atteint, le choix de la nouvelle information discriminante et/ou de la nouvelle image actualisée peut dépendre des scores obtenus précédemment, afin de favoriser l'information discriminante et/ou l'image actualisée qui, au regard de ces scores, apparaissent les plus prometteuses.

[0184] Une nouvelle information discriminante, obtenue par exemple par combinaison d'autres informations discriminantes déjà testées, peut être utilisée. Le cas échéant, il peut être également demandé d'acquérir une ou plusieurs nouvelles images actualisées. De préférence, on fournit des indications permettant de guider le positionnement de l'appareil d'acquisition pour la capture de cette nouvelle image actualisée. Par exemple, on peut indiquer au patient qu'il devrait prendre une photo de la partie droite de son arcade inférieure.

[0185] Si on a quitté le cyclage sur les étapes e2) et e3) sans qu'un score satisfaisant ait pu être obtenu, le procédé peut être également poursuivi avec le modèle de référence et les conditions d'acquisition virtuelles correspondant au meilleur score atteint. Un avertissement peut être émis afin d'informer l'utilisateur de l'erreur sur le résultat.

[0186] Si on a quitté le cyclage sur les étapes e2) et e3) alors qu'un score satisfaisant a pu être obtenu, par exemple parce que le score a atteint, voire dépassé ledit deuxième seuil, les conditions d'acquisition virtuelles

correspondent sensiblement aux conditions d'acquisition réelles et les modèles de dents dans le modèle de référence obtenu (dit « modèle de référence final ») sont sensiblement dans la position des dents du patient au moment de l'étape b).

[0187] Le cyclage sur les étapes e2) et e3) permet avantageusement d'améliorer l'évaluation des paramètres de calibration de l'appareil d'acquisition à l'étape b).

[0188] **A l'étape f)**, on compare le modèle de référence final, résultant de l'optimisation par déplacement des modèles de dents, avec le modèle de référence initial. Le modèle de référence final correspond sensiblement à l'image actualisée. La comparaison de l'étape f) permet donc d'observer les différences entre le positionnement des dents à l'étape a) (modèle de référence initial) et lors de l'acquisition de l'image actualisée (étape b)). Le procédé permet ainsi de déterminer précisément, pour chacune des dents, les mouvements entre ces deux étapes.

[0189] En répétant les étapes b) et suivantes, il est également possible d'évaluer la vitesse d'évolution de la position des dents, et ainsi de mesurer, par exemple, l'efficacité d'un traitement orthodontique. Un procédé selon l'invention peut par exemple être utilisé pour suivre à distance l'évolution d'un traitement orthodontique, et ainsi optimiser les rendez-vous des patients chez leurs orthodontistes.

[0190] Dans un mode de réalisation préféré, le procédé de contrôle selon l'invention est mis en œuvre plusieurs fois pour un même patient, de préférence successivement avec plusieurs informations discriminantes, de préférence plus de 2, plus de 3, plus de 5 informations discriminantes pour chaque image actualisée et/ou avec plusieurs images actualisées, de préférence plus de 2, plus de 3, plus de 5 images actualisées. L'évaluation du déplacement d'une dent peut être ainsi affinée en tenant compte des différents scores obtenus. La comparaison de ces scores permet également, le cas échéant, d'écarter les informations discriminantes et/ou les images actualisées insatisfaisantes.

[0191] En fonction du déplacement mesuré, une information pratique peut être générée. Si le déplacement est faible, cette information pratique peut être qu'aucune action n'est à engager. Au contraire, si une ou plusieurs dents se sont sensiblement déplacées, l'information peut être de planifier une visite chez le dentiste ou l'orthodontiste. De préférence, l'information pratique dépend du degré de déplacement des dents. Dans un mode de réalisation, un rendez-vous peut être automatiquement pris chez le dentiste ou l'orthodontiste, en fonction de l'amplitude et/ou de la nature des déplacements détectés.

[0192] Dans un mode de réalisation, l'information pratique est utilisée pour modifier l'intervalle de temps après lequel le patient devra être averti qu'une nouvelle image actualisée doit être créée.

[0193] Dans un mode de réalisation, l'appareil individuel permet d'afficher des images, voire une séquence d'images montrant le positionnement des dents à différentes dates. Ces images peuvent être présentées sous

la forme d'une animation.

[0194] De préférence, l'appareil d'acquisition d'images est un téléphone qui permet de transmettre les résultats obtenus par la mise en œuvre du procédé, de préférence de manière sécurisée. La communication peut être par exemple effectuée, au moins en partie, par la voie hertzienne, de préférence suivant au moins un protocole choisi parmi les protocoles edge, 3G, 4G, udmsa, hpdmsa, bluetooth, et wifi, ou par tout autre protocole, adapté aux équipements mobiles ou nomades, par synchronisation filaire avec l'ordinateur personnel, ou par transmission optique.

[0195] Comme cela apparaît clairement à présent, un procédé selon l'invention permet un contrôle précis et efficace du positionnement des dents du patient, sensiblement sans contrainte pour le patient. En particulier, de simples photographies prises sans précaution particulière, par exemple avec un téléphone mobile, suffit. Le patient peut donc facilement mettre en œuvre ce procédé.

[0196] Bien entendu, l'invention n'est pas limitée aux modes de réalisation décrits ci-dessus et représentés.

[0197] En particulier, le procédé est mis en œuvre successivement pour chacune des deux arcades ou simultanément pour les deux arcades.

[0198] En outre, plusieurs appareils différents peuvent être également mis en œuvre. Par exemple, l'acquisition peut être effectuée avec un téléphone mobile et les étapes suivantes par un ordinateur fixe.

[0199] Enfin, le patient n'est pas limité à un être humain. En particulier, un procédé selon l'invention peut être utilisé pour un autre animal.

