



(10) **DE 10 2012 004 705 A1** 2013.09.12

(12) **Offenlegungsschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2012 004 705.3**  
(22) Anmeldetag: **07.03.2012**  
(43) Offenlegungstag: **12.09.2013**

(51) Int Cl.: **A61B 19/00** (2012.01)  
**A61F 2/44** (2012.01)  
**A61B 6/00** (2012.01)  
**G06T 7/40** (2012.01)  
**G09B 23/30** (2012.01)

(71) Anmelder:  
**Copf, Franz, Dr., 70184, Stuttgart, DE**

(74) Vertreter:  
**Ostertag & Partner, Patentanwälte, 70597,  
Stuttgart, DE**

(72) Erfinder:  
**gleich Anmelder**

(56) Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht  
gezogene Druckschriften:

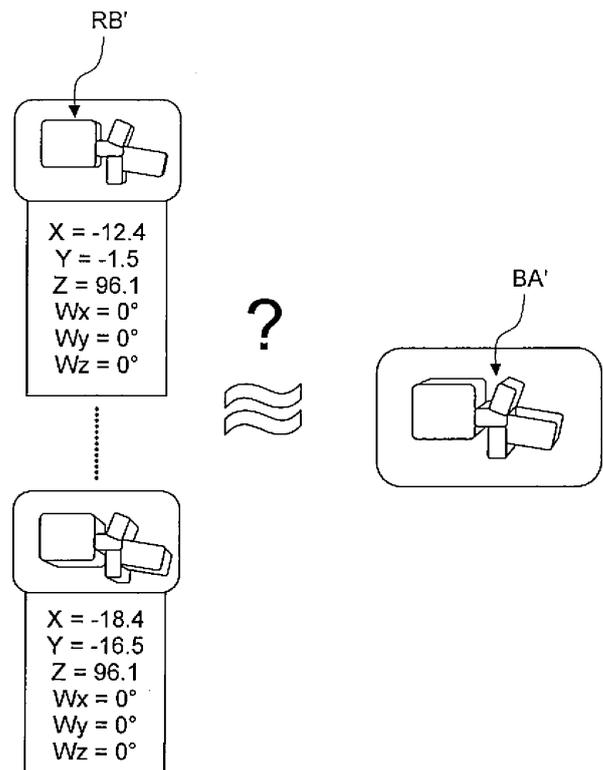
**US 2010 / 0 280 351 A1**  
**US 2011 / 0 092 859 A1**  
**US 5 541 515 A**

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

**Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen**

(54) Bezeichnung: **Verfahren zur computergestützten Bestimmung der Lage eines auf einem Röntgenbild  
abgebildeten Wirbelsäulenabschnitts relativ zu einem Röntgengerät**

(57) Zusammenfassung: Es wird ein Verfahren zur computergestützten Bestimmung der Lage eines auf einem Röntgenbild abgebildeten Abschnitts einer Wirbelsäule (WS) relativ zu einem Röntgengerät (10) angegeben, das bei der Aufnahme des Röntgenbildes verwendet wurde. Datensätze in einer Datenbank umfassen jeweils Bildinformationen zu einem zweidimensionalen Referenz-Röntgenbild (RB, RB') eines Wirbelsäulenteils (60; 70), wobei sich die Referenz-Röntgenbilder (RB, RB') der Datensätze durch die Lage des Wirbelsäulenteils (60; 70) relativ zu einem ersten Röntgengerät (10') voneinander unterscheiden, das bei der Aufnahme der Referenz-Röntgenbilder (RB, RB') verwendet wurde. Jeder Datensatz enthält außerdem Lageinformationen zu der Lage des mindestens einen Wirbelsäulenteils (60; 70) relativ zu dem ersten Röntgengerät (10') während der Aufnahme des Referenz-Röntgenbildes (RB, RB'). Durch Vergleich eines Ziel-Röntgenbildes (ZB) oder Teilen (BA') davon mit den in der Datenbank gespeicherten Bildinformationen zu den Referenz-Röntgenbildern (RB; RB') wird ermittelt, in welcher Lage sich der Wirbelsäulenabschnitt während der Aufnahme des Ziel-Röntgenbildes relativ zu dem dabei verwendeten Röntgengerät (10) befand.



**Beschreibung**

## HINTERGRUND DER ERFINDUNG

## 1. Gebiet der Erfindung

**[0001]** Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur computergestützten Bestimmung der Lage eines auf einem Röntgenbild abgebildeten Abschnitts einer Wirbelsäule relativ zu einem Röntgengerät, das bei der Aufnahme des Röntgenbildes verwendet wurde. Die Erfindung betrifft ferner ein Computerprogramm sowie eine Wirbelsäulensimulationsvorrichtung zur Durchführung des Verfahrens.

## 2. Beschreibung des Standes der Technik

**[0002]** In der Wirbelsäulenchirurgie benötigt der behandelnde Arzt häufig Röntgenaufnahmen eines zu behandelnden Wirbelsäulenabschnitts, bei denen sich die Wirbelsäule in unterschiedlichen Stellungen, z. B. Inklination, Reklination oder Lateralflexion, befindet. Derartige Röntgenaufnahmen der Wirbelsäule werden meist als Funktionsaufnahmen bezeichnet. Durch Vergleichen der Funktionsaufnahmen kann der behandelnde Arzt Rückschlüsse ziehen, wie sich die Abstände und Winkel zwischen den benachbarten Wirbeln verändern, wenn der Patient den Rücken in der Koronal- oder Sagittalebene krümmt. Aus einem solchen Vergleich kann der behandelnde Arzt beispielsweise die Abmessungen eines Implantats ableiten, das in einen Zwischenraum zwischen zwei benachbarten Wirbeln eingeführt werden soll. Falls sich der behandelnde Arzt dabei eines Computerprogramms bedient, wie es aus der WO 2011/104028 bekannt ist, so benötigt das Computerprogramm ebenfalls mehrere Funktionsaufnahmen, um dem Arzt einen Vorschlag für eine geeignete Implantatgeometrie unterbreiten zu können.

**[0003]** Um einerseits die Strahlenbelastung und andererseits die Kosten niedrig zu halten, handelt es sich bei derartigen Funktionsaufnahmen in der Regel um zweidimensionale Röntgenaufnahmen. Auch zweidimensionale Röntgenaufnahmen ermöglichen es dem Arzt, Rückschlüsse auf die dreidimensionale Anordnung der Wirbel im betreffenden Wirbelsäulenabschnitt zu ziehen. Selbst sehr erfahrenen Ärzten gelingt es jedoch nicht immer zuverlässig zu erkennen, ob ein auf einem Röntgenbild verdreht erscheinender Wirbelsäulenabschnitt tatsächlich gegenüber den übrigen Wirbeln verdreht angeordnet ist oder die Verdrehung lediglich scheinbar ist, weil der Patient während der Röntgenaufnahme verdreht relativ zu dem bei der Röntgenaufnahme verwendeten Röntgengerät ausgerichtet war.

