



(19)
Bundesrepublik Deutschland
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 102 02 515 B4** 2004.08.12

(12)

Patentschrift

(21) Aktenzeichen: **102 02 515.0**
(22) Anmeldetag: **23.01.2002**
(43) Offenlegungstag: **07.08.2003**
(45) Veröffentlichungstag
der Patenterteilung: **12.08.2004**

(51) Int Cl.7: **A61C 13/34**
A61C 13/00, A61C 19/04, G03B 35/10

Innerhalb von 3 Monaten nach Veröffentlichung der Erteilung kann Einspruch erhoben werden.

(71) Patentinhaber:
Holberg, Christof, Dr., 82393 Iffeldorf, DE

(74) Vertreter:
Tiedtke, Bühling, Kinne & Partner GbR, 80336 München

(72) Erfinder:
gleich Patentinhaber

(56) Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht gezogene Druckschriften:
EP 07 41 994 A1
Medizinische Bildverarbeitung Prio.-Doz.
Dr.rer.nat. Heinz Handels B.G. Teubner Verlag
Stuttgart, Leipzig 2000;
Finite element analysis of mandibular model,
Journal of Oral Rehabilitation 16, 1989,
S. 615-624, J. Farah, R. Craig und K. Meroueh;
Three-dimensional finite element model of human
mandible incorporating six osseointegrated
implants for stress analysis of mandibular cantilever
protheses, International Journal of Oral
Maxillofac Implants 10, 1995, S. 51-57;
P. van Zyl, N. Grundling, C. Jooste und
E. Terblanche AutoCAD2000, April 1999, S.
716-739;

(54) Bezeichnung: **Verfahren, Vorrichtung und Computerprogrammprodukt zum Erstellen eines individuellen Modells eines Kieferknochens**

(57) Hauptanspruch: Verfahren zum Erstellen eines individuellen Modells eines Kieferknochenabschnitts, bei dem senkrecht zu der Längsachse des Kieferknochenabschnitts nur eine einzige Schichtaufnahme des Kieferknochenabschnitts angefertigt wird und bei dem folgende Bildverarbeitungsschritte durchgeführt werden:

- i) Bestimmen der Grenze des Kieferknochens zum umliegenden Gewebe auf Grundlage der Schichtaufnahme;
- ii) Umwandeln der Grenze des Kieferknochens zum umliegenden Gewebe in ein zweidimensionales Profil; und
- iii) Extrudieren des zweidimensionalen Profils in Richtung der Längsachse des Kieferknochenabschnitts zu einem dreidimensionalen Volumenkörpermodell des Kieferknochenabschnitts.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren, eine Vorrichtung und ein Computerprogrammprodukt zum Erstellen eines individuellen Modells eines Kieferknochenabschnitts.

[0002] Der Erfolg einer Implantatinsertion hängt entscheidend von der Kraft- und Spannungsverteilung der Kaukräfte ab, die über das Implantat in den Kieferknochen eingeleitet werden. Neben der Form und Größe des Implantats ist die individuelle Form und Zusammensetzung des Kieferknochens ein bedeutender Faktor.

Stand der Technik

[0003] Aus dem Stand der Technik sind zwar verschiedene Finite-Elemente-Modelle (FE-Modelle) von Kieferknochen bekannt, doch sind diese Modelle nur bedingt in der Praxis einsetzbar.

[0004] So beschreiben J. Farah, R. Craig und K. Meroueh in "Finite element analysis of a mandibular model", Journal of Oral Rehabilitation 16, 603–11 (1989) die Möglichkeit, direkt in einem FE-Programm ein zweidimensionales Modell eines Unterkiefers zu konstruieren (vgl. **Fig. 14**). Bei diesem Verfahren wird versucht, die komplexe Struktur des Kieferknochens so gut wie möglich zweidimensional nachzuahmen, ohne dass es zu einer morphologisch exakten Übertragung der Struktur in den dreidimensionalen Raum kommt. Durch die Vereinfachung der komplexen Geometrien ist dieses Verfahren allenfalls bei der Klärung prinzipieller Fragestellungen einsetzbar. Individuelle morphologische Besonderheiten bleiben jedoch unberücksichtigt. Außerdem ist die manuelle Konstruktion des Modells zeitaufwendig, ermüdend und fehlerträchtig.

[0005] Im Gegensatz dazu beschreiben P. van Zyl, N. Grundling, C. Jooste und E. Terblanche in "Three-dimensional finite element model of a human mandible incorporating six osseointegrated implants for stress analysis of mandibular cantilever prostheses", International Journal of Oral Maxillofac Implants 10, 51–7 (1995) ein dreidimensionales FE-Modell eines Unterkiefers, das nicht konstruktiv, sondern auf Grundlage schichtdiagnostischer Aufnahmen eines realen Unterkiefers erstellt wurde (vgl. **Fig. 15**). Bei diesem Verfahren wird die aus den Schichtaufnahmen gewonnene Punktwolke direkt in ein FE-Programm eingelesen, in dem die Punkte der Punktwolke als Knotenpunkte für das FE-Modell dienen. Die gängigen FE-Programme haben jedoch Schwierigkeiten bei der dreidimensionalen Vernetzung unterschiedlich dichter Punktwolken, so dass diese Vorgehensweise nur in bestimmten Fällen funktioniert und zumeist Einbußen bei der Wiedergabe der komplexen morphologischen Struktur in Kauf genommen werden müssen. Das FE-Programm muss daher in der Regel unter hohem Zeitaufwand speziell an den Anwendungsfall angepasst werden, was nur vom

Spezialisten durchgeführt werden kann und zu Inselösungen führt.

[0006] Außerdem wird auf das Fachbuch "Medizinische Bildverarbeitung", Dr. Heinz Handels, Verlag B. G. Teubner, Stuttgart, Leipzig, 2000 verwiesen. In diesem werden verschiedene dreidimensionale Visualisierungstechniken beschrieben, bei denen jeweils aus einer Mehrzahl von zweidimensionalen Aufnahmen paralleler Schichten eines menschlichen Körpers oder eines Körperteils ein dreidimensionales Modell erhalten wird. Des Weiteren wird darin die Einpassung von Implantaten und die Simulation von medizinischen Behandlungsschritten veranschaulicht. Es werden dabei 3D-Modelle gewonnen, indem die abzubildende Struktur bzw. die abzubildenden Strukturparameter der Schichtaufnahmen extrahiert werden und die entsprechend definierten Strukturvorgaben dann jeweils von einer Einzelschichtaufnahme zur nächsten oder zu den nächsten Einzelschichtaufnahmen zu räumlichen Struktur zu zusammengefasst werden.

Aufgabenstellung

[0007] Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, ein Verfahren, eine Vorrichtung und ein Computerprogrammprodukt zur Verfügung zu stellen, mit denen sich mit verhältnismäßig geringem Zeitaufwand und guter Genauigkeit ein individuelles Modell eines Kieferknochenabschnitts erstellen lässt..

[0008] Die obige Aufgabe wird durch die in den Ansprüchen 1, 8 und 11 angegebenen Merkmale gelöst. Vorteilhafte Ausgestaltungen der Erfindung sind in den entsprechenden Unteransprüchen angegeben.

[0009] Der in Anspruch 1 verwendete Begriff "Extrudieren" meint, dass das zweidimensionale Profil in eine Richtung (d.h. in die Richtung der Längsachse des Kieferknochenabschnitts) erweitert wird, um dem Modell Volumen zu geben. Mit anderen Worten wird das Profil entlang eines Pfades so weit in die Tiefe gezogen, bis eine vorgegebene Endposition erreicht ist. Der Extrusionspfad kann dabei entlang der von dem zweidimensionalen Profil vorgegebenen Flächennormalen verlaufen, er kann aber auch von der Normalen abweichen und stärker an den exakten Verlauf der Kieferlängsachse angepasst werden..

[0010] Das erfindungsgemäße Verfahren nutzt den Umstand aus, dass der Kieferknochenabschnitt seine an und für sich komplexe Struktur in Längsrichtung über eine kurze Strecke, z.B. über eine Zahnücke hinweg, kaum ändert.