Revendications

1. Procédé de contrôle du positionnement de dents d'un patient, ledit procédé comportant les étapes suivantes :

- a) moins de 3 mois après le début d'un traitement orthodontique, réalisation d'un modèle de référence tridimensionnel numérique des arcades du patient, ou « modèle de référence initial » et, pour chaque dent, définition, à partir du modèle de référence initial, d'un modèle de référence tridimensionnel numérique de ladite dent, ou « modèle de dent » ;
- b) acquisition d'au moins une image bidimensionnelle desdites arcades, dite « image actualisée », dans des conditions d'acquisition réelles ;
- c) analyse de chaque image actualisée et réalisation, pour chaque image actualisée, d'une carte actualisée relative à une information discriminante ;
- e) recherche, pour chaque image actualisée, d'un modèle de référence final correspondant

- au positionnement des dents lors de l'acquisition de l'image actualisée, la recherche étant de préférence effectuée au moyen d'une méthode métaheuristique, de préférence évolutionniste, de préférence par recuit simulé, 5
- f) pour chaque modèle de dent, comparaison des positionnements dudit modèle de dent dans le modèle de référence initial et dans le modèle de référence obtenu à l'issue des étapes précédentes, dit « modèle de référence final », afin de déterminer le déplacement des dents entre les étapes a) et b), 10
- l'étape e) comportant 15
- une première opération d'optimisation permettant de rechercher des conditions d'acquisition virtuelles correspondant au mieux aux conditions d'acquisition réelles dans un modèle de référence à tester déterminé à partir du modèle de référence initial, et 20
 - une deuxième opération d'optimisation permettant de rechercher, en testant une pluralité de dits modèles de référence à tester, le modèle de référence correspondant au mieux au positionnement des dents du patient lors de l'acquisition de l'image actualisée à l'étape b). 25
2. Procédé selon la revendication immédiatement précédente, dans lequel une première opération d'optimisation est effectuée pour chaque test d'un modèle de référence à tester lors de la deuxième opération d'optimisation. 30
3. Procédé selon l'une quelconque des deux revendications immédiatement précédentes, dans lequel la première opération d'optimisation et/ou la deuxième opération d'optimisation, de préférence la première opération d'optimisation et la deuxième opération d'optimisation mettent en œuvre une méthode métaheuristique, de préférence évolutionniste, de préférence un recuit simulé. 35 40
4. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel l'étape e) comporte les étapes suivantes : 45
- e1) définition du modèle de référence à tester comme étant le modèle de référence initial puis, 50
 - e2) suivant les étapes suivantes, test de conditions d'acquisition virtuelles avec le modèle de référence à tester afin d'approximer finement lesdites conditions d'acquisition réelles ;
 - e21) détermination de conditions d'acquisition virtuelles à tester; 55
 - e22) réalisation d'une image de référence bidimensionnelle du modèle de référence à

tester dans lesdites conditions d'acquisition virtuelles à tester ;

e23) traitement de l'image de référence pour réaliser au moins une carte de référence représentant ladite information discriminante ;

e24) comparaison des cartes actualisée et de référence de manière à déterminer une valeur pour une première fonction d'évaluation, ladite valeur pour la première fonction d'évaluation dépendant des différences entre lesdites cartes actualisée et de référence et correspondant à une décision de poursuivre ou de stopper la recherche de conditions d'acquisition virtuelles approximant lesdites conditions d'acquisition réelles avec plus d'exactitude que lesdites conditions d'acquisition virtuelles à tester déterminées à la dernière occurrence de l'étape e21) ;

e25) si ladite valeur pour la première fonction d'évaluation correspond à une décision de poursuivre ladite recherche, modification des conditions d'acquisition virtuelles à tester, puis reprise à l'étape e22) ;

e3) détermination d'une valeur pour une deuxième fonction d'évaluation, ladite valeur pour la deuxième fonction d'évaluation dépendant des différences entre les cartes actualisée et de référence dans les conditions d'acquisition virtuelles approximant au mieux lesdites conditions d'acquisition réelles et résultant de la dernière occurrence de l'étape e2), ladite valeur pour la deuxième fonction d'évaluation correspondant à une décision de poursuivre ou de stopper la recherche d'un modèle de référence approximant le positionnement des dents lors de l'acquisition de l'image actualisée avec plus d'exactitude que ledit modèle de référence à tester utilisé à la dernière occurrence de l'étape e2), et si ladite valeur pour la deuxième fonction d'évaluation correspond à une décision de poursuivre ladite recherche, modification du modèle de référence à tester par déplacement d'un ou plusieurs modèles de dents puis reprise à l'étape e2).

5. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel à l'étape a), on détermine un plan d'occlusion suivant les opérations suivantes :

I. détermination des points du modèle de référence initial qui appartiennent à une arcade et qui sont à une distance de l'autre arcade qui est inférieure à une distance prédéterminée, de préférence à une distance inférieure à 3 mm de

- l'autre arcade, dits « points de contact » ;
- II. optionnellement, filtrage d'une partie des points de contact, de préférence de manière que le nombre de points de contact appartenant à l'arcade supérieure soit identique au nombre de points de contact appartenant à l'arcade inférieure, de préférence en éliminant les points d'une arcade les plus éloignés de l'autre arcade ;
- III. régression linéaire, de préférence par la méthode des moindres carrés, sur l'ensemble des points de contact restant de manière à déterminer le plan d'occlusion.
6. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel, à l'étape a), on effectue les opérations suivantes :
- i. projection, dans un plan d'occlusion, des points de contact entre les dents des arcades supérieure et inférieure du patient, les points de contact et/ou le plan d'occlusion étant de préférence déterminés, suivant les étapes I à III ;
 - ii. détermination du barycentre des projections desdits points de contact et création d'un référentiel, dans le plan d'occlusion, centré sur ledit barycentre ;
 - iii. détermination, dans ledit référentiel, de la fonction parabolique, présentant le plus grand coefficient de corrélation avec l'ensemble des projections desdits points de contact ;
 - iv. rotation de l'ensemble des projections des points de contact autour du barycentre, et reprise de l'opération précédente *iii* jusqu'à ce que l'ensemble des projections des points de contact ait parcouru un secteur déterminé, de préférence supérieur à 90°, supérieur à 180°, voire d'environ 360° ;
 - v. identification du coefficient de corrélation le plus élevé pour l'ensemble des positions angulaires de l'ensemble des projections des points de contact autour du barycentre, et de l'axe de la fonction parabolique correspondante ;
 - vi. détermination d'un plan longitudinal médian du modèle de référence initial, ledit plan passant par ledit axe et étant perpendiculaire au plan d'occlusion.
7. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel, à l'étape a), on délimite au moins partiellement un modèle de dent en suivant les opérations suivantes :
- i'. détermination, au moins partielle, des bords gingivaux intérieur et extérieur de l'arcade de la dent concernée, de préférence par analyse des variations de l'orientation de la surface du modèle de référence initial ;
 - ii'. projection, dans le plan d'occlusion, des bords gingivaux intérieur et extérieur ;
 - iii'. identification des déformations des projections des bords gingivaux intérieur et extérieur correspondant aux régions interdentaires, les sommets de ces déformations étant appelés « point de rapprochement » ;
 - iv'. détermination du plus court chemin, à la surface du modèle de référence initial, entre deux points de rapprochement de bords gingivaux intérieur et extérieur, respectivement, d'une région interdentaire, de préférence par une méthode métaheuristique, de préférence évolutionniste, de préférence par recuit simulé, ledit plus court chemin délimitant au moins partiellement un modèle de dent.
8. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel une image actualisée est acquise moins de 7 jours après l'étape a), puis les étapes c) à f) sont mises en œuvre à partir de cette image actualisée.
9. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel à l'étape b), on utilise un appareil d'acquisition porté à la main et/ou la tête du patient n'est pas immobilisée.
10. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel à l'étape b), on utilise un appareil individuel choisi dans le groupe formé par un appareil photo connecté, une montre intelligente, une tablette numérique, un scanner 3D portable et un ordinateur couplé un système d'acquisition d'images, telle une webcam ou un appareil photo numérique, pour mettre en œuvre l'étape b) et, de préférence au moins une des étapes, de préférence toutes les étapes c) à f).
11. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel à l'étape b), on utilise un appareil d'acquisition d'images fournissant une image actualisée infrarouge.
12. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel à l'étape b), on utilise un écarteur comportant une, de préférence plus de deux marques de repérage, de préférence non alignées, et, de préférence, on utilise la représentation des marques de repérage sur l'image actualisée
- pour, à l'étape c), redécouper l'image et/ou,
 - le procédé comportant, après l'étape c) une étape d) de détermination, pour chaque image actualisée, de conditions d'acquisition virtuelles grossières approximant lesdites conditions d'acquisition réelles, pour, à l'étape d), évaluer grossièrement lesdites conditions d'acquisition