**[0004]** Der Rückgriff auf ein dreidimensionales Röntgenbild, wie es beispielsweise mit Hilfe der Magnetoresonanztomographie (MRT) erzeugt werden kann,

hilft dem behandelnden Arzt nur bedingt weiter, da ein solches Röntgenbild die Wirbelsäulenabschnitte nur in einer einzigen Stellung zeigt. In einer anderen Stellung der Wirbelsäule, z. B. in bei starker Inklination, können zusätzliche Drehungen oder Verschiebungen der Wirbel auftreten, die man allein auf der Grundlage der dreidimensionalen Röntgenaufnahme nicht vorhersehen kann. Dies hängt letztlich mit der Tatsache zusammen, dass die menschliche Wirbelsäule ein äußerst komplexes Organ mit einer großen Anzahl von Freiheitsgraden hat, das sich einer einfachen Vorhersehbarkeit häufig entzieht.

**[0005]** Eine große Hilfe bei der Bewertung von Funktionsaufnahmen wäre es, wenn zumindest bekannt wäre, wie der auf einem Röntgenbild abgebildete Wirbelsäulenabschnitt während der Röntgenaufnahme relativ zu dem Röntgengerät angeordnet gewesen ist. Zwar achtet man bei der Herstellung von Funktionsaufnahmen darauf, dass der Patient eine genau definierte Lage zum Röntgengerät einnimmt. So müssten sich manchmal die Patienten mit ihren Füßen auf am Boden eingezeichnete Umrisse stellen und den Kopf in einer bestimmten Position halten. Da aber die Lage der einzelnen Wirbel innerhalb des Patienten nur ungenau bekannt ist, ist auf der späteren Röntgenaufnahme nicht mehr erkennbar, wo genau sich die einzelnen Wirbel während der Aufnahme relativ zum Röntgengerät befanden. Dementsprechend ist es nicht möglich, aus einem derartigen zweidimensionalen Röntgenbild die Lage eines Wirbels oder eines Wirbelsäulenabschnitts relativ zu einem äußeren Bezugssystem, z. B. dem Ort der Röntgenquelle, anzugeben. Nur mit solchen genauen Lageinformationen ist es jedoch möglich, aus mehreren Funktionsaufnahmen Rückschlüsse über den dreidimensionalen Aufbau eines Wirbelsäulenabschnitts in mehreren Stellungen zu ziehen.

**[0006]** Noch gravierender sind die Probleme, wenn Funktionsaufnahmen miteinander verglichen werden sollen, die mit unterschiedlichen Röntgengeräten aufgenommen wurden. Da es in der Regel an jeglicher Dokumentation fehlt, wie genau der Patient relativ zu dem betreffenden Röntgengerät während der Aufnahme aufgerichtet war, lassen sich solche Funktionsaufnahmen in der Regel nicht so miteinander vergleichen, dass auf die dreidimensionale Anordnung der Wirbel geschlossen werden kann.

## ZUSAMMENFASSUNG DER ERFINDUNG

**[0007]** Aufgabe der Erfindung ist es, ein Verfahren zur computergestützten Lage eines auf einem Röntgenbild abgebildeten Abschnitts einer Wirbelsäule relativ zu einem Röntgengerät anzugeben, das bei der Aufnahme des Röntgenbildes verwendet wurde. Erfindungsgemäß umfasst das Verfahren die folgenden Schritte:

a) Bereitstellen einer Datenbank, in der mehrere Datensätze enthalten sind, wobei jeder Datensatz umfasst:

- Bildinformationen zu einem zweidimensionalen Referenz-Röntgenbild eines Wirbelsäulenteils, wobei sich die Referenz-Röntgenbilder der Datensätze durch die Lage des Wirbelsäulenteils relativ zu einem ersten Röntgengerät voneinander unterscheiden, das bei der Aufnahme der Referenz-Röntgenbilder verwendet wurde, und
- Lageinformationen zu der Lage des mindestens einen Wirbelsäulenteils relativ zu dem ersten Röntgengerät während der Aufnahme des Referenz-Röntgenbildes;

b) Aufnehmen eines zweidimensionalen Ziel-Röntgenbildes von einem Wirbelsäulenabschnitt eines Patienten unter Verwendung eines zweiten Röntgengeräts, das von dem ersten Röntgengerät verschieden sein kann;

c) Vergleichen des in Schritt b) aufgenommenen Ziel-Röntgenbildes oder Teilen davon mit den in der Datenbank gespeicherten Bildinformationen zu den Referenz-Röntgenbildern;

d) Ermitteln auf der Grundlage von in Schritt c) erhaltenen Ergebnissen, in welcher Lage sich der Wirbelsäulenabschnitt während des Schritts b) relativ zu dem zweiten Röntgengerät befand.

**[0008]** Die Erfindung geht von der Überlegung aus, dass sich bei Patienten eines bestimmten Alters zwar die Lage, nicht aber die Form der Wirbel nennenswert voneinander unterscheidet. Daher ist es möglich, die von einem Patienten gemachten Röntgenaufnahmen mit Röntgenaufnahmen zu vergleichen, die von einer Referenz-Wirbelsäule (oder Teilen davon) gemacht wurden. Wenn beispielsweise eine Vielzahl von Röntgenaufnahmen eines ganz bestimmten Lendenwirbels einer solchen Referenz-Wirbelsäule gemacht werden, die sich lediglich durch die Lage des betreffenden Lendenwirbels relativ zum Röntgengerät voneinander unterscheiden, so ist es möglich, ein Ziel-Röntgenbild des Patienten, auf dem der betreffende Lendenwirbel ebenfalls erkennbar ist, mit der in der Datenbank gespeicherten Vielzahl von Referenz-Röntgenbildern des betreffenden Lendenwirbels zu vergleichen. Dann kann im Schritt c) aus den Referenz-Röntgenbildern mindestens ein Vergleichs-Röntgenbild ausgewählt werden, das dem Ziel-Röntgenbild oder Teilen davon am ähnlichsten ist. Die Lage des Wirbelsäulenabschnitts gemäß dem Schritt d) lässt sich dann aus den Lageinformationen ableiten, die in dem Datensatz enthalten sind, dem das Vergleichs-Röntgenbild zugeordnet ist. In gleicher Weise kann auch mit den übrigen Wirbeln verfahren werden, die auf dem Ziel-Röntgenbild abgebildet sind.

**[0009]** Da die Gesetze der Strahlenprojektion in gleicher Weise bei allen Röntgengeräten gelten, lässt sich somit im Nachhinein für ein beliebiges Röntgenbild ermitteln, in welcher Lage sich einzelne Wirbel

oder ein größerer Wirbelsäulenabschnitt relativ zu einem Röntgengerät befand, das bei der Aufnahme des Röntgenbildes verwendet wurde. Dadurch können auch auf der Grundlage von zweidimensionalen Funktionsaufnahmen Aussagen über die dreidimensionale Anordnung der Wirbel des Patienten in unterschiedlichen Stellungen der Wirbelsäule getroffen werden.