[0011] Für die Entwicklung von Zahnimplantaten oder zur präoperativen Implantatsplanung genügt in der Regel ein Modell des Kieferknochenabschnitts, dessen Länge der einer (etwa 5–10 mm großen) Zahnücke entspricht. Es reicht daher vollkommen, wenn vom Kieferknochen nur eine einzige Schichtaufnahme angefertigt wird, um zu dem zweidimensionalen Profil zu gelangen, das dann in Richtung der Längsachse des Kieferknochenabschnitts über die

Länge der Zahnlücke zu dem dreidimensionalen Volumenkörpermodell extrudiert wird. Das vorgeschlagene Verfahren kommt dadurch mit verhältnismäßig wenig Bilddaten aus, weswegen sich die Bildverarbeitungsschritte i) bis iii) entsprechend schnell und zeitsparend durchführen lassen. Dennoch ist das Verfahren ausreichend genau, so dass die individuellen Besonderheiten des Kieferknochenabschnitts berücksichtigt bleiben.

[0012] Wenn für die jeweiligen Anwendungsbereiche des Modells die Zusammensetzung des Kieferknochens von besonderer Bedeutung ist, kann zusätzlich zu der Grenze des Kieferknochens zum umliegenden Gewebe auch die Grenze zwischen dem spongiösen und dem kompakten Bereich des Kieferknochens bestimmt werden, um ein zweiteiliges Volumenkörpermodell eines spongiösen und kompakten Kieferknochenabschnitts zu erstellen.

[0013] Das Volumenkörpermodell des Kieferknochenabschnitts kann entweder direkt oder nach Kombination mit dem Volumenkörpermodell eines Zahnimplantats und/oder Zahns zu einem dreidimensionalen Finite-Elemente-Modell (FE-Modell) umgewandelt werden. Die Kombination mit dem Volumenkörpermodell des Zahnimplantats und/oder Zahns entspricht dabei dem weiteren Bildverarbeitungsschritt iv) in Anspruch 4. Da sich die Geometrie eines Volumenkörpermodells relativ leicht zu einem hochauflösenden FE-Modell vernetzen lässt, wird auch für die Erstellung des FE-Modells nur wenig Zeit benötigt.

[0014] Wenn den einzelnen Teilen des FE-Modells (d.h. dem Kieferknochenabschnitt und dem Zahnimplantat oder Zahn) unterschiedliche Materialeigenschaften zugewiesen werden, lassen sich mit Hilfe des FE-Modells komplexe Berechnungen durchführen, etwa zur Spannungsverteilung im Kieferknochen, wenn auf das Zahnimplantat und/oder den Zahn eine Kraft einwirkt.

[0015] Die von der Vorrichtung mit Hilfe der CAD-Techniken (CAD: rechnerunterstütztes Zeichnen und Konstruieren) erstellten Volumenkörpermodelle können durch CAD/FEM-Kopplung in individuelle FE-Modelle umgewandelt werden.

[0016] Es liegt auf der Hand, dass die Erfindung anstatt durch die Vorrichtung auch durch das Computerprogrammprodukt realisiert werden kann, das die oben angesprochenen Datenverarbeitungsschritte anhand von Software-Routinen abarbeitet, wenn es auf einem Computer läuft. Das Computerprogrammprodukt kann auf einem Datenträger gespeichert sein oder direkt in den Arbeitsspeicher des Computers geladen werden.

[0017] Die Datenverarbeitungsschritte lassen sich weitgehend automatisieren, so dass die Erfindung auch Laien zugänglich gemacht werden kann, die keine spezielle Erfahrung auf dem Gebiet der CAD- oder FE-Programme haben. Durch die Automatisierung lassen sich außerdem Ungenauigkeiten und Fehler vermeiden, die bei der direkten Konstruktion eines Modells unvermeidlich wären. Dadurch, dass

die Erfindung Software-Routinen nutzen kann, die von gängigen CAD- und FE-Programmen her bekannt sind, können Insellösungen vermieden werden.

Ausführungsbeispiel

[0018] Nachfolgend werden anhand der Zeichnungen verschiedene Ausführungsbeispiele der Erfindung beschrieben. Es zeigen:

[0019] **Fig. 1** eine Röntgenschichtaufnahme senkrecht zur Längsachse eines Ober- und Unterkieferabschnitts;

[0020] **Fig. 2** einen vergrößerten Ausschnitt der Röntgenschichtaufnahme von **Fig. 1**, in der die Grenzen des spongiösen und kompakten Unterkieferknochens markiert sind;

[0021] **Fig. 3** ein zweiteiliges Profil des spongiösen und kompakten Knochens, das anhand von **Fig. 2** erstellt wurde;

[0022] **Fig. 4** ein dreidimensionales Volumenkörpermodell in Drahtdarstellung, das durch Extrusion des Profils in **Fig. 3** erzielt wurde;

[0023] **Fig. 5** das Volumenkörpermodell von **Fig. 4** in Flächendarstellung;

[0024] **Fig. 6** eine Fotografie eines Zylinderimplantats;

[0025] **Fig. 7** ein Halbprofil des in **Fig. 6** gezeigten Implantats;

[0026] **Fig. 8** ein dreidimensionales Volumenkörpermodell in Drahtdarstellung, das durch 360°-Rotation des in **Fig. 7** gezeigten Halbprofils um die Mittelachse erstellt wurde;

[0027] **Fig. 9** das Volumenkörpermodell von **Fig. 8** in Flächendarstellung;

[0028] **Fig. 10** ein dreiteiliges Volumenkörpermodell in Flächendarstellung, das durch Kombination der in **Fig. 5** und **Fig. 9** gezeigten Volumenkörpermodelle erzielt wurde;

[0029] **Fig. 11** ein dreidimensionales FE-Modell eines spongiösen und kompakten Unterkieferknochenabschnitts mit einem Implantat;

[0030] **Fig. 12** ein dreidimensionales Volumenkörpermodell eines Diskimplantats in Flächendarstellung;

[0031] **Fig. 13** ein dreidimensionales Volumenkörpermodell eines Blattimplantats in Flächendarstellung;

[0032] **Fig. 14** ein zweidimensionales FE-Modell einer Unterkieferhälfte gemäß Stand der Technik und

[0033] **Fig. 15** ein dreidimensionales FE-Modell eines Unterkiefers gemäß Stand der Technik.

[0034] Im Folgenden wird der Anwendungsfall beschrieben, bei dem von einem Patienten ein individuelles Modell eines Unterkieferabschnitts erstellt und dieses Unterkiefermodell mit dem Modell eines Zylinderimplantats kombiniert wird. Die Verfahrensschritte, wie das Unterkiefermodell und das Implantatmodell erstellt werden und wie die beiden Modelle miteinander kombiniert werden, werden einzeln behandelt.

Erstellen des Unterkiefermodells

[0035] Mit Hilfe einer schichtdiagnostischen Aufnahmeeinrichtung wird im Bereich der Zahnlücke, in der die Implantatinsertion geplant ist, senkrecht zur Längsachse des Unterkieferknochens eine Schichtaufnahme angefertigt. **Fig. 1** zeigt eine solche quer zur Unterkieferlängsachse verlaufende Schichtaufnahme, die mittels eines digitalen Volumentomographiegeräts (DVT) erstellt wurde.

[0036] Da die Schichtaufnahme bereits in digitaler Form vorliegt, kann sie ohne vorheriges Einscannen in ein CAD-Programm (z.B. "Mechanical Desktop[®]" von Autodesk Inc.) importiert werden, das auf einer Datenverarbeitungseinrichtung, etwa einer Workstation, läuft. Die Schichtaufnahme wird so skaliert, dass die Abmessungen im CAD-Programm mit den Abmessungen auf der Schichtaufnahme übereinstimmen.

[0037] Im CAD-Programm wird nun eine zweidimensionale Skizze des spongiösen und kompakten Unterkieferknochens erstellt, bei der die Schichtaufnahme im Hintergrund als Zeichenvorlage dient. Wie in **Fig. 2** gezeigt ist, werden dabei die Grenzen zwischen dem (hellgrauen) kompakten Bereich des Knochens und dem (dunkelgrauen) umliegenden Gewebe und zwischen dem (dunkelgrauen) spongiösen Bereich und dem (hellgrauen) kompakten Bereich des Knochens durch Linien, Polylinien oder Splines markiert.