réelles.

13. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel à l'étape c), l'information discriminante est choisie dans le groupe constitué par une information de contour, une information de couleur, une information de densité, une information de distance, une information de brillance, une information de saturation, une information sur les reflets et des combinaisons de ces informations. 5 10
14. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel le procédé comporte, après l'étape c) une étape d) de détermination, pour chaque image actualisée, de conditions d'acquisition virtuelles grossières approximant lesdites conditions d'acquisition réelles, et, à l'étape d), on utilise des données fournies par l'appareil d'acquisition et, de préférence, concernant son orientation. 15 20
15. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel on met en œuvre une optimisation par une méthode métaheuristique, de préférence évolutionniste, de préférence par recuit simulé, pour : 25
 - à l'étape a), déterminer au moins partiellement un bord gingival délimitant un modèle de dent et/ou,
 - à l'étape e2), rechercher les conditions d'acquisition virtuelles correspondant aux conditions d'acquisition réelles et/ou,
 - à l'étape e), rechercher un modèle de référence correspondant à l'image actualisée. 30 35
16. Programme d'ordinateur, et en particulier un applicatif spécialisé pour téléphone mobile, comprenant des instructions de code de programme pour l'exécution des étapes c) à f) d'un procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, lorsque ledit programme est exécuté par un ordinateur. 40
17. Système comportant
 - un scanner tridimensionnel apte à mettre en œuvre l'étape a) d'un procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 15,
 - un appareil personnel, de préférence un téléphone mobile, chargé avec un programme selon la revendication immédiatement précédente. 45 50

Patentansprüche

1. Verfahren zur Kontrolle der Positionierung von Zähnen eines Patienten, wobei das Verfahren die folgenden Schritte aufweist: 55

a) weniger als 3 Monate nach dem Beginn einer kieferorthopädischen Behandlung, Herstellung eines digitalen dreidimensionalen Bezugsmodells oder "Ausgangsbezugsmodells" der Zahnreihen des Patienten, und ausgehend vom Ausgangsbezugsmodell für jeden Zahn die Definition eines digitalen dreidimensionalen Bezugsmodells des Zahns oder "Zahnmodells";
 b) Erfassung mindestens eines zweidimensionalen Bilds der Zahnreihen, genannt "aktualisiertes Bild", unter realen Erfassungsbedingungen;
 c) Analyse jedes aktualisierten Bilds und Herstellung, für jedes aktualisierte Bild, einer aktualisierten Karte bezüglich einer diskriminierenden Information;
 e) für jedes aktualisierte Bild die Suche eines Endbezugsmodells entsprechend der Positionierung der Zähne bei der Erfassung des aktualisierten Bilds, wobei die Suche vorzugsweise mittels einer metaheuristischen, vorzugsweise evolutionistischen, Methode, vorzugsweise durch simuliertes Ausglühen, ausgeführt wird,
 f) für jedes Zahnmodell, Vergleich der Positionierungen des Zahnmodells im Ausgangsbezugsmodell und im Bezugsmodell, das nach den vorhergehenden Schritten erhalten wurde, "Endbezugsmodell" genannt, um die Verschiebung der Zähne zwischen den Schritten a) und b) zu bestimmen,

wobei der Schritt e)

- einen ersten Optimierungsvorgang, der es ermöglicht, virtuelle Erfassungsbedingungen zu suchen, die am besten den realen Erfassungsbedingungen in einem zu testenden Bezugsmodell entsprechen, das ausgehend vom Ausgangsbezugsmodell bestimmt wird, und
 - einen zweiten Optimierungsvorgang, der es ermöglicht, indem eine Vielzahl der zu testenden Bezugsmodelle getestet werden, das Bezugsmodell zu suchen, das am besten der Positionierung der Zähne des Patienten bei der Erfassung des aktualisierten Bilds im Schritt b) entspricht, aufweist.

2. Verfahren nach dem direkt vorhergehenden Anspruch, wobei ein erster Optimierungsvorgang für jeden Test eines im zweiten Optimierungsvorgang zu testenden Bezugsmodells durchgeführt wird.
3. Verfahren nach einem der zwei direkt vorhergehenden Ansprüche, wobei der erste Optimierungsvorgang und/oder der zweite Optimierungsvorgang, vorzugsweise der erste Optimierungsvorgang und der zweite Optimierungsvorgang, eine metaheuristische, vorzugsweise evolutionistische, Methode

durchführen, vorzugsweise ein simuliertes Ausglühen.

4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei der Schritt e) die folgenden Schritte aufweist:

e1) Definition des zu testenden Bezugsmodells als Ausgangsbezugsmodell, dann,
e2) gemäß den folgenden Schritten, Test virtueller Erfassungsbedingungen mit dem zu testenden Bezugsmodell, um die realen Erfassungsbedingungen fein zu approximieren;

e21) Bestimmung zu testender virtueller Erfassungsbedingungen;

e22) Herstellung eines zweidimensionalen Bezugsbilds des zu testenden Bezugsmodells unter den zu testenden virtuellen Erfassungsbedingungen;

e23) Verarbeitung des Bezugsbilds, um mindestens eine Bezugskarte herzustellen, die die diskriminierende Information darstellt;

e24) Vergleich der aktualisierten Karte und der Bezugskarte, um einen Wert für eine erste Bewertungsfunktion zu bestimmen, wobei der Wert für die erste Bewertungsfunktion von den Differenzen zwischen der aktualisierten Karte und der Bezugskarte abhängt und einer Entscheidung entspricht, die Suche von virtuellen Erfassungsbedingungen fortzusetzen oder zu stoppen, die die realen Erfassungsbedingungen mit größerer Genauigkeit approximieren als die zu testenden virtuellen Erfassungsbedingungen, die beim letzten Auftreten des Schritts e21) bestimmt wurden;