**[0010]** Unter dem Begriff der "Lageinformationen" wird im Folgenden die Gesamtheit an Informationen verstanden, die erforderlich sind, um die Lage, d. h. den Ort und die Orientierung, eines Körpers im dreidimensionalen Raum relativ zu dem ersten Röntgengerät zu beschreiben. Der Ort eines Körpers im dreidimensionalen Raum wird im Allgemeinen durch drei Koordinaten eines Koordinatensystems angegeben. Bei dem Koordinatensystem kann es sich beispielsweise um ein kartesisches, ein Zylinder- oder ein Polar-Koordinatensystem handeln. Die Orientierung eines Körpers im Raum wird meist durch die Winkel bezüglich dreier Achsen angegeben, bei denen es sich z. B. um die Achsen eines kartesischen Koordinatensystems handeln kann.

**[0011]** Die Angabe der Lage eines Wirbelsäulenteils im dreidimensionalen Raum erfordert somit die Angabe von insgesamt sechs Koeffizienten, von denen drei den Ort und drei die Orientierung kennzeichnen. Die Datenbank kann somit beispielsweise für jeden Wirbel mehrere hundert oder sogar mehrere tausend Röntgenbilder umfassen, aus denen der betreffende Wirbel in allen denkbaren Lagen abgebildet ist. Entsprechendes gilt für die übrigen Wirbel der Referenz-Wirbelsäule. Ferner kann die Datenbank entsprechende Datensätze für andere Referenz-Wirbelsäulen enthalten, die insbesondere dem Alter oder auch dem Geschlecht des Patienten Rechnung tragen.

**[0012]** Im Prinzip ist es mit der heute verfügbaren Speichertechnologie möglich, sämtliche Bilder als pixelbasierte Bildinformationen in der Datenbank zu speichern. Zum Zwecke der Datenreduktion können die Bildinformationen jedoch auch als vektorgrafikbasierte Informationen gespeichert werden. So lassen sich die Röntgenbilder der Wirbelsäulenteile beispielsweise in parametrisierte Kantenbilder umwandeln, wodurch sich die Informationsmenge drastisch reduziert.

**[0013]** Unter einem Wirbelsäulenteil wird im Folgenden ein einzelner Wirbel, eine einen Wirbelsäulenabschnitt bildende Anordnung mehrerer benachbarter Wirbel, ein vollständiges Wirbelsäulensegment wie etwa die Halswirbelsäule oder die Lendenwirbelsäule oder im Extremfall sogar die ganze Wirbelsäule verstanden.

**[0014]** Unter einem Datensatz wird im vorliegenden Zusammenhang lediglich eine rein logische Zuordnung von Informationen verstanden. Es ist deswegen nicht erforderlich, dass die zu einem Datensatz zusammengefassten Informationen auch in einer Datenbankstruktur in entsprechender Weise zusammengefasst sind. Es genügt stattdessen, dass die betreffenden Informationen auf irgendeine Weise miteinander verknüpft sind, so dass zu den Bildinformationen der Referenz-Röntgenbilder die dazu abgespeicherten Lageinformationen ausgelesen werden können.

**[0015]** Um die Zahl der zu speichernden Referenz-Röntgenbilder zu verringern, kann es zweckmäßig sein, aus der Gesamtzahl der denkbaren unterschiedlichen Lagen des Wirbelsäulenteils eine relativ kleine Auswahl zu treffen. So können die Lagen beispielsweise jeweils um 5 cm entlang der drei Raumrichtungen beabstandet sein, während bezüglich der Orientierung der Wirbelsäulenteile die Abstände zwischen den Winkeln  $2^\circ$  betragen. Der Vergleich des Ziel-Röntgenbilds mit den Referenz-Röntgenbildern erfolgt dann durch Interpolation. Dabei werden aus den Referenz-Röntgenbildern mehrere Vergleichs-Röntgenbilder ausgewählt, die dem Ziel-Röntgenbild oder Teilen davon am ähnlichsten sind. Die Lage des Wirbelsäulenabschnitts gemäß dem Schritt d) wird dann durch Interpolation aus den Lageinformationen abgeleitet, die in den Datensätzen enthalten sind, denen die Vergleichs-Röntgenbilder zugeordnet sind.

**[0016]** Eine weitere Verringerung der Datenmenge lässt sich erzielen, wenn nicht einzelne Wirbel miteinander verglichen werden, sondern ganze Wirbelabschnitte. Das Wirbelsäulenteil umfasst dann mehrere gelenkig miteinander verbundene Wirbel. Jeder Datensatz umfasst in diesem Fall mehrere dem Datensatz zugeordnete Unterdatensätze, wobei jeder Unterdatensatz Bildinformationen zu einem zweidimensionalen Referenz-Röntgenbild des Wirbelsäulenteils umfasst. Die Referenz-Röntgenbilder der Unterdatensätze unterscheiden sich durch die Lage der Wirbel zueinander, als die Aufnahmen der Referenz-Röntgenbilder gemacht wurden. Mindestens ein Wirbel auf den Referenz-Röntgenbildern aller einem übergeordneten Datensatz zugeordneten Unterdatensätze befindet sich dabei immer in der gleichen, durch den übergeordneten Datensatz vorgegebenen Lage relativ zu dem ersten Röntgengerät. Außerdem umfassen die Unterdatensätze jeweils Lageinformationen zu der relativen Lage der Wirbel zueinander während der Aufnahme des betreffenden Referenz-Röntgenbildes. Diese Reduktion der Datenmenge beruht letztlich darauf, dass bei einer bereits festgestellten Lage eines bestimmten Wirbels die benachbarten Wirbel sich nicht mehr in jeder beliebigen Lage relativ zu dem besagten Wirbel befinden können, sondern die Zahl der möglichen relativen Lagen durch zusätzliche Randbedingungen wie Gelenkge-

metrie oder umgebender Bandapparat erheblich eingeschränkt ist.

**[0017]** Insbesondere können von den Wirbelsäulenteilen mindestens zwei Ziel-Röntgenbilder gemacht werden, bei denen sich die Wirbel in unterschiedlichen relativen Lagen zueinander befinden. Aus den Lageinformationen zu den relativen Lagen wird dann abgeleitet, wie sich die relative Lage der Wirbel zwischen der Aufnahme der mindestens zwei Ziel-Röntgenbilder verändert hat. Somit lässt sich durch Vergleich von zwei Ziel-Röntgenbildern mit den als Referenz dienenden Referenz-Röntgenbildern unmittelbar ableiten, wie sich die Wirbel zwischen den beiden Aufnahmen relativ zueinander verdreht und/oder verschoben haben. Diese Information ist besonders wichtig, da sie dem behandelnden Arzt oder einem zur seiner Unterstützung verwendeten Computerprogramm Auskunft darüber verschafft, welche relative Lageänderungen zwei zueinander benachbarte Wirbel überhaupt ausführen können. Wird in das von diesen beiden Wirbeln begrenzte Bandscheibenfach später beispielsweise eine bewegliche Bandscheibenprothese eingesetzt, so sollte diese in der Lage sein, den auf diese Weise erfassten Bewegungsspielraum zu erhalten.