[0038] Die Schichtaufnahme, die als Zeichenvorlage gedient hat, kann nun gelöscht werden. Die verbliebene zweidimensionale Skizze wird weiterverarbeitet und zu einem zweidimensionalen Profil konvertiert, wie es in **Fig. 3** gezeigt ist. Die Toleranzwerte des CAD-Programms (für die Winkel usw.) werden dabei vorzugsweise so eingestellt, dass eine geometrisch möglichst exakte 1:1-Konvertierung erreicht wird.

[0039] Das zweidimensionale Profil wird anschließend wie in den **Fig. 4** und **5** gezeigt durch Extrusion entlang der vom Profil vorgegebenen Flächennormale in ein dreidimensionales Volumenkörpermodell verwandelt. Die Länge der Extrusion richtet sich dabei nach der Breite der Zahnlücke des Patienten und beträgt im dargestellten Fall 10 mm.

[0040] Das auf diese Weise erzielte Volumenkörpermodell des Unterkieferknochens ist zweiteilig und besteht aus einem inneren Teil, der den spongiösen Bereich des Knochens definiert, und einem äußeren Teil, der den kompakten Bereich des Knochens definiert. Das Volumenkörpermodell ist eine gute Näherung der individuellen Form und Zusammensetzung des Kieferknochens im Bereich der Zahnlücke.

Erstellen des Implantatmodells

[0041] Es wird zunächst eine Fotografie des Zylinderimplantats angefertigt, mit dem die Implantatinsertion vorgenommen werden soll. **Fig. 6** zeigt das

Implantat in Längsansicht.

[0042] Die Fotografie wird in das angesprochene CAD-Programm eingescannt und auf die Größe der Unterkieferbilddaten skaliert. Im CAD-Programm wird nun mit der Fotografie im Hintergrund der Implantatumriss durch Linien, Polylinien oder Splines markiert. Aus Vereinfachungsgründen wird dabei nur der halbe Umriss genommen, so dass sich eine wie in **Fig. 7** gezeigte Halbprofilskizze ergibt.

[0043] Während die Fotografie gelöscht wird, wird die Halbprofilskizze des Implantats in ein Profil konvertiert, das dann durch 360°-Rotation um die Mittelachse zu einem dreidimensionalen Volumenkörpermodell umgewandelt wird. Dieses in den **Fig. 8** und **9** gezeigte Volumenkörpermodell ist im Gegensatz zu dem tatsächlichen Implantat rotationssymmetrisch. Die Vernachlässigung der Gewindesteigung ist jedoch für die späteren Berechnungen unerheblich.

Kombination des Unterkiefermodells mit dem Implantatmodell

[0044] Von dem in **Fig. 5** gezeigten Volumenkörpermodell des Unterkieferknochens wird durch Boolesche Differenz das in **Fig. 9** gezeigte Volumenkörpermodell des Zylinderimplantats abgezogen. Das Volumenkörpermodell des Zylinderimplantats wird dann in die entstehende Aussparung eingefügt. Auf diese Weise entsteht das in **Fig. 10** gezeigte dreiteilige Volumenkörpermodell, in dem der spongiöse und kompakte Knochen mit dem Implantat kombiniert ist.

[0045] Dieses dreiteilige Volumenkörpermodell wird nun über eine CAD/FEM-Schnittstelle (z.B. über den Befehl AMACISOUT im Programm "Mechanical Desktop[®]" von Autodesk Inc.) in ein FE-Programm (z.B. "Design Space[®]" von Ansys Inc.) eingelesen. In dem FE-Programm wird die komplexe Geometrie des dreiteiligen Volumenkörpermodells wie in **Fig. 10** gezeigt zu einem hochauflösenden, dreidimensionalen FE-Modell vernetzt.

[0046] Dem spongiösen und kompakten Bereich des Unterkieferknochens und dem Zahnimplantat werden beim Erstellen des FE-Modells unterschiedliche Materialeigenschaften (z.B. ein unterschiedliches Elastizitätsmodul) zugewiesen. Nach Festlegung der Lagerungen und Lasten lassen sich dann die Spannungsverteilung sowie Verformungen und Dehnungen im Kieferknochen simulieren, wenn über das Implantat eine Kraft (z.B. eine Kaukraft) in den Kieferknochen eingeleitet wird.

[0047] Die mit Hilfe dieses FE-Modells gewonnenen Ergebnisse lassen sich dazu nutzen, die Verträglichkeit des Implantats mit der individuellen Form und Zusammensetzung des Kieferknochens des Patienten zu überprüfen. Lassen sich zum Beispiel in bestimmten Bereichen des Kieferknochens besonders hohe Druckspannungen nachweisen, so besteht die Gefahr, dass der Knochen in diesen Bereichen nach der Implantatinsertion abgebaut wird, was die Langzeitprognose des Implantats erheblich mindern würde. In

diesem Fall wäre zu prüfen, ob nicht ein Implantat anderer Größe oder anderer Form eine bessere Prognose bietet. Die **Fig. 11** und **12** zeigen Beispiele für Volumenkörpermodelle eines Diskimplantats und eines Blattimplantats, die auf ähnliche Weise wie das in **Fig. 9** gezeigte Volumenkörpermodell des Zylinderimplantats anhand einer Fotografie nachgebildet wurden und die mit dem in **Fig. 5** gezeigten Volumenkörpermodell des Unterkieferknochens kombiniert werden können, um zu Vergleichsergebnissen zu gelangen.

[0048] Die mit Hilfe dieses FE-Modells gewonnenen Ergebnisse lassen sich auch dazu nutzen, Implantate anzufertigen, die speziell auf die individuelle Kieferanatomie angepasst sind und die Kaukraft optimal auf den Kiefer übertragen. Die Ergebnisse können also sowohl zur Optimierung konfektionierter Implantatformen als auch zu Herstellung individueller, nicht-konfektionierter Implantate genutzt werden.

Abwandlungen

[0049] Der obige Anwendungsfall lässt sich natürlich auch auf den Oberkiefer übertragen, da auch der Oberkiefer seine komplexe Struktur in Richtung seiner Längsachse über eine kurze Strecke kaum ändert.

[0050] Die Schichtaufnahme des Kieferknochens lässt sich auch mit anderen Aufnahmeeinrichtungen als einem digitalen Volumentomografiegerät (DVT) anfertigen. Als mögliche Aufnahmeeinrichtungen sind zum Beispiel konventionelle oder Spiral-Computertomografiegeräte (CT), Kernspintomografiegeräte (NMR) oder Sonografiegeräte zu nennen. Prinzipiell lassen sich auch Aufnahmen von histologischen Schnitten verwenden.

[0051] Wenn die Schichtaufnahme des Kieferknochens nicht in digitaler Form vorliegt, kann sie durch Einscannen usw. digitalisiert und zur Weiterverarbeitung in die Datenverarbeitungseinrichtung eingelesen werden. Die Knochengrenzen können aber auch durch Durchpausen usw. rein zeichnerisch ermittelt werden, wobei die auf diese Weise angefertigte Skizze dann digitalisiert und in die Datenverarbeitungseinrichtung eingelesen werden kann.

[0052] Anstatt die Knochengrenzen manuell nachzuzeichnen oder durchzupausen, können die Knochengrenzen in der Datenverarbeitungseinrichtung auch anhand der vorhandenen Helligkeitsunterschiede automatisch erkannt werden. Dadurch könnte die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse verbessert werden.

[0053] Im oben beschriebenen Anwendungsfall wurde für die Erstellung des Kieferknochenmodells nur eine einzige Schichtaufnahme verwendet, um den Arbeits- und Rechenaufwand zu minimieren. Von dem Kieferknochen können aber auch in einem bekannten Abstand zueinander mehrere Schichtaufnahmen angefertigt werden, aus denen mehrere Profile gewonnen werden. Die einzelnen Profile werden,

dann im CAD-Programm anatomisch korrekt mit dem bekannten Abstand ausgerichtet. Das dreidimensionale Volumenkörpermodell des Kieferknochens wird anschließend durch Expandieren bzw. Loften über die einzelnen Profile erstellt, wobei sich das entstehende Volumenkörpermodell über die einzelnen Profile aufspannt.