e25) wenn der Wert für die erste Bewertungsfunktion einer Entscheidung der Fortsetzung der Suche entspricht, Änderung der zu testenden virtuellen Erfassungsbedingungen, dann Wiederbeginn im Schritt e22);

e3) Bestimmung eines Werts für eine zweite Bewertungsfunktion, wobei der Wert für die zweite Bewertungsfunktion von den Differenzen zwischen der aktualisierten Karte und der Bezugskarte unter den virtuellen Erfassungsbedingungen abhängt, die die realen Erfassungsbedingungen am besten approximieren und aus dem letzten Auftreten des Schritts e2) resultieren, wobei der Wert für die zweite Bewertungsfunktion einer Entscheidung entspricht, die Suche eines Bezugsmodells fortzusetzen oder zu stoppen, das die Positionierung der Zähne bei der Erfassung des aktualisierten Bilds mit größerer

Genauigkeit approximiert als das zu testende Bezugsmodell, das beim letzten Auftreten des Schritts e2) verwendet wurde, und wenn der Wert für die zweite Bewertungsfunktion einer Entscheidung entspricht, die Suche fortzusetzen, Änderung des zu testenden Bezugsmodells durch Verschiebung eines oder mehrerer Zahnmodelle, dann Wiederbeginn im Schritt e2).

5. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei im Schritt a) eine Okklusionsebene gemäß den folgenden Vorgängen bestimmt wird:

I. Bestimmung der Punkte des Ausgangsbezugsmodells, die zu einer Zahnreihe gehören und die einen Abstand zur anderen Zahnreihe haben, der geringer als ein vorbestimmter Abstand ist, vorzugsweise einen Abstand von weniger als 3 mm von der anderen Zahnreihe, "Kontaktpunkte" genannt;

II. optional, Filtern eines Teils der Kontaktpunkte, vorzugsweise so, dass die Anzahl von Kontaktpunkten, die zur oberen Zahnreihe gehören, gleich der Anzahl von Kontaktpunkten ist, die zur unteren Zahnreihe gehören, vorzugsweise durch Beseitigen der Punkte einer Zahnreihe, die am weitesten von der anderen Zahnreihe entfernt sind;

III. lineare Regression, vorzugsweise durch die Methode der kleinsten Quadrate, an der Gesamtheit der verbleibenden Kontaktpunkte, um die Okklusionsebene zu bestimmen.

6. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei im Schritt a) die folgenden Vorgänge ausgeführt werden:

i. Projektion, in einer Okklusionsebene, der Kontaktpunkte zwischen den Zähnen der oberen und unteren Zahnreihen des Patienten, wobei die Kontaktpunkte und/oder die Okklusionsebene vorzugsweise gemäß den Schritten I bis III bestimmt werden;

ii. Bestimmung des Schwerpunkts der Projektionen der Kontaktpunkte und Erzeugung eines Bezugssystems, in der Okklusionsebene, zentriert auf den Schwerpunkt;

iii. Bestimmung, in dem Bezugssystem, der Parabelfunktion, die den größten Korrelationskoeffizienten mit der Gesamtheit der Projektionen der Kontaktpunkte aufweist;

iv. Drehen der Gesamtheit der Projektionen der Kontaktpunkte um den Schwerpunkt, und Wiederbeginn des vorhergehenden Vorgangs iii, bis die Gesamtheit der Projektionen der Kontaktpunkte einen bestimmten Sektor durchlaufen hat, vorzugsweise größer als 90°, größer als

- 180°, sogar etwa 360°;
- v. Identifizierung des höchsten Korrelationskoeffizienten für die Gesamtheit der Winkelpositionen der Gesamtheit der Projektionen der Kontaktpunkte um den Schwerpunkt, und der Achse der entsprechenden Parabelfunktion;
- vi. Bestimmung einer mittleren Längsebene des Ausgangsbezugsmodells, wobei die Ebene durch die Achse verläuft und zur Okklusionsebene lotrecht ist.
7. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei im Schritt a) gemäß den folgenden Vorgängen mindestens teilweise ein Zahnmodell begrenzt wird:
- i'. Bestimmung, zumindest teilweise, der inneren und äußeren Zahnfleischränder der Zahnreihe des betreffenden Zahns, vorzugsweise durch Analyse der Änderungen der Ausrichtung der Oberfläche des Ausgangsbezugsmodells;
 - ii'. Projektion, in der Okklusionsebene, der inneren und äußeren Zahnfleischränder;
 - iii'. Identifizierung der Verformungen der Projektionen der inneren und äußeren Zahnfleischränder entsprechend den Zwischenzahnbereichen, wobei die Scheitel dieser Verformungen "Annäherungspunkt" genannt werden;
 - iv'. Bestimmung des kürzesten Wegs an der Oberfläche des Ausgangsbezugsmodells zwischen zwei Annäherungspunkten der inneren und äußeren Zahnfleischränder je eines Zwischenzahnbereichs, vorzugsweise durch eine metaheuristische, vorzugsweise evolutionistische, Methode, vorzugsweise durch simuliertes Ausglühen, wobei der kürzeste Weg ein Zahnmodell zumindest teilweise begrenzt.
8. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei ein aktualisiertes Bild weniger als 7 Tage nach dem Schritt a) erfasst wird, dann die Schritte c) bis f) ausgehend von diesem aktualisierten Bild durchgeführt werden.
9. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei im Schritt b) ein in der Hand getragenes Erfassungsgerät verwendet wird und/oder der Kopf des Patienten nicht fixiert wird.
10. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei im Schritt b) ein einzelnes Gerät verwendet wird, das aus der Gruppe ausgewählt wird, die von einem verbundenen Fotoapparat, einer intelligenten Uhr, einem digitalen Computer-Tablet, einem tragbaren 3D-Scanner und einem Computer gebildet wird, der mit einem Bilderfassungssystem wie einer Webcam oder einem digitalen Fotoapparat gekoppelt ist, um den Schritt b) und vorzugsweise
- mindestens einen der Schritte, vorzugsweise alle Schritte c) bis f), durchzuführen.
11. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei im Schritt b) ein Bilderfassungsgerät verwendet wird, das ein aktualisiertes Infrarotbild liefert.
12. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei im Schritt b) ein Spreizer verwendet wird, der ein, vorzugsweise mehr als zwei, Markierungszeichen aufweist, die vorzugsweise nicht fluchtend ausgerichtet sind, und vorzugsweise die Darstellung der Markierungszeichen auf dem aktualisierten Bild verwendet wird,
- um im Schritt c) das Bild erneut zuzuschneiden und/oder
 - wobei das Verfahren nach Schritt c) einen Schritt d) des Bestimmens, für jedes aktualisierte Bild, von groben virtuellen Erfassungsbedingungen, die die realen Erfassungsbedingungen approximieren, aufweist, um im Schritt d) die realen Erfassungsbedingungen grob zu bewerten.
13. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei im Schritt c) die diskriminierende Information aus der Gruppe ausgewählt wird, die aus einer Umrissinformation, einer Farbinformation, einer Dichteinformation, einer Abstandsinformation, einer Helligkeitsinformation, einer Sättigungsinformation, einer Information über die Reflexe und Kombinationen dieser Informationen besteht.
14. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei das Verfahren nach Schritt c) einen Schritt d) des Bestimmens, für jedes aktualisierten Bild, von groben virtuellen Erfassungsbedingungen, die die realen Erfassungsbedingungen approximieren, aufweist, und im Schritt d) Daten verwendet werden, die vom Erfassungsgerät geliefert werden und vorzugsweise seine Ausrichtung betreffen.
15. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei eine Optimierung durch eine metaheuristische, vorzugsweise evolutionistische, Methode durchgeführt wird, vorzugsweise durch simuliertes Ausglühen, um:
- im Schritt a) mindestens teilweise einen ein Zahnmodell begrenzenden Zahnfleischrand zu bestimmen, und/oder
 - im Schritt e2) die virtuellen Erfassungsbedingungen zu suchen, die den realen Erfassungsbedingungen entsprechen, und/oder
 - im Schritt e) ein dem aktualisiertes Bild entsprechendes Bezugsmodell zu suchen.