**[0018]** Da von der Referenz-Wirbelsäule oder Teilen davon eine sehr große Anzahl von Röntgenaufnahmen gemacht werden muss, können die Röntgenaufnahmen nicht von einem lebendigen Patienten gemacht werden. Bevorzugt wird deswegen zum Aufbau der Datenbank ein Wirbelsäulenteil bereitgestellt, bei dem es sich um ein Modell oder um ein anatomisches Präparat eines Körperspenders handelt. Im Falle eines Modells kann dieses z. B. nach einer dreidimensionalen hochaufgelösten Röntgenaufnahme einer gesunden Wirbelsäule angefertigt sein. Das Modell oder Präparat wird dann in unterschiedlichen Lagen in einem Strahlengang des ersten Röntgengeräts angeordnet, wobei die Lagen jeweils beispielsweise durch Messung bestimmt werden. In jeder Lage wird von dem ersten Röntgengerät ein Referenz-Röntgenbild des Wirbelsäulenteils gemacht.

**[0019]** Ein anatomisches Präparat hat gegenüber einem Modell den Vorzug, dass die spezifischen Absorptionseigenschaften der Wirbel bezüglich des Röntgenlichts in einem Modell nur unzureichend wiedergegeben werden können. Röntgenaufnahmen von einem Modell können sich deswegen signifikant von Röntgenaufnahmen eines realen Wirbels, der die gleiche Form wie das Modell hat, unterscheiden.

**[0020]** Vorteilhaft ist die Verwendung eines anatomischen Präparats außerdem vor allem dann, wenn nicht Aufnahmen einzelner Wirbel, sondern von Wirbelsäulenabschnitten gemacht werden. Wenn das anatomische Präparat die Bandscheiben zwischen den Wirbeln und gegebenenfalls sogar den umge-

benden Bandapparat umfasst, können die tatsächlich bestehenden Bewegungsmöglichkeiten optimal reproduziert werden.

**[0021]** Nur mit der Verwendung eines Modells oder eines anatomischen Präparats ist es im Übrigen möglich, die Lage des Wirbelsäulenteils relativ zu dem ersten Röntgengerät mit der erforderlichen Genauigkeit zu bestimmen. Dabei kann insbesondere für jeden Wirbel eine Nulllage definiert werden, bei sich der Wirbel so im Zentrum des Röntgenlichtbündels befindet, dass keine Doppelkanten entstehen und der axiale Röntgenstrahl durch die Mitte zwischen den Pedikelaugen des betreffenden Wirbels verläuft. Selbstverständlich sind auch andere Festlegungen der Nulllage möglich.

**[0022]** Im Zusammenhang mit dem Aufbau der Datenbank kann bei Verwendung eines Modells oder eines Präparats ein Roboter verwendet werden, der das Wirbelsäulenteil in den unterschiedlichen Lagen im Strahlengang des ersten Röntgengeräts anordnet. Bei der Verwendung geeigneter Servomotoren liefert der Roboter gleichzeitig die abzuspeichernden Lageinformationen. Mit einem Roboter lässt sich die große Zahl von Röntgenaufnahmen, die für den Aufbau der Datenbank erforderlich ist, in relativ kurzer Zeit herstellen.

**[0023]** Wenn das auf den Referenz-Röntgenbildern abgebildete Wirbelsäulenteil mehrere gelenkig miteinander verbundene Wirbel umfasst, so kann der Roboter ferner dazu verwendet werden, die Wirbel in unterschiedlichen relativen Lagen anzuordnen. Hierzu kann der Roboter über zwei Arme oder ähnliche Halteelemente verfügen, um die beiden Enden des Wirbelsäulenteils relativ zueinander auslenken zu können.

**[0024]** In diesem Falle ist es zweckmäßig, wenn der Roboter beim Anordnen der Wirbel in unterschiedlichen relativen Lagen Widerstandskräfte misst, die bei einer Veränderung der relativen Lage zwischen den Wirbeln überwunden werden müssen. Wenn diese Widerstandskräfte ebenfalls in der Datenbank gespeichert werden, lassen sich Informationen darüber gewinnen, welcher Bewegungswiderstand überwunden werden muss, wenn die Wirbelsäule in unterschiedliche Stellungen überführt wird. Diese Informationen können ihrerseits bei der Auswahl einer geeigneten Bandscheibenprothese verwendet werden.

**[0025]** Aus der DE 10 2008 048 739 A1 ist beispielsweise eine Drehwinkelbegrenzung für eine Bandscheibenprothese bekannt, bei der sich der Bewegungswiderstand mit zunehmendem Drehwinkel gemäß einer vorgebbaren Kennlinie erhöht. Diese Kennlinie kann dann so vorgegeben werden, dass die betreffende Bandscheibenprothese den gleichen

Drehwiderstand erzeugt wie eine gesunde Bandscheibe.

**[0026]** Das erfindungsgemäße Verfahren kann auch beim Aufnehmen eines zweidimensionalen Röntgenbildes eines Wirbelsäulenteils aus einer gewünschten Perspektive unter Verwendung eines Röntgengeräts verwendet werden, das eine Röntgenquelle und einen gemeinsam mit der Röntgenquelle verfahrbaren Röntgendetektor aufweist. Ein solches Verfahren weist die folgenden Schritte auf:

- i) Festlegen einer Perspektive, von der aus ein zweidimensionales Röntgenbild des Wirbelsäulenteils aufgenommen werden soll, unter Verwendung eines dreidimensionalen Bildes;
- ii) Aufnehmen eines vorläufigen zweidimensionalen Röntgenbildes des Wirbelsäulenteils mit Hilfe des zweiten Röntgengeräts, wobei sich die Röntgenquelle in einer Ausgangsposition befindet;
- iii) Bestimmen der Lage des Wirbelsäulenteils relativ zu dem zweiten Röntgengerät nach einem der vorhergehenden Ansprüche;
- iv) Berechnen einer Zielposition, welche die Röntgenquelle einnehmen muss, damit das Wirbelsäulenteil mit der in Schritt a) festgelegten Perspektive durchleuchtet werden kann, unter Berücksichtigung der in Schritt c) bestimmten Lage des Wirbelsäulenteils;
- v) Verfahren der Röntgenquelle an die in Schritt d) berechnete Zielposition;
- vi) Aufnehmen eines endgültigen zweidimensionalen Röntgenbildes des Wirbelsäulenteils mit Hilfe des zweiten Röntgengeräts.