[0054] Im Übrigen wäre es auch möglich, wenn auch umständlicher, von dem Kieferknochen und dem Implantat zwei zunächst getrennte FE-Modelle zu erstellen, die dann im FE-Programm kombiniert werden. Das Modell des Kieferknochens kann auch mit anderen Modellen als dem Implantatmodell kombiniert werden, etwa mit dem Modell eines Zahns. Es wäre demnach denkbar, das Modell des mit dem Implantat kombinierten Kieferknochens über den Bereich der Zahnlücke hinaus auszudehnen und auch die an die Zahnlücke angrenzenden Zähne einzubeziehen.

[0055] Der gesamte Verfahrensablauf lässt sich vereinfachen, wenn eine speziell auf den Anwendungsfall zugeschnittene Vorrichtung verwendet wird, in der die Bildverarbeitungsschritte in der Datenverarbeitungseinrichtung auf die Schichtaufnahmen abgestimmt sind, die von der Aufnahmeeinrichtung erzeugt werden, und in der die Datenverarbeitungsschritte des CAD-Programms und FE-Programms zusammengelegt und weitestgehend automatisiert sind. In dieser Vorrichtung müssen weder die Aufnahmeeinrichtung und die Datenverarbeitungseinrichtung direkt miteinander verbunden sein, noch müssen die Datenverarbeitungsschritte in ein- und derselben Datenverarbeitungseinheit ausgeführt werden. Eine Alternative zu einem abgeschlossenen System wäre zum Beispiel, wenn der behandelnde Zahnarzt die Schichtaufnahme(n) seines Patienten oder das fertige Kiefermodell an den Implantathersteller schickt, der auf Grundlage dessen ein passendes Implantat auswählt oder maßgerecht anfertigt. Wenn die Implantatauswahl dagegen auf Seiten des behandelnden Zahnarztes liegt, könnte er auch von Herstellerseite mit den Konstruktionsdaten oder -modellen der am Markt verfügbaren Implantate versorgt werden.

[0056] Die angesprochenen FE-Modelle des mit dem Implantat und/oder dem Zahn kombinierten Kieferknochens können nicht nur zur Berechnung der Spannungsverteilung und von Dehnungen und Verformungen herangezogen werden, sondern auch zur Berechnung von Temperaturverteilungen, wenn es beispielsweise über das Implantat zu einer Temperaturdifferenz kommt, oder zur Frequenzanalyse, wenn beispielsweise am Implantat oder Zahn eine Zahnsteinbehandlung mit Ultraschall durchgeführt wird.

[0057] Das Verfahren, die Vorrichtung und das Computerprogrammprodukt zum Erstellen des Kiefermodells lassen sich nicht nur bei der Entwicklung von Zahnimplantaten oder bei der präoperativen Implantatsplanung nutzen. Die auf die beschriebene Weise erstellten Volumenkörpermodelle und FE-Mo-

delle des Kieferknochens lassen sich prinzipiell auch zur Veranschaulichung und Simulation kieferchirurgischer Eingriffe, zur Anpassung auf dem Kieferknochen aufliegender Zahnprothesen oder zur Planung von Korrekturen bei Zahnfehlstellung verwenden. Als besonderer Anwendungsfall wäre noch zu nennen, dass auch Modelle eines gebrochenen Kieferknochens erstellt werden können, bei dem das dreidimensionale Modell des Kieferknochens mit den dreidimensionalen Modellen von Metallplatten und -schrauben kombiniert wird, die zur Stabilisierung der Fraktur verwendet werden.

Patentansprüche

1. Verfahren zum Erstellen eines individuellen Modells eines Kieferknochenabschnitts, bei dem senkrecht zu der Längsachse des Kieferknochenabschnitts nur eine einzige Schichtaufnahme des Kieferknochenabschnitts angefertigt wird und bei dem folgende Bildverarbeitungsschritte durchgeführt werden:

- i) Bestimmen der Grenze des Kieferknochens zum umliegenden Gewebe auf Grundlage der Schichtaufnahme;
- ii) Umwandeln der Grenze des Kieferknochens zum umliegenden Gewebe in ein zweidimensionales Profil; und
- iii) Extrudieren des zweidimensionalen Profils in Richtung der Längsachse des Kieferknochenabschnitts zu einem dreidimensionalen Volumenkörpermodell des Kieferknochenabschnitts.

2. Verfahren nach Anspruch 1, bei dem zusätzlich zu der Grenze des Kieferknochens zum umliegenden Gewebe auch die Grenze zwischen dem spongiösen und dem kompakten Bereich des Kieferknochens bestimmt wird, um ein zweiteiliges Volumenkörpermodell eines spongiösen und kompakten Kieferknochenabschnitts zu erstellen.

3. Verfahren nach Anspruch 2, bei dem aus dem zweiteiligen Volumenkörpermodell des spongiösen und kompakten Kieferknochenabschnitts ein dreidimensionales Finite-Elemente-Modell erstellt wird.

4. Verfahren nach Anspruch 2, das außerdem folgenden Bildverarbeitungsschritt umfasst:

- iv) Kombinieren des Volumenkörpermodell des Kieferknochenabschnitts mit dem Volumenkörpermodell eines Zahnimplantats und/oder Zahns, um ein Volumenkörpermodell des mit dem Zahnimplantat und/oder Zahn kombinierten Kieferknochenabschnitts zu erzielen.

5. Verfahren nach Anspruch 4, bei dem aus dem Volumenkörpermodell des mit dem Zahnimplantat und/oder Zahn kombinierten Kieferknochenabschnitts ein dreidimensionales Finite-Elemente-Modell erstellt wird.

6. Verfahren nach Anspruch 5, bei dem dem Kieferknochenabschnitt und dem Zahnimplantat und/oder Zahn beim Erstellen des Finite-Elemente-Modells unterschiedliche Materialeigenschaften zugewiesen werden.

7. Verfahren nach Anspruch 6, bei dem mit Hilfe des Finite-Elemente-Modells die Spannungsverteilung im Kieferknochenabschnitt berechnet wird, wenn auf das Zahnimplantat und/oder den Zahn eine Kraft einwirkt.

8. Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens gemäß einem der Ansprüche 1 bis 7, mit: einer Aufnahmeeinrichtung, mit der sich senkrecht zur Längsachse eines Kieferknochenabschnitts eine Schichtaufnahme des Kieferknochenabschnitts anfertigen lässt; und einer Datenverarbeitungseinrichtung, die folgende Datenverarbeitungsschritte abarbeitet: Einlesen und gegebenenfalls Digitalisieren einer von der Aufnahmeeinrichtung aufgenommenen Schichtaufnahme des Kieferknochenabschnitts; und Durchführen der Bildverarbeitungsschritte des Verfahrens mit Hilfe von CAD-Techniken, um das dreidimensionale Volumenkörpermodell des Kieferknochenabschnitts oder des mit dem Zahnimplantat und/oder Zahn kombinierten Kieferknochenabschnitts zu erstellen.

9. Vorrichtung nach Anspruch 8, bei der die Datenverarbeitungseinrichtung aus dem Volumenkörpermodell des Kieferknochenabschnitts oder des mit dem Zahnimplantat und/oder Zahn kombinierten Kieferknochenabschnitts durch CAD/FEM-Kopplung ein dreidimensionales Finite-Elemente-Modell erstellt.

10. Vorrichtung nach Anspruch 8 oder 9, bei der die Datenverarbeitungsschritte in der Datenverarbeitungseinrichtung anhand von Softwareroutinen abgearbeitet werden.

11. Computerprogrammprodukt, das das Verfahren gemäß einem der Ansprüche 1 bis 7 ausführt, indem es anhand von Softwareroutinen folgende Datenverarbeitungsschritte abarbeitet, wenn es auf einem Computer läuft:

- Einlesen und gegebenenfalls Digitalisieren einer Schichtaufnahme eines Kieferknochenabschnitts, die senkrecht zu der Längsachse des Kieferknochenabschnitts angefertigt wurde; und
- Durchführen der Bildverarbeitungsschritte des Verfahrens mit Hilfe von CAD-Techniken, um das dreidimensionale Volumenkörpermodell des Kieferknochenabschnitts oder des mit dem Zahnimplantat und/oder Zahn kombinierten Kieferknochenabschnitts zu erstellen.