16. Computerprogramm, und insbesondere eine spezialisierte App für ein Mobiltelefon, das Programmcodeanweisungen für die Ausführung der Schritte c) bis f) eines Verfahrens nach einem der vorhergehenden Ansprüche enthält, wenn das Programm von einem Computer ausgeführt wird. 5

17. System, das aufweist:

einen dreidimensionalen Scanner, der den Schritt a) eines Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 15 durchführen kann, ein persönliches Gerät, vorzugsweise ein Mobiltelefon, das mit einem Programm nach dem direkt vorhergehenden Anspruch geladen ist. 15

Claims

1. A method for monitoring the positioning of the teeth of a patient, said method comprising the following steps: 20

a) less than 3 months after the start of an orthodontic treatment, production of a three-dimensional digital reference model of the arches of the patient, or "initial reference model" and, for each tooth, definition, from the initial reference model, of a three-dimensional digital reference model of said tooth, or "tooth model"; 25 30
b) acquisition of at least one two-dimensional image of said arches, called "updated image", in actual acquisition conditions;
c) analysis of each updated image and production, for each updated image, of an updated map relating to a discriminating piece of information; 35
e) searching, for each updated image, for a final reference model corresponding to the positioning of the teeth during the acquisition of the updated image, the search being preferably performed by means of a metaheuristic method, preferably evolutionist, preferably by simulated annealing, 40
f) for each tooth model, comparison of the positionings of said tooth model in the initial reference model and in the reference model obtained at the end of the preceding steps, called "final reference model", in order to determine the movement of the teeth between the steps a) and b), 45 50

the step e) comprising

- a first optimization operation making it possible to search for the virtual acquisition conditions best corresponding to the actual acquisition conditions in a reference model to be tested determined from the initial reference model, and 55

- a second optimization operation making it possible to search, by testing a plurality of said reference models to be tested, for the reference model best corresponding to the positioning of the teeth of the patient during the acquisition of the updated image in the step b).

2. The method as claimed in the immediately preceding claim, in which a first optimization operation is performed for each test of a reference model to be tested during the second optimization operation.

3. The method as claimed in either one of the two immediately preceding claims, in which the first optimization operation and/or the second optimization operation, preferably the first optimization operation and the second optimization operation, implement a metaheuristic method, preferably evolutionist, preferably a simulated annealing.

4. The method as claimed in any one of the preceding claims, in which the step e) comprises the following steps:

e1) definition of the reference model to be tested as being the initial reference model then, e2) as claimed in the following steps, testing of the virtual acquisition conditions with the reference model to be tested in order to finely approximate said actual acquisition conditions;

e21) determination of virtual acquisition conditions to be tested;

e22) production of a two-dimensional reference image of the reference model to be tested in said virtual acquisition conditions to be tested;

e23) processing of the reference image to produce at least one reference map representing said discriminating piece of information;

e24) comparison of the updated and reference maps so as to determine a value for a first assessment function, said value for the first assessment function depending on the differences between said updated and reference maps and corresponding to a decision to continue or to stop the search for virtual acquisition conditions approximating said actual acquisition conditions with greater accuracy than said virtual acquisition conditions to be tested determined on the last occurrence of the step e21);

e25) if said value for the first assessment function corresponds to a decision to continue said search, modification of the virtual acquisition conditions to be tested, then return to the step e22);

- e3) determination of a value for a second assessment function, said value for the second assessment function depending on the differences between the updated and reference maps in the virtual acquisition conditions best approximating said actual acquisition conditions and resulting from the last occurrence of the step e2), said value for the second assessment function corresponding to a decision to continue or to stop the search for a reference model approximating the positioning of the teeth during the acquisition of the updated image with greater accuracy than said reference model to be tested used on the last occurrence of the step e2), and if said value for the second assessment function corresponds to a decision to continue said search, modification of the reference model to be tested by movement of one or more tooth models, then return to the step e2).
- 5
- 10
- 15
- 20
- 25
- 30
- 35
- 40
- 45
- 50
- 55
5. The method as claimed in any one of the preceding claims, in which, in the step a), an occlusal plane is determined according to the following operations:
 - I. determination of the points of the initial reference model which belong to an arch and which are at a distance from the other arch which is less than a predetermined distance, preferably at a distance less than 3 mm from the other arch, called "points of contact";
 - II. optionally, filtering of some of the points of contact, preferably such that the number of points of contact belonging to the upper arch is identical to the number of points of contact belonging to the lower arch, preferably by eliminating the points of an arch that are furthest away from the other arch;
 - III. linear regression, preferably by the least squares method, over all the points of contact remaining so as to determine the occlusal plane.
 6. The method as claimed in any one of the preceding claims, in which, in the step a), the following operations are performed:
 - i. projection, in an occlusal plane, of the points of contact between the teeth of the upper and lower arches of the patient, the points of contact and/or the occlusal plane being preferably determined, according to steps I to III;
 - ii. determination of the barycenter of the projections of said points of contact and creation of a reference frame, in the occlusal plane, centered on said barycenter;
 - iii. determination, in said reference frame, of the parabolic function exhibiting the greatest coefficient of correlation with all the projections of said points of contact;
 - iv. rotation of all the projections of the points of contact about the barycenter, and repeating of the preceding operation *iii* until all the projections of the points of contact have covered a determined sector, preferably greater than 90°, greater than 180°, even approximately 360°;
 - v. identification of the highest coefficient of correlation for all the angular positions of all the projections of the points of contact about the barycenter, and of the axis of the corresponding parabolic function;
 - vi. determination of a median longitudinal plane of the initial reference model, said plane passing through said axis and being at right angles to the occlusal plane.
 7. The method as claimed in any one of the preceding claims, in which, in the step a), a tooth model is at least partially delimited according to the following operations:
 - i'. determination, at least partially, of interior and exterior gingival edges of the arch of the tooth concerned, preferably by analysis of the variations of the orientation of the surface of the initial reference model;
 - ii'. projection, in the occlusal plane, of the interior and exterior gingival edges;
 - iii'. identification of the deformations of the projections of the interior and exterior gingival edges corresponding to interdental regions, the tops of these deformations being called "point of convergence";
 - iv'. determination of the shortest path, on the surface of the initial reference model, between two points of convergence of interior and exterior gingival edges, respectively, of an interdental region, preferably by a metaheuristic method, preferably evolutionist, preferably by simulated annealing, said shortest path at least partially delimiting a tooth model.
 8. The method as claimed in any one of the preceding claims, in which an updated image is acquired less than seven days after the step a), then the steps c) to f) are implemented from this updated image.
 9. The method as claimed in any one of the preceding claims, in which, in the step b), a hand-held acquisition apparatus is used and/or the head of the patient is not immobilized.
 10. The method as claimed in any one of the preceding claims, in which, in the step b), an individual apparatus is used that is chosen from the group formed by a connected camera, a smart watch, a digital tablet, a portable 3D scanner and a computer coupled to an image acquisition system, such as a webcam