**[0027]** Auch hier dient das erste Röntgengerät letztlich als Referenz, um das vorläufige Röntgenbild und das endgültige Röntgenbild miteinander in Beziehung zu setzen. Das dreidimensionale Bild, unter dessen Verwendung die Perspektive in Schritt i) festgelegt wird, kann ein Röntgenbild der Wirbelsäule des betreffenden Patienten oder auch ein dreidimensionales Bild einer Referenz-Wirbelsäule sein. Im zuletzt genannten Falle kann das dreidimensionale Bild auch von einem Computer erzeugt sein, ohne dass ein reales Modell der Wirbelsäule existiert.

**[0028]** Gegenüber dem Verfahren, das aus der DE 10 2009 051 857 A1 bekannt ist, benötigt das erfindungsgemäße Verfahren somit kein tatsächliches dreidimensionales Bild der Wirbelsäule des Patienten, da die Referenzierung über die Referenz-Röntgenbilder erfolgt, die in der Datenbank gespeichert sind. Trotzdem ermöglicht es auch das erfindungsgemäße Verfahren, ein zweidimensionales Röntgenbild aus einer gewünschter Perspektive aufzunehmen, ohne dass man sich durch eine Vielzahl von Versuchsbelichtungen an die gewünschte Perspektive annähern muss. Stattdessen kann die Röntgenquelle nach Aufnahme eines einzigen vorläufigen zweidimensionalen Röntgenbildes direkt eine Zielposition anfahren.

ren, von der aus das betreffende Wirbelsäulenteil aus der gewünschten Perspektive aufgenommen werden kann.

**[0029]** Ein solches Verfahren ist vor allem für intraoperative Durchleuchtungen (Fluoroskopie) zweckmäßig, bei denen mit Hilfe eines C-Bogen-Röntgengeräts in kurzen Zeitabständen Röntgenaufnahmen aus unterschiedlichsten Perspektiven gemacht werden müssen.

**[0030]** Gegenstand der Erfindung ist außerdem ein Computerprogramm zur Bestimmung der Lage eines auf einem Röntgenbild abgebildeten Abschnitts einer Wirbelsäule relativ zu einem Röntgengerät, das bei der Aufnahme des Röntgenbildes verwendet wurde. Erfindungsgemäß ist das Computerprogramm dazu eingerichtet, einen Computer, auf dem das Computerprogramm abläuft, dazu zu veranlassen, die folgenden Schritte auszuführen:

a) Zugreifen auf eine Datenbank, in der mehrere Datensätze enthalten sind, wobei jeder Datensatz umfasst:

- Bildinformationen zu einem zweidimensionalen Referenz-Röntgenbild eines Wirbelsäulenteils, wobei sich die Referenz-Röntgenbilder der Datensätze durch die Lage des Wirbelsäulenteils relativ zu einem ersten Röntgengerät voneinander unterscheiden, das bei der Aufnahme der Referenz-Röntgenbilder verwendet wurde, und
- Lageinformationen zu der Lage des mindestens einen Wirbelsäulenteils relativ zu dem ersten Röntgengerät während der Aufnahme des Referenz-Röntgenbildes;

b) Einlesen eines zweidimensionalen Ziel-Röntgenbildes, das von einem Wirbelsäulenabschnitt eines Patienten unter Verwendung eines zweiten Röntgengeräts aufgenommen wurde, das von dem ersten Röntgengerät verschieden sein kann;

c) Vergleichen des in Schritt b) eingelesenen Ziel-Röntgenbildes oder Teilen davon mit den in der Datenbank gespeicherten Bildinformationen zu den Referenz-Röntgenbildern;

d) Ermitteln auf der Grundlage von in Schritt c) erhaltenen Ergebnissen, in welcher Lage sich der Wirbelsäulenabschnitt während des Schritts b) relativ zu dem zweiten Röntgengerät befand.

**[0031]** Gegenstand der Erfindung ist außerdem eine Wirbelsäulen-Simulationsvorrichtung mit

a) einem Röntgengerät, das eine Röntgenquelle und einen Röntgendetektor umfasst, wobei die Röntgenquelle dazu eingerichtet ist, Röntgenstrahlung zu erzeugen, die sich entlang eines Strahlengangs zum Röntgendetektor hin ausbreitet;

b) einem Manipulator, der umfasst:

- zwei Halterungen, die dazu eingerichtet sind, zwischen sich ein Wirbelsäulenteil zu halten, bei dem es sich um ein Modell oder um ein

Körperspender entnommenes anatomisches Präparat eines Wirbels oder eines Wirbelsäulenabschnitts handelt,

- Stellmotoren, die dazu eingerichtet sind, die Halterungen derart zu verfahren, dass das Wirbelsäulenteil in unterschiedlichen Lagen relativ zu dem Röntgengerät angeordnet ist;

c) einem Steuergerät, das dazu eingerichtet ist, die Stellmotoren des Manipulators und das Röntgengerät derart zu steuern, dass der Manipulator das Wirbelsäulenteil in unterschiedliche Lagen relativ zu dem Röntgengerät verfährt, wobei in jeder der unterschiedlichen Lagen ein Röntgenbild von dem Wirbelsäulengerät aufgenommen wird und die jeweilige Lage in einem Datenspeicher gespeichert wird.

**[0032]** Mit einer solchen Wirbelsäulen-Simulationsvorrichtung ist es möglich, in vergleichsweise kurzer Zeit eine sehr große Anzahl von Röntgenaufnahmen des Wirbelsäulenteils in verschiedenen Lagen zu erzeugen.

**[0033]** Wenn das Wirbelsäulenteil mehrere gelenkig miteinander verbundene Wirbel umfasst, so kann der Manipulator dazu eingerichtet sein, die Wirbel in unterschiedliche relative Lagen zu überführen. Ferner kann dann das Steuergerät dazu eingerichtet sein, die Stellmotoren des Manipulators und das Röntgengerät derart zu steuern, dass der Manipulator die Wirbel in unterschiedliche relative Lagen verfährt, wobei in jeder der unterschiedlichen relativen Lagen ein Röntgenbild von dem Wirbelsäulengerät aufgenommen wird und die jeweilige relative Lage in dem Datenspeicher gespeichert wird.

**[0034]** Wenn der Manipulator dazu eingerichtet ist, Kräfte zu messen, die bei einer Änderung der relativen Lage überwunden werden müssen, so können diese Informationen ebenfalls in dem Datenspeicher gespeichert werden.

**[0035]** Die vorstehend erläuterte Erfindung lässt sich vorteilhaft nicht nur im Zusammenhang mit Röntgenbildern der Wirbelsäule, sondern auch mit Röntgenbildern anderer Skelettteile einsetzen. An die Stelle des Wirbelsäulenteils tritt dann allgemein ein Skelettteil.