12. Computerprogrammprodukt nach Anspruch 11, das aus dem Volumenkörpermodell des Kiefer-

knochenabschnitts oder des mit dem Zahnimplantat und/oder Zahn kombinierten Kieferknochenabschnitts durch CAD/FEM-Kopplung ein dreidimensionales Finite-Elemente-Modell erstellt.

Es folgen 8 Blatt Zeichnungen

Fig. 1

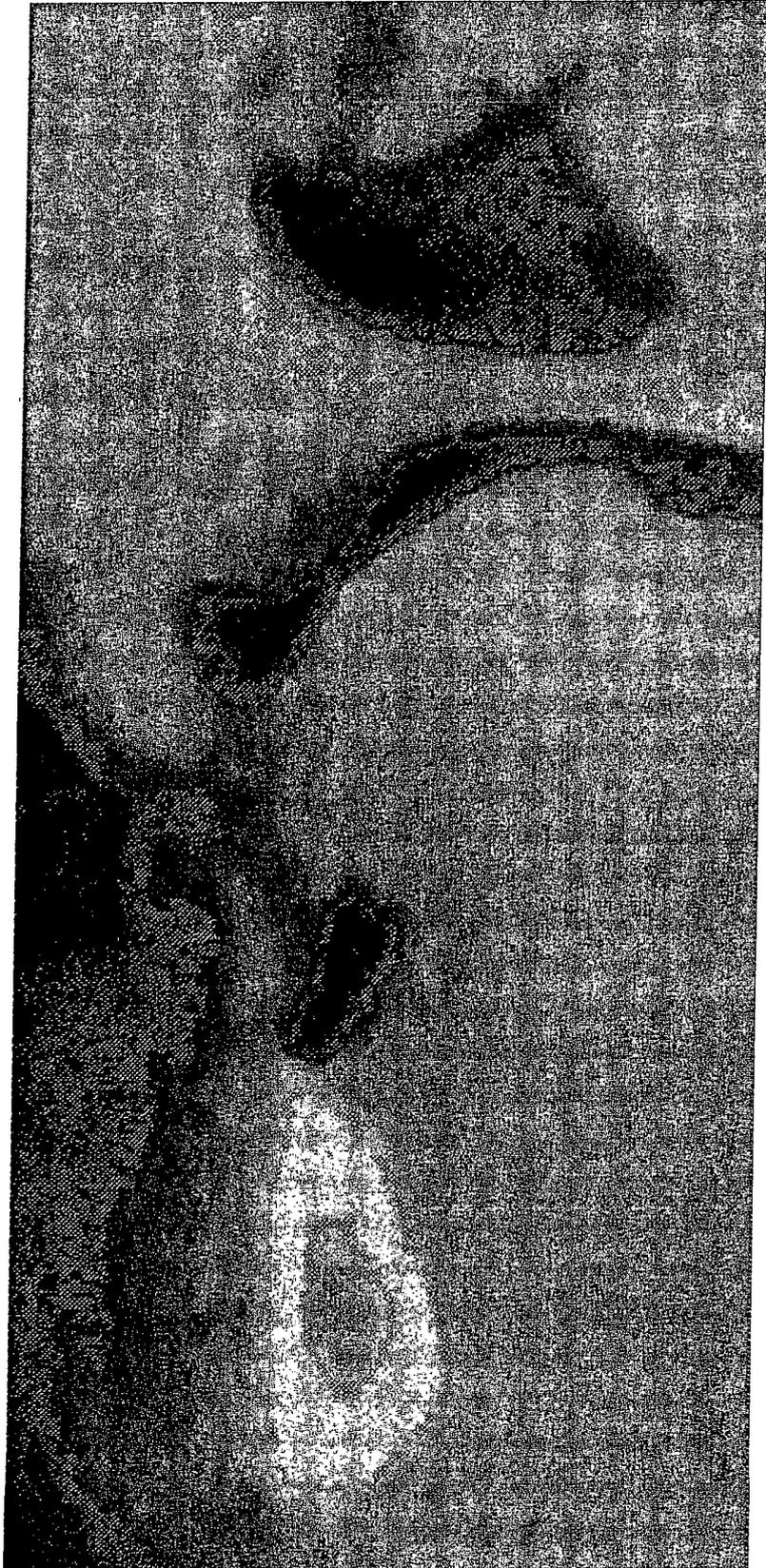


Fig. 3

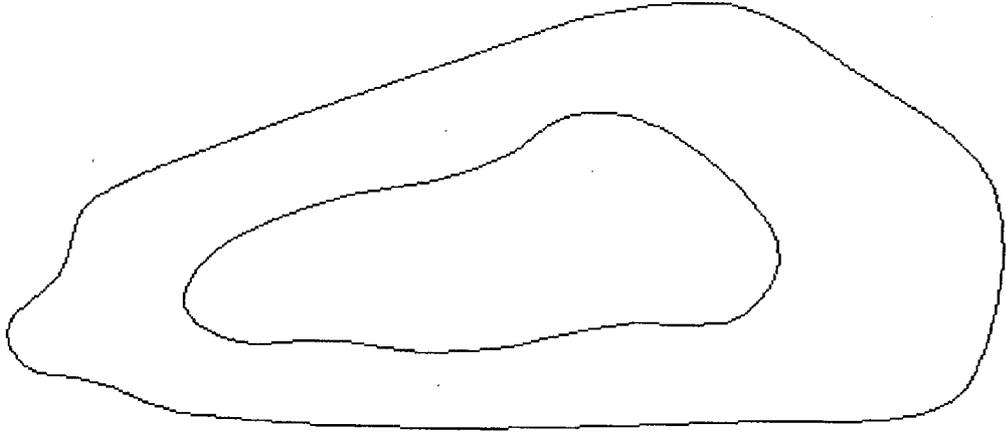


Fig. 2

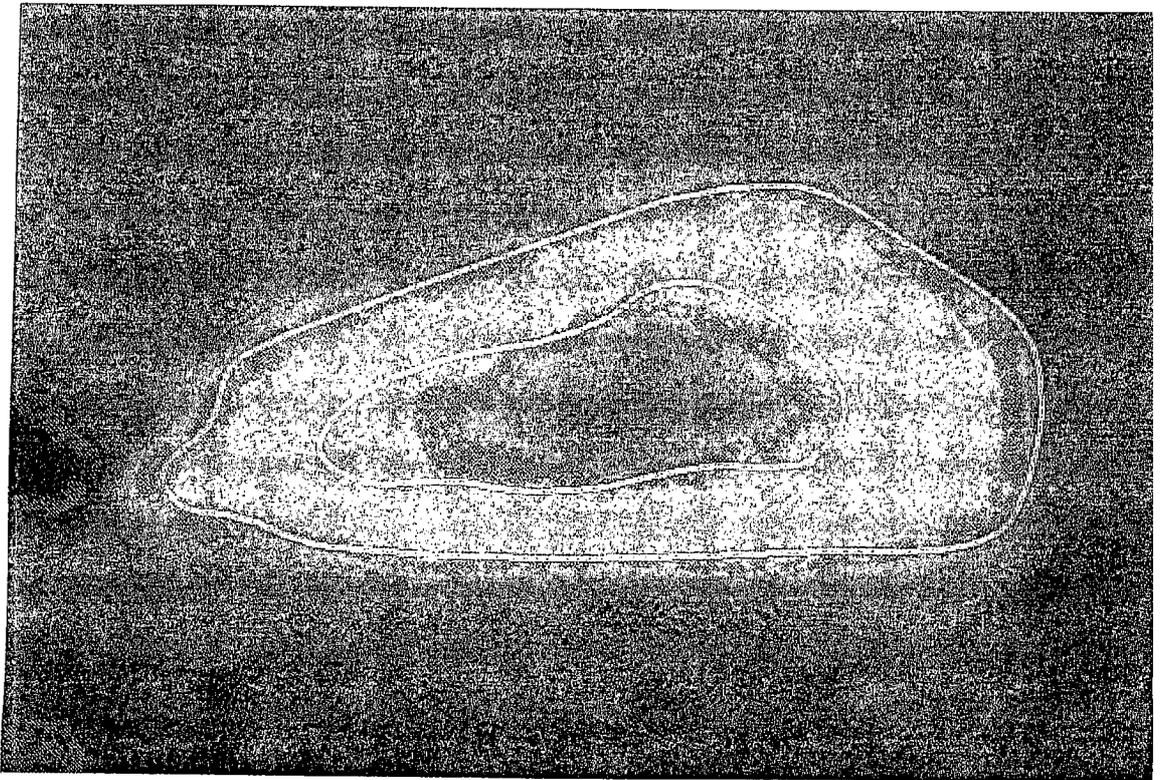


Fig. 5

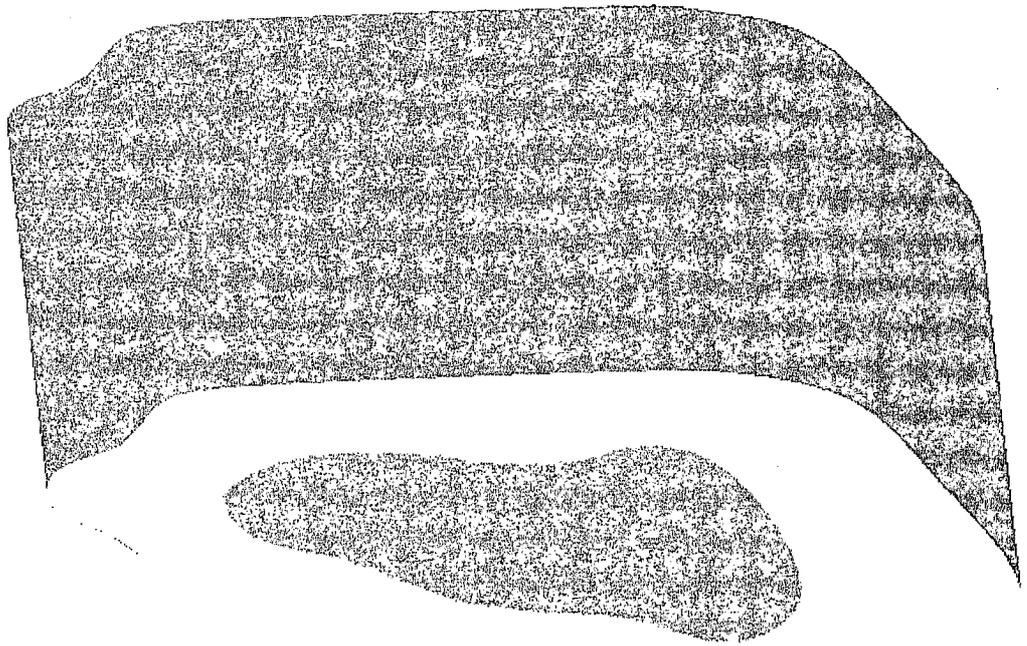


Fig. 4