or a digital camera, to implement the step b) and, preferably at least one of the steps, preferably all of the steps c) to f).

11. The method as claimed in any one of the preceding claims, in which, in the step b), an image acquisition apparatus is used that provides an updated infrared image.

12. The method as claimed in any one of the preceding claims, in which, in the step b), a separator is used comprising one, preferably more than two register marks, preferably non-aligned, and, preferably, the representation of the register marks on the updated image is used to

- in the step c), recut the image and/or,
- the method comprising, after step c), a step d) of determination, for each updated image, of rough virtual acquisition conditions approximating said actual acquisition conditions, in the step d), roughly assess the actual acquisition conditions.

13. The method as claimed in any one of the preceding claims, in which, in the step c), the discriminating piece of information is chosen from the group consisting of a piece of outline information, a piece of color information, a piece of density information, a piece of distance information, a piece of brightness information, a piece of saturation information, an information on glare and combinations of the above pieces of information.

14. The method as claimed in any one of the preceding claims, in which the method comprises, after step c), a step d) of determination, for each updated image, of rough virtual acquisition conditions approximating said actual acquisition conditions, and in which, in the step d), data supplied by the acquisition apparatus and, preferably, concerning its orientation, are used.

15. The method as claimed in any one of the preceding claims, in which an optimization is implemented by a metaheuristic method, preferably evolutionist, preferably by simulated annealing, to:

- in the step a), at least partially determine a gingival edge delimiting a tooth model and/or,
- in the step e2), search for the virtual acquisition conditions corresponding to the actual acquisition conditions and/or,
- in the step e), search for a reference model corresponding to the updated image.

16. A computer program, and in particular an application specifically for mobile phones, comprising program

code instructions for the execution of the steps c) to f) of a method as claimed in any one of the preceding claims, when said program is run by a computer.

17. A system comprising a three-dimensional scanner capable of implementing the step a) of a method as claimed in any one of claims 1 to 15, a personal appliance, preferably a mobile phone, loaded with a program as claimed in the immediately preceding claim.