#### KURZE BESCHREIBUNG DER ZEICHNUNGEN

**[0036]** Weitere Merkmale und Vorteile der Erfindung ergeben sich aus der nachfolgenden Beschreibung eines Ausführungsbeispiels anhand der Zeichnungen. Darin zeigen:

**[0037]** [Fig. 1](#) eine schematische Darstellung eines Röntgengeräts, das zur Aufnahme eines Wirbelsäulenabschnitts verwendet wird;

[0038] [Fig. 2](#) das Bild dreier Würfel in Zentralperspektive;

[0039] [Fig. 3](#) das Bild dreier Wirbelkörper in Zentralperspektive;

[0040] [Fig. 4](#) ein Röntgengerät mit einem erfindungsgemäßen Roboter zum Aufbau einer erfindungsgemäßen Datenband;

[0041] [Fig. 5](#) die in der [Fig. 4](#) gezeigte Anordnung, wobei sich der Roboter in einer anderen Verfahrenstellung befindet;

[0042] [Fig. 6](#) eine Vielzahl von Röntgenbildern eines Wirbels aus unterschiedlichen Perspektiven;

[0043] [Fig. 7](#) ein einzelnes Röntgenbild eines Wirbels;

[0044] [Fig. 8](#) ein Kantenbild des in der [Fig. 7](#) gezeigten Wirbels;

[0045] [Fig. 9](#) eine schematische Darstellung eines Datensatzes mit einem Kantenbild eines Wirbels und den dazu abgespeicherten Lageinformationen;

[0046] [Fig. 10](#) einen Arbeitsplatz zur Bearbeitung von Röntgenbildern unter Verwendung des erfindungsgemäßen Verfahrens;

[0047] [Fig. 11](#) eine schematische Darstellung zur Erläuterung, wie ein Kantenbildausschnitt eines Ziel-Röntgenbildes mit gespeicherten Kantenbildern von Referenz-Röntgenbildern verglichen wird;

[0048] [Fig. 12](#) eine der [Fig. 4](#) entsprechende Darstellung eines Röntgengeräts mit einem erfindungsgemäßen Roboter zum Aufbau einer erfindungsgemäßen Datenband, wobei gemäß einem zweiten Ausführungsbeispiel Röntgenbilder von mehreren Wirbeln gleichzeitig aufgenommen werden;

[0049] [Fig. 13](#) die in der [Fig. 12](#) gezeigte Anordnung, wobei sich der Roboter in einer anderen Verfahrenstellung befindet;

[0050] [Fig. 14](#) und [Fig. 15](#) zwei Kantenbilder von Wirbelsäulenabschnitten in unterschiedlichen Stellungen;

[0051] [Fig. 16](#) eine Darstellung der Datenbankstruktur für das zweite Ausführungsbeispiel;

[0052] [Fig. 17](#) ein Röntgengerät für die intraoperative Aufnahme von Röntgenbildern, bei dem nach der Aufnahme eines vorläufigen Röntgenbildes direkt eine gewünschte Zielposition der Röntgenquelle angefahren werden kann.

[0053] [Fig. 18](#) ein Flussdiagramm zur Erläuterung wesentlicher Schritte des erfindungsgemäßen Verfahrens.

## BESCHREIBUNG BEVORZUGTER AUSFÜHRUNGSBEISPIELE

### 1. Problemstellung

[0054] Die [Fig. 1](#) zeigt in einer schematischen Seitenansicht ein konventionelles Röntgengerät, das für Aufnahme von zweidimensionalen Röntgenbildern der menschlichen Wirbelsäule WS geeignet und insgesamt mit **10** bezeichnet ist. Das Röntgengerät **10** umfasst einen Ständer **12**, an dem ein sich in horizontaler Richtung erstreckender Arm **14** vertikal verfahrbar befestigt ist. Der Arm **14** trägt an einem Ende ein Gehäuse **16**, in dem eine Röntgenröhre **17** angeordnet ist. In der Röntgenröhre **17** bildet ein Target, das mit einem Elektronenstrahl beschossen wird, eine Röntgenquelle **18** für die Erzeugung von Röntgenstrahlung.

[0055] Ferner ist in dem Gehäuse **16** eine Blende **20** angeordnet, mit der sich die Abmessungen des Bildausschnitts festlegen lassen. Die Blende **20** umfasst hierzu mehrere verstellbare Blendenelemente, die den Strahlengang der gestrichelt angedeuteten Röntgenstrahlung **22** begrenzen. Die Blende **20** kann auch in die Röntgenröhre **17** integriert sein.

[0056] Der Arm **14** trägt an seinem gegenüberliegenden Ende einen Halter **26** für einen Röntgendetektor **28**. Dieser erfasst die Röntgenstrahlung **22**, die den Patienten **30** durchtritt, und erzeugt daraus ein Röntgenbild. Bei dem Röntgendetektor **28** kann es sich um einen digitalen Röntgendetektor handeln, der unmittelbar ein digitales Röntgenbild erzeugt, das z. B. auf einem Bildschirm betrachtet werden kann. Alternativ hierzu kommt die Ausbildung des Röntgendetektors **28** als digitaler Speicherfilm oder als klassischer Röntgenfilm in Betracht.

[0057] Das Gesicht des Patienten **30** weist in der [Fig. 1](#) zum Ständer **12**, so dass die Röntgenstrahlen **22** einen Abschnitt der Wirbelsäule WS des Patienten **30** lateral durchtreten. Der Röntgendetektor **28** nimmt somit ein sagittales Bild der Wirbelsäule des Patienten **30** auf. Wie der im Strahlengang liegende Wirbelsäulenabschnitt des Patienten **30** auf dem Röntgenbild erscheint, hängt von der Lage, d. h. vom Ort und der Orientierung, der Wirbelsäule relativ zum Röntgengerät **10** ab. Die Abbildung der Wirbelsäule WS auf dem Röntgenbild gehorcht dabei den Regeln der Zentralperspektive, da die Röntgenquelle **18** annähernd punktförmig ist und die Röntgenstrahlen sich geradlinig im Raum ausbreiten.

[0058] Die [Fig. 2](#) illustriert dies, wobei drei Wirbel der Wirbelsäule WS der Einfachheit halber als Kuben **32**

dargestellt sind. Je nach der Lage der Kuben **32** relativ zu der durch einen Punkt angedeuteten Lichtquelle **18** sind zusätzlich zur der dem Röntgendetektor **28** zugewandten Frontfläche **34** eine oder zwei Seitenflächen **36, 38** auf dem Röntgenbild erkennbar. Außerdem scheinen an sich parallele Kanten scheinen auf die Lichtquelle **18** zuzulaufen, wie dies für eine Zentralperspektive typisch ist. Jeder der drei identischen Kuben **32** erscheint somit auf einem Röntgenbild anders.