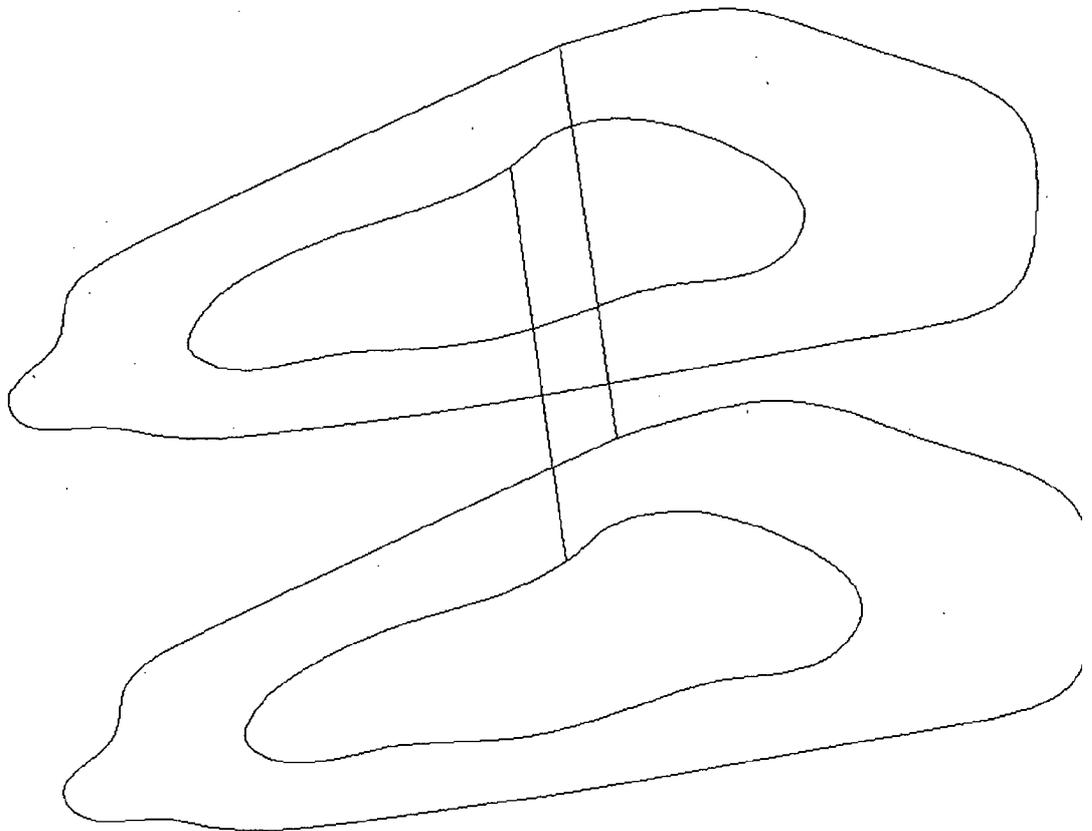


Fig. 7

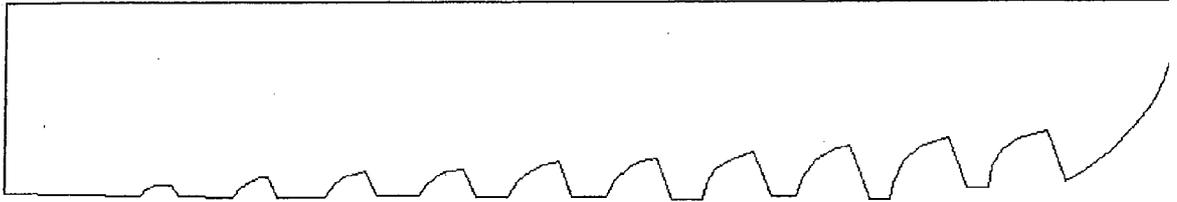


Fig. 6

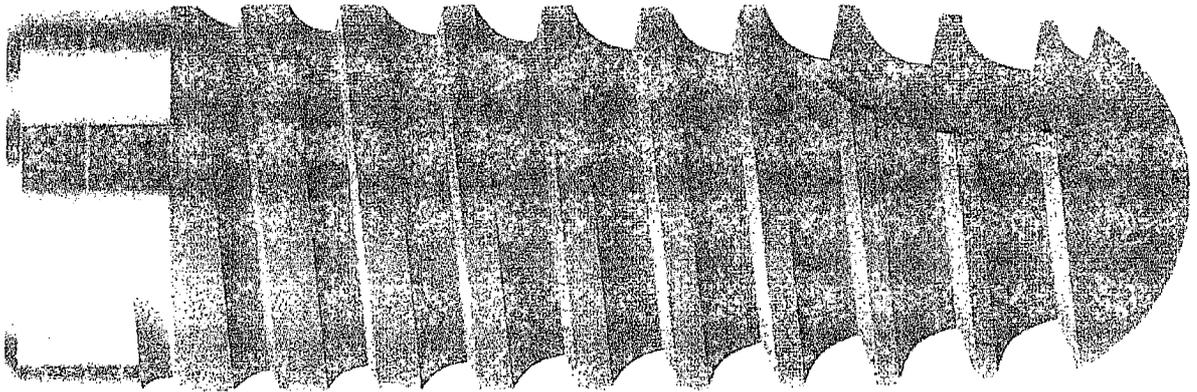


Fig. 9

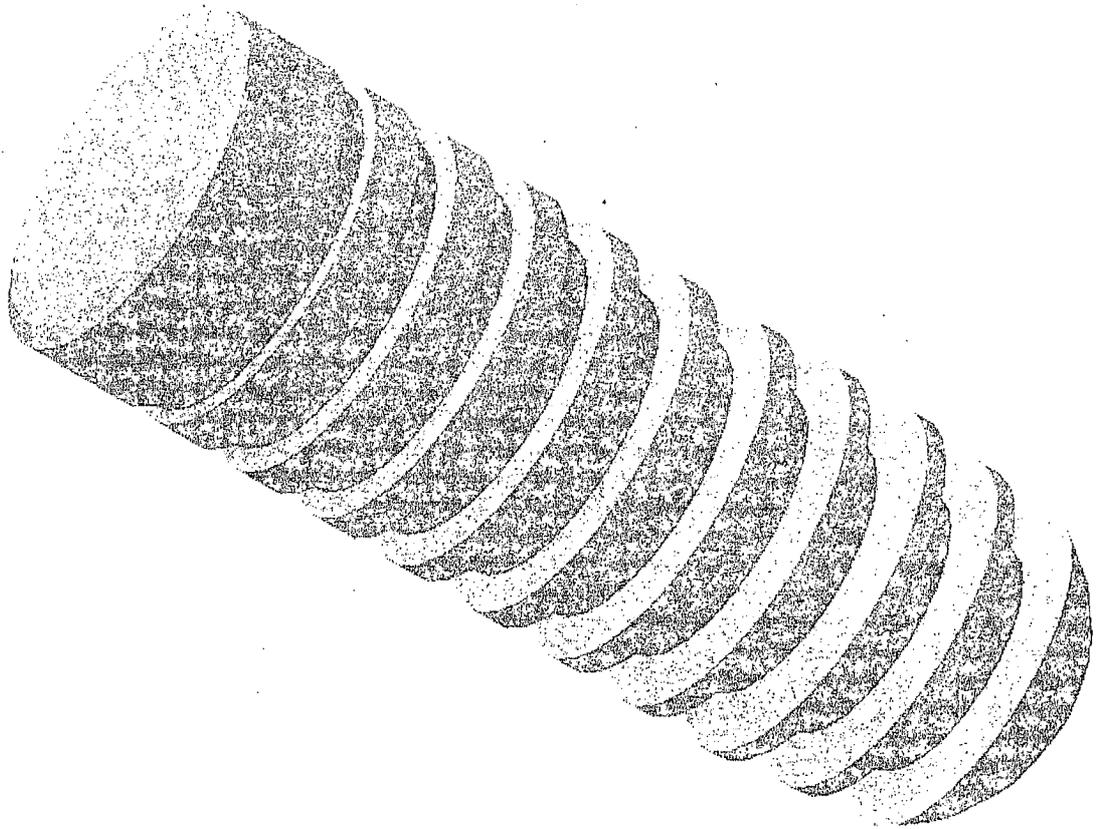


Fig. 8

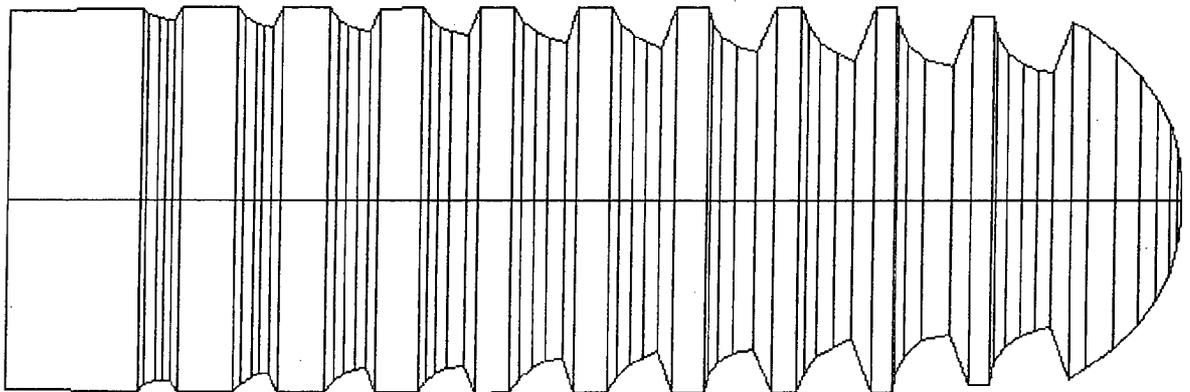


Fig. 11