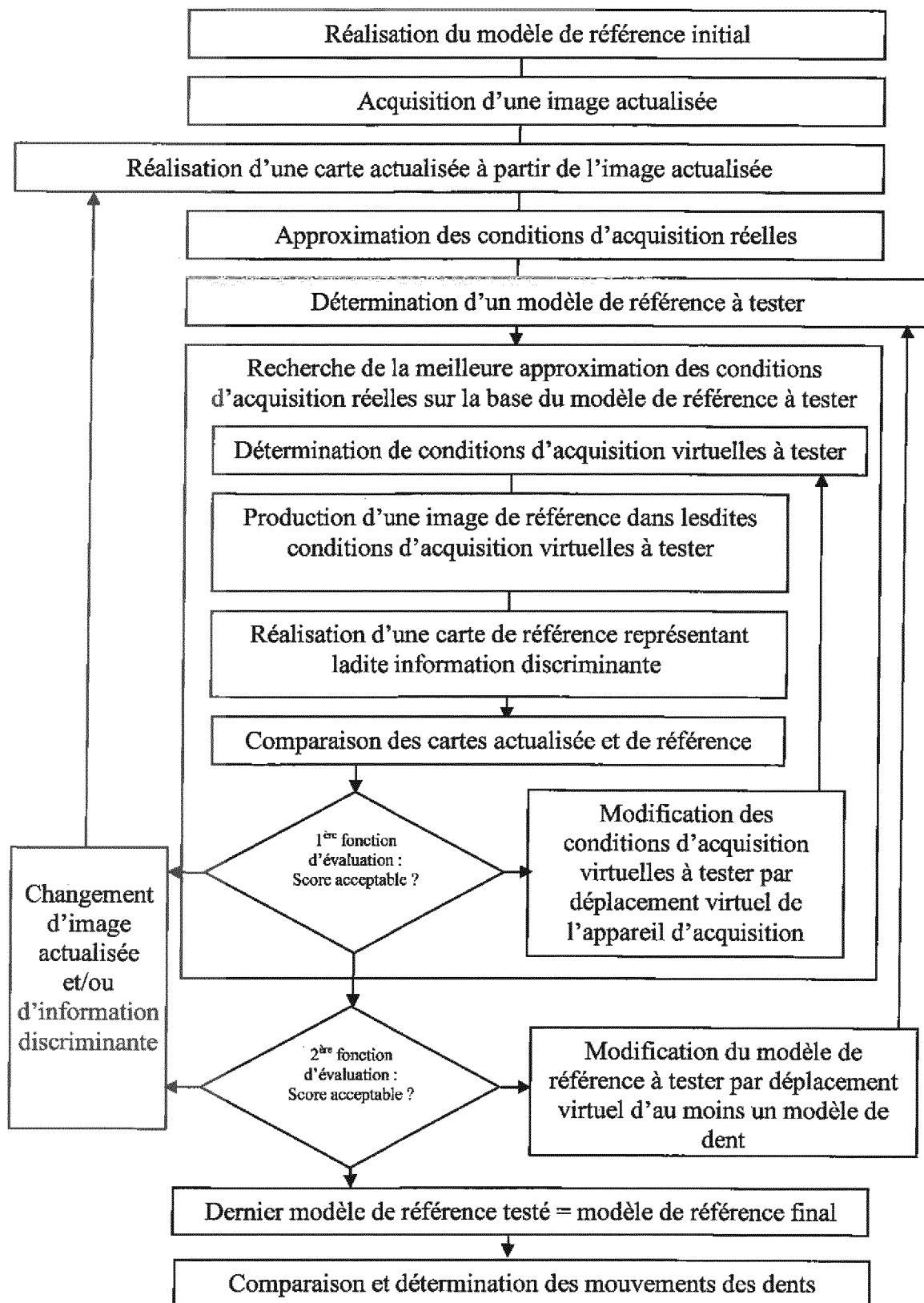


Fig. 1

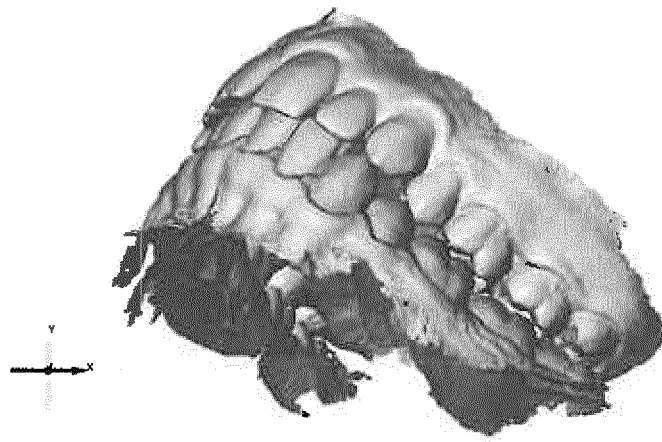


Fig.2

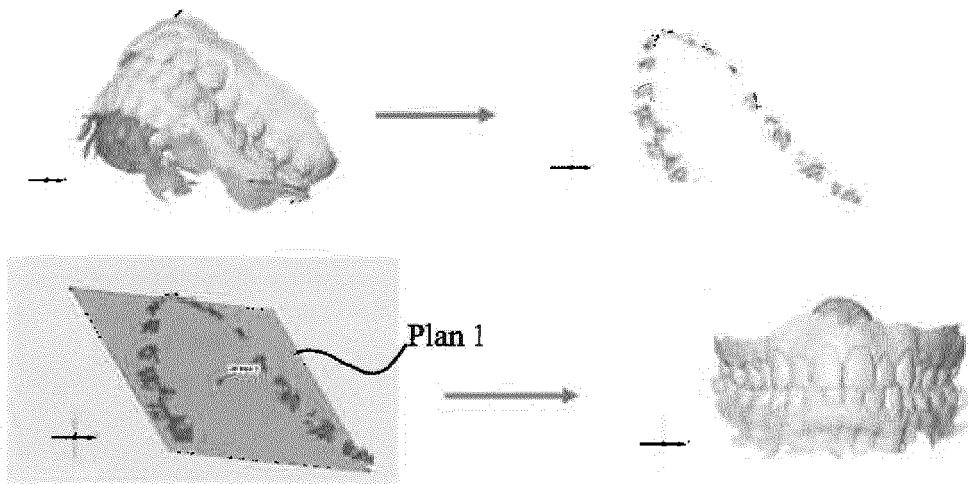


Fig.3



Fig. 4a



Fig. 4b



Fig. 4c

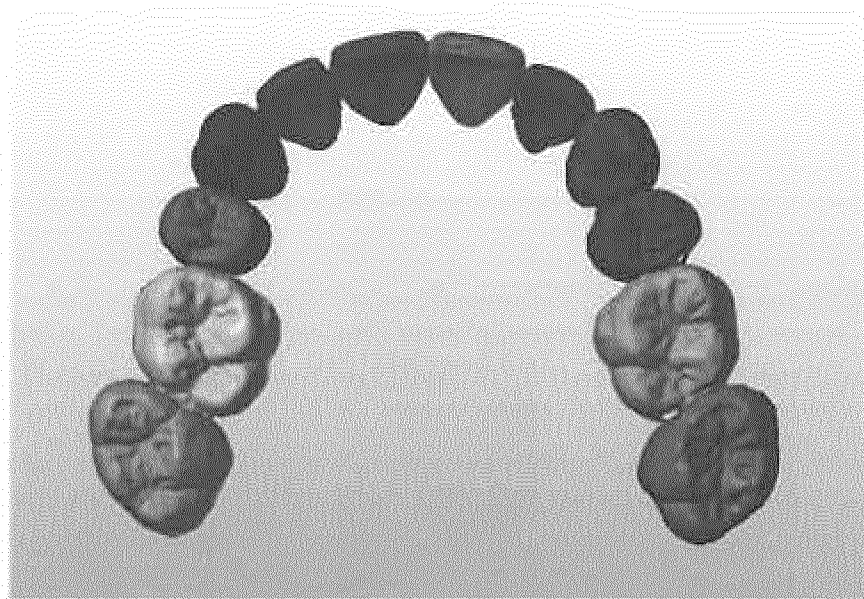


Fig. 4d

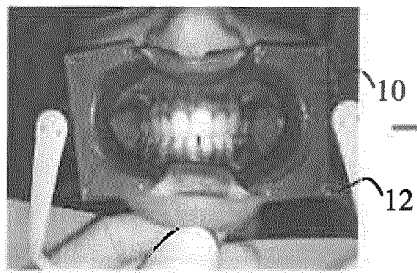


Fig. 5a

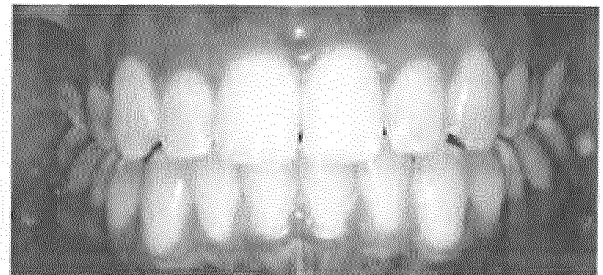


Fig. 5b

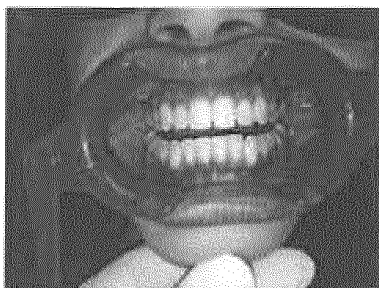


Fig. 5c

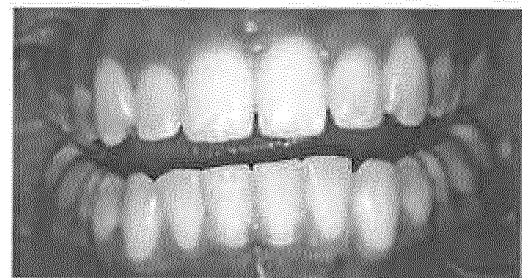


Fig. 5d

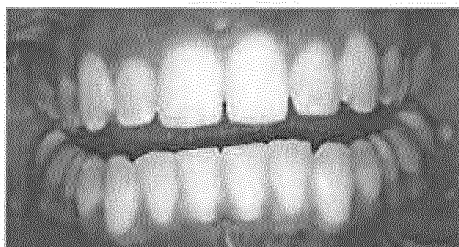


Fig. 6a

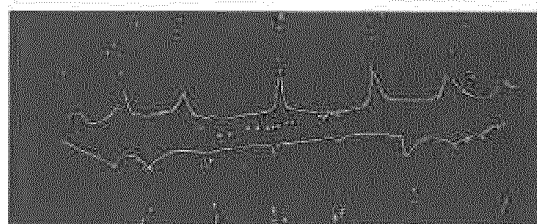


Fig. 6b

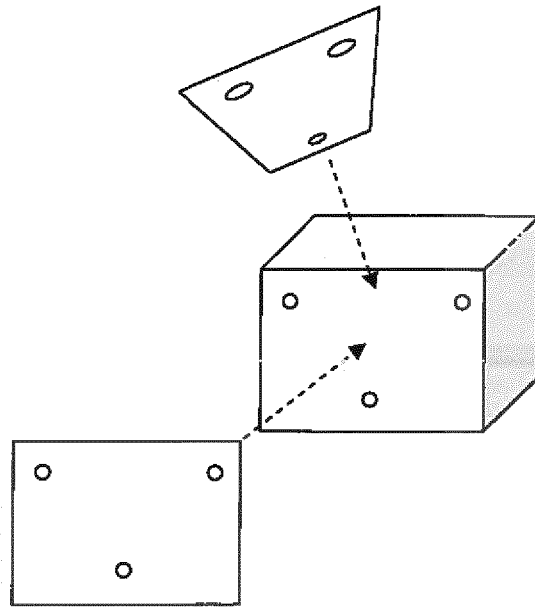


Fig. 7

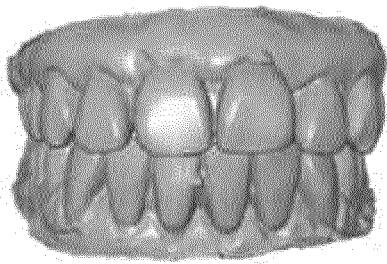


Fig. 8a

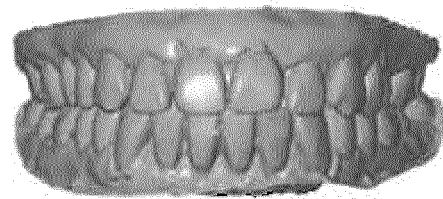


Fig. 8b

RÉFÉRENCES CITÉES DANS LA DESCRIPTION

Cette liste de références citées par le demandeur vise uniquement à aider le lecteur et ne fait pas partie du document de brevet européen. Même si le plus grand soin a été accordé à sa conception, des erreurs ou des omissions ne peuvent être exclues et l'OEB décline toute responsabilité à cet égard.

Documents brevets cités dans la description

- US 20090291417 A [0004]
- WO 2006065955 A2 [0005]