**[0059]** Auf einem Röntgenbild ist die Röntgenquelle **18** nicht wie in der [Fig. 2](#) erkennbar. Fehlt diese Information und unterstellt man, dass nicht identische Kuben **32**, sondern beliebige Körper abgebildet werden, so lässt sich nur mit viel Erfahrung vermuten, welche Form, Größe und Lage die abgebildeten Körper relativ zueinander haben. So wüsste man beispielsweise nicht, ob die Kanten **40** tatsächlich parallel verlaufen oder nicht doch einen Winkel zueinander einschließen.

**[0060]** Die gleichen Probleme stellen sich dem behandelnden Arzt, wenn er auf dem Röntgenbild mehrere Wirbel erkennt und daraus ableiten soll, wie diese relativ zueinander angeordnet sind. Zwar ist dem Arzt die Grundform der abgebildeten Wirbel bekannt, jedoch ist diese einerseits relativ kompliziert, und andererseits führen Abweichungen von der Grundform dazu, dass die tatsächliche Lage der Wirbel relativ zum Röntgengerät **10** im Nachhinein nicht mehr bestimmbar ist.

**[0061]** Dies veranschaulicht die [Fig. 3](#), die ein Röntgenbild **42** mit drei Wirbelkörpern WK1, WK2, WK3 des Patienten **30** zeigt. Die Wirbelkörper WK1, WK2, WK3 können dabei um alle drei Raumachsen zueinander verkippt angeordnet sein. Ähnlich wie bei der schematischen Darstellung der [Fig. 2](#) sind in diesem Röntgenbild zusätzliche Seitenflächen **36, 38** mit begrenzenden Kanten **40** erkennbar. Selbst wenn der behandelnde Arzt über eine hochaufgelöste dreidimensionale Darstellung der Wirbelsäule des Patienten **30** verfügt, aus der er die genaue Form der Wirbelkörper WK1, WK2, WK3 erkennen kann, so bleibt es eine schwierige und viel Erfahrung erfordernde Aufgabe, vom Röntgenbild **42** auf den Ort und die Orientierung der Wirbelkörper WK1, WK2, WK3 zu schließen.

**[0062]** Wüsste man genau, wie der Patient **30**, oder genauer gesagt seine Wirbelsäule WS, während der Aufnahme des Röntgenbildes **42** im Strahlengang des Röntgengeräts **10** angeordnet war, so könnte durch Rückprojektion des Strahlengangs ermittelt werden, wie die Wirbelkörper WK1, WK2, WK3 relativ zueinander angeordnet waren. Die genaue Anordnung des Patienten **30** während der Aufnahme des Röntgenbildes **42** ist jedoch nicht bekannt, und die Anordnung der Wirbelsäule WS lässt sich selbst dann

nicht ermitteln, wenn der Patient tatsächlich sich während der Röntgenaufnahme in einer sehr genau definierten Position relativ zu dem Röntgengerät **10** befand. Dies gilt umso mehr, wenn der behandelnde Arzt seine Diagnose auf der Grundlage von Röntgenbildern **42** sicherstellen muss, die er nicht selbst aufgenommen hat und ihm weder der Type des bei der Aufnahme verwendeten Röntgengeräts **10** noch die genaue Lage des Patienten während der Röntgenaufnahme bekannt ist.

## 2. Erfindungsgemäße Lösung

**[0063]** Im Folgenden werden zwei Ausführungsbeispiele der Erfindung beschrieben, mit denen es möglich ist, die Lage des auf einem Röntgenbild abgebildeten Abschnitts einer Wirbelsäule relativ zu dem bei der Aufnahme verwendeten Röntgengerät **10** zu bestimmen. Ist diese Lage bekannt, so lässt sich beispielsweise durch Rückprojektion des Strahlengangs ermitteln, wie die auf dem Röntgenbild erkennbaren Wirbel relativ zueinander angeordnet sind. Außerdem lassen sich dann mit Röntgenbilder, die mit unterschiedlichen Röntgengeräten aufgenommen wurden, direkt miteinander vergleichen. Letztlich wird es dadurch möglich, allein auf der Grundlage von zweidimensionalen Funktionsaufnahmen Aussagen über die dreidimensionale Anordnung der Wirbel des Patienten in unterschiedlichen Stellungen der Wirbelsäule zu treffen.

### a) Erstes Ausführungsbeispiel

**[0064]** Die Erfindung beruht auf der Überlegung, das Röntgenbild **42** oder Teile davon mit Referenz-Röntgenbildern zu vergleichen, die von einem oder mehreren Wirbeln aufgenommen wurden, wobei während der Aufnahme die Lage des oder der Wirbel relativ zum Röntgengerät gemessen oder in sonstiger Weise bestimmt und zusammen mit dem Referenz-Röntgenbild abgespeichert wird.

**[0065]** Hierzu ist der Aufbau einer Datenbank erforderlich, die mehrere Datensätze enthält, wobei jeder Datensatz Bildinformationen zu einem zweidimensionalen Referenz-Röntgenbild eines Wirbelsäulenteils umfasst. Die Referenz-Röntgenbilder der Datensätze unterscheiden sich dabei voneinander durch die Lage des Wirbelsäulenteils relativ zu dem Röntgengerät, das bei der Aufnahme der Referenz-Röntgenbilder verwendet wird.

**[0066]** Die Erzeugung einer solchen Datenbank wird im Folgenden mit Bezug auf die [Fig. 4](#) bis [Fig. 9](#) erläutert.

**[0067]** Die [Fig. 4](#) zeigt ein Röntgengerät **10'**, das im dargestellten Ausführungsbeispiel den gleichen Aufbau hat wie das in der [Fig. 1](#) gezeigte Röntgengerät **10**. Für die Erfindung ist dies jedoch nicht erforderlich;

vielmehr kann für den Aufbau der Datenbank auch ein anderes Röntgengerät verwendet werden, sofern dies dazu geeignet ist, zweidimensionale Röntgenbilder von Wirbelsäulenteilen aufzunehmen. Um das Röntgengerät **10'** von dem in der [Fig. 1](#) gezeigten Röntgengerät zu unterscheiden, wird es im Folgenden als erstes Röntgengerät bezeichnet und das in der [Fig. 1](#) gezeigte Röntgengerät als zweites Röntgengerät **10**.