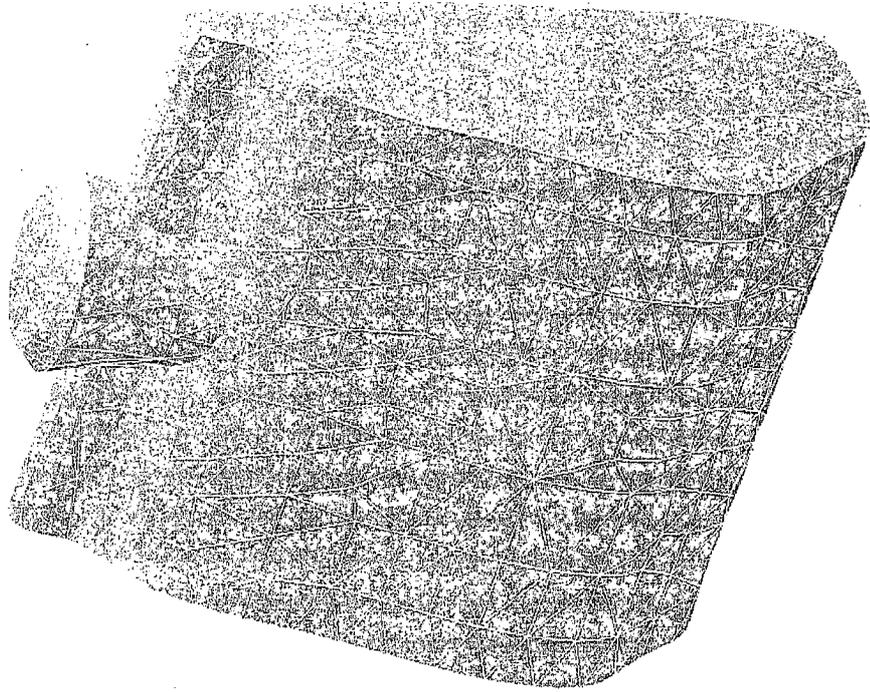


Fig. 10

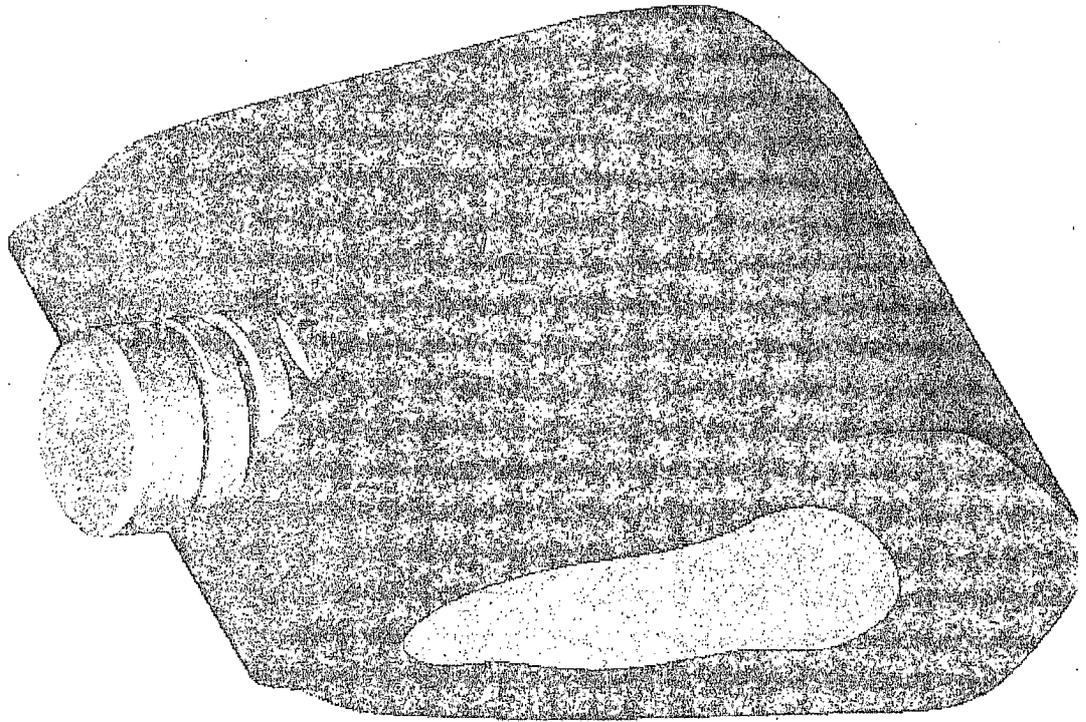


Fig. 13

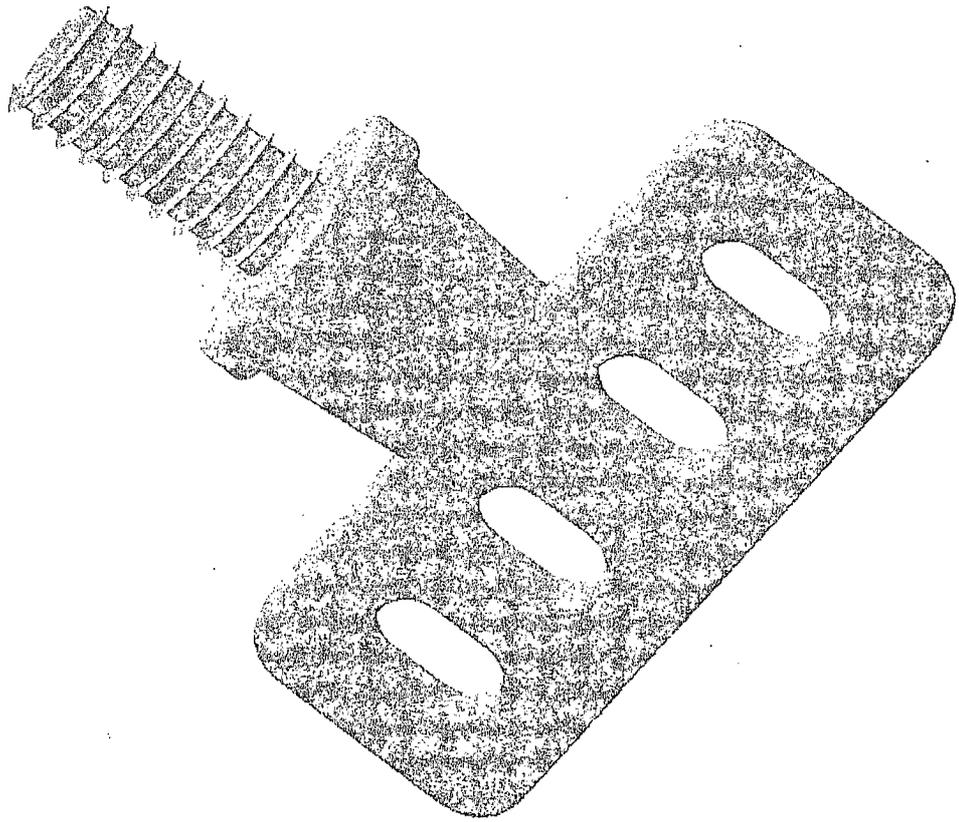


Fig. 12

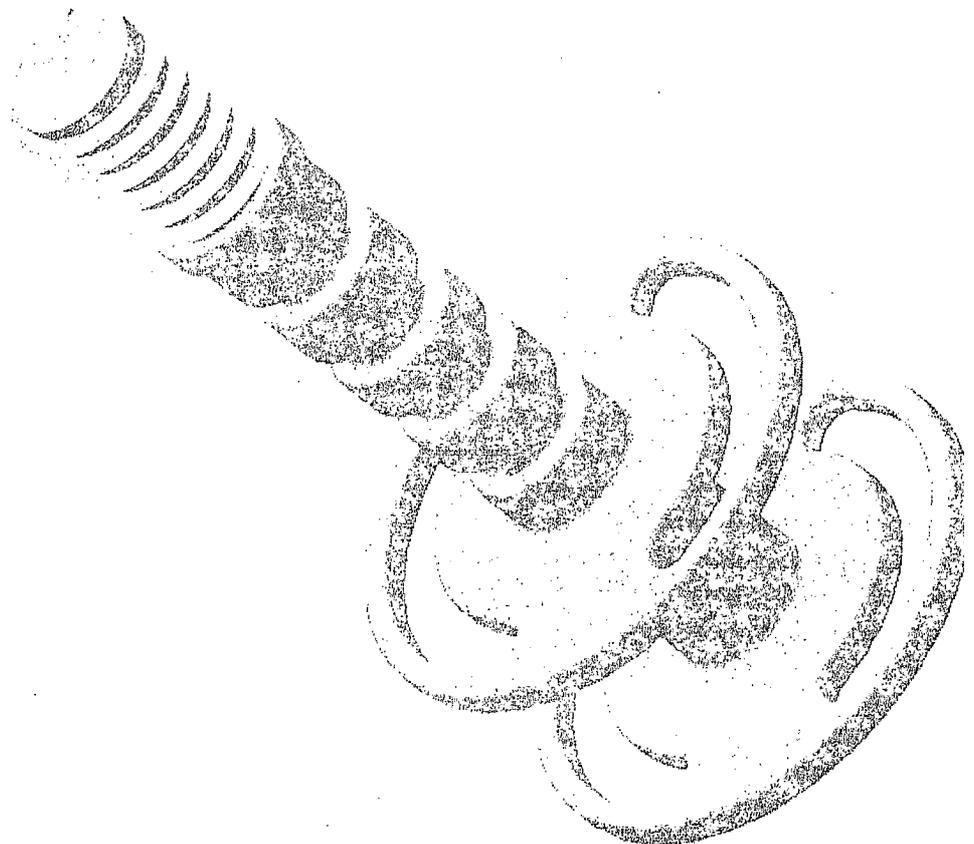


Fig. 14

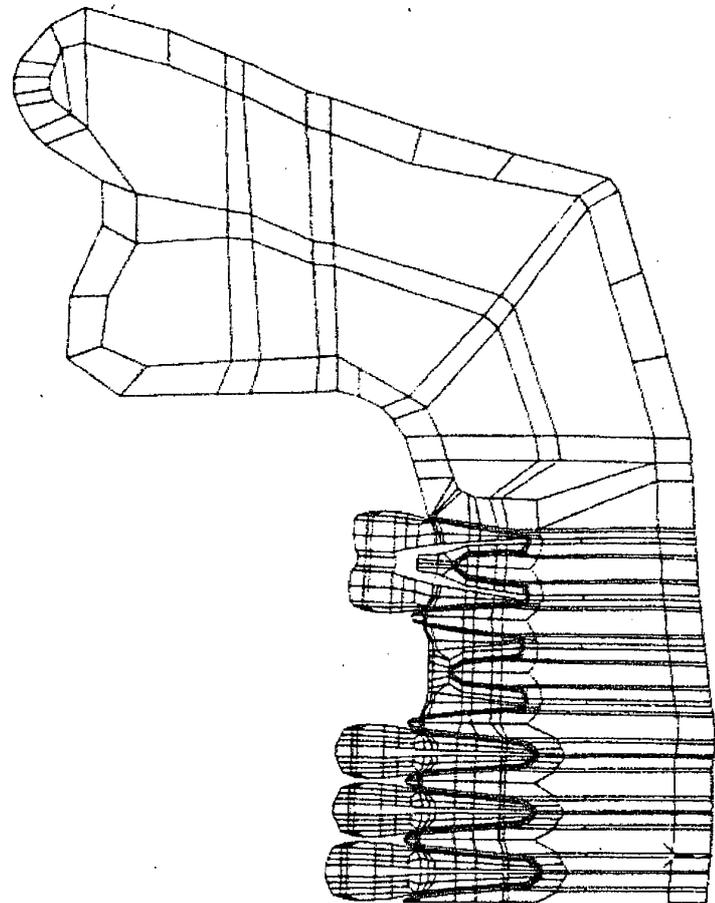


Fig. 15