- WO 2006065955 A [0167]

专利名称(译)	牙科治疗的监测方法		
公开(公告)号	EP3212113B1	公开(公告)日	2019-12-11
申请号	EP2015786928	申请日	2015-10-27
[标]发明人	SALAH PHILIPPE AYACHE WILLIAM DEBRAUX LAURENT GHYSELINCK GUILLAUME PELLISSARD THOMAS		
发明人	SALAH, PHILIPPE AYACHE, WILLIAM DEBRAUX, LAURENT GHYSELINCK, GUILLAUME PELLISSARD, THOMAS		
IPC分类号	A61B1/00 A61C7/12 A61C13/00 A61C19/04 G06T17/00 G06T7/33 G06T7/73 G16H50/50 A61C7/00 A61C9/00 A61B1/32 A61C19/06 A61C19/10 A61B5/00 A61B5/06 G06K9/00		
CPC分类号	A61B1/00009 A61B1/32 A61B5/0088 A61B5/064 A61B5/742 A61B2576/02 A61C7/002 A61C9/0053 A61C2007/004 G06K9/00214 G06K2209/05 G06T7/33 G06T7/73 G06T17/00 G06T2207/30004 G06T2207/30036 G06T2210/41 G16H30/40 A61C7/12 A61C13/0004 A61C19/04 A61C19/066 A61C19/10 G16H50/50		
代理机构(译)	NONY		
优先权	2014060310 2014-10-27 FR		
其他公开文献	EP3212113A1		
外部链接	Espacenet		

摘要(译)

一种监测患者牙齿位置的方法，包括以下步骤：a) 正畸治疗开始后不到三个月的时间，生成患者牙弓的初始参考模型，并针对每颗牙齿从初始参考模型中定义，牙齿模型；b) 在实际采集条件下采集至少一张弓的更新图像；c) 分析每个更新的图像并产生相对于一条区分信息的更新的地图；d) 可选地确定近似于实际采集条件的粗略虚拟采集条件；e) 在更新图像的获取期间，在每个更新图像中搜索与牙齿位置相对应的最终参考模型，以及；f) 对于每个牙齿模型，比较牙齿模型在初始参考模型中以及在先前步骤结束时获得的参考模型中的位置，以便确定牙齿在步骤a) 和b) 之间的运动。

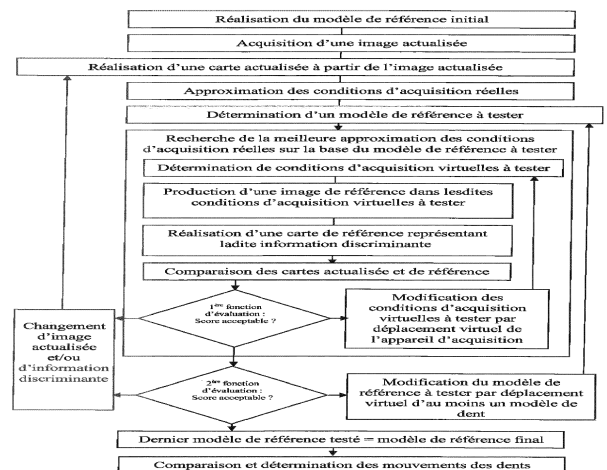


Fig. 1