**[0068]** Im Strahlengang des ersten Röntgengeräts **10'** ist ein Roboter **44** angeordnet, der so ausgelegt ist, dass er ein Wirbelsäulenteil in unterschiedlichen Lagen im Strahlengang des ersten Röntgengeräts **10'** anordnen kann. Der Roboter **44** weist zu diesem Zweck zwei vertikale Schienen **46** auf, entlang derer zwei horizontale Schienen **48** in Vertikalrichtung individuell verfahrbar sind, wie dies in der [Fig. 4](#) durch Doppelpfeile angeordnet ist. Die horizontalen Schienen **48** tragen ihrerseits jeweils einen Tragzylinder **50**. Die Tragzylinder **50** sind entlang der horizontalen Schienen **48** in horizontaler Richtung verfahrbar, wie dies ebenfalls durch Doppelpfeile angeordnet ist. Die Tragzylinder **50** tragen jeweils eine Tragplatte **52**, die teleskopisch relativ zu den Tragzylindern **50** in vertikaler Richtung verfahrbar sind. Außerdem können die Tragplatten **52** um eine vertikale Achse, die mit der Längsachse der Tragzylinder **50** zusammenfällt, gedreht werden, wie dies ebenfalls durch Pfeile angedeutet ist.

**[0069]** Jeder Tragplatte **52** trägt mindestens zwei individuell verstellbare Hydraulikaktuatoren **54** mit Stellstangen **56**, deren Länge individuell verstellt werden kann. An den Enden der Stellstangen **56**, die zu einem Tragzylinder **50** gehören, ist eine Halteplatte **58** gelenkig befestigt. Die Stellstange **56** können somit dazu verwendet werden, die Halteplatten **58** zu verkippen, wie dies ebenfalls durch Doppelpfeile in der [Fig. 4](#) angedeutet ist.

**[0070]** Der Roboter **44** verfügt somit über alle Freiheitsgrade, um ein zwischen den Halteplatten **58** verklemmtes Wirbelsäulenteil **60** in jeder beliebigen Lage, d. h. an jedem beliebigen Ort und in praktisch jeder beliebigen Orientierung, im Strahlengang des ersten Röntgengeräts **10'** anzuordnen.

**[0071]** Gesteuert werden Stellmotoren des Roboters **44**, von denen einer bei **61** angedeutet ist, und das Röntgengerät **10'** von einem Steuergerät **63**, das mit einem Datenspeicher **65** verbunden ist.

**[0072]** Die [Fig. 5](#) zeigt den Roboter **44** in einer anderen Stellung, in der sich das Wirbelsäulenteil **60** an einem anderen Ort und in einer anderen Orientierung im Strahlengang des ersten Röntgengeräts **10'** befindet.

**[0073]** Zum Aufbau der Datenbank wird das Wirbelsäulenteil **60**, bei dem es sich im dargestellten Ausführungsbeispiel um einen einzelnen Wirbel handelt, in alle Lagen überführt, die das Wirbelsäulenteil **60** im Strahlengang des ersten Röntgengeräts **10'** einnehmen kann. In jeder dieser Lagen wird ein Referenz-Röntgenbild vom Röntgengerät **10'** aufgenommen und zusammen mit den Lageinformationen abgespeichert. Das betreffende Referenz-Röntgenbild und die Lageinformation bilden dann einen Datensatz, der in der Datenbank abgelegt wird.

**[0074]** Die Lageinformationen können dabei durch Messung mit einem zusätzlichen Messgerät (nicht dargestellt) ermittelt werden. In der Regel wird der Roboter **44** jedoch für die Verstellung der Halteplatten **58** über Servomotoren verfügen, so dass der Roboter **44** selbst die abzuspeichernden Lageinformationen bereitstellt. In diesem Fall muss lediglich einmalig die Lage des Wirbelsäulenteils **60** relativ zu den Halteplatten **58** gemessen werden.

**[0075]** Die [Fig. 6](#) zeigt eine kleine Auswahl der Referenz-Röntgenbildern RB, die schließlich in der Datenbank enthalten sind. Hier wurde unterstellt, dass das nur schematisch angedeutete Wirbelsäulenteil **60** zwischen den einzelnen Aufnahmen nicht verkippt wurde, so dass die Orientierung des Wirbelsäulenteils **60** auf allen in der [Fig. 6](#) dargestellten Referenz-Röntgenaufnahmen RB identisch ist. Mit Hilfe des Roboters **44** verändert wurde lediglich der Ort, an dem das Wirbelsäulenteil **60** mit identischer Orientierung im Strahlengang des ersten Röntgengeräts **10'** angeordnet wurde. Die Datenbank enthält deswegen eine Vielzahl weiterer Gruppen von Datensätzen, bei denen die Referenz-Röntgenbilder RB ähnlich wie bei den in der [Fig. 6](#) gezeigten Gruppe aussehen, nur dass das Wirbelsäulenteil **60** um vorgegebene Winkel bezüglich unterschiedlicher Drehachsen verdreht angeordnet ist.

**[0076]** Da zur Angabe der Lage des Wirbelsäulenteils **60** insgesamt sechs Koordinaten erforderlich sind, nämlich drei Ortskoordinaten und drei Winkelkoordinaten, erhält man eine sechsdimensionale Matrix von Datensätzen, die jeweils ein Referenz-Röntgenbild und die dazugehörigen Lageinformationen enthalten. Bei einer Auflösung  $k$  pro Dimension sind somit  $k^6$  Datensätze erforderlich. Für  $k = 10$  müssen somit eine Million Datensätze abgespeichert werden. Falls es sich bei dem Wirbelsäulenteil **60** um einen einzelnen Wirbel handelt, so kann es aufgrund der unterschiedlichen Formen der Wirbel erforderlich sein, für jeden oder zumindest für mehrere Wirbel eine entsprechende Anzahl von Datensätzen zu erzeugen und abzuspeichern.

**[0077]** Um die abzuspeichernden Datenmengen zu reduzieren, werden bevorzugt nicht pixelbasierte Röntgenbilder, sondern lediglich vektorgraphikba-

sierte Kantenbilder des aufgenommenen Wirbelsäulenteils **60** gespeichert, wie dies die [Fig. 7](#) und [Fig. 8](#) illustrieren. Die [Fig. 7](#) zeigt schematisch ein von dem ersten Röntgengerät **10'** aufgenommenes Referenz-Röntgenbild RB des Wirbelsäulenteils **60**. Die gestrichelten Linien deuten die unscharfen Kanten des Wirbelsäulenteils **60** an. Durch an sich bekannte Kantedetektionsalgorithmen lässt sich aus dem in der [Fig. 7](#) gezeigten Referenz-Röntgenbild RB ein Kantenbild RB' erzeugen, wie es in der [Fig. 8](#) schematisch dargestellt ist. Die Kanten können mit vergleichsweise wenigen Informationen als Vektorgraphik gespeichert werden. Ein in der [Fig. 9](#) gezeigter vollständiger Datensatz enthält dann lediglich das vereinfachte Kantenbild RB' sowie die Lageinformation mit den drei Ortskoordinaten X, Y, Z und den drei Winkelkoordinaten WX, WY, WZ.

**[0078]** Kantenbilder RB' haben überdies den Vorzug, dass sich diese leichter interpolieren lassen. Damit kann die Auflösung  $k$  verringert werden, z. B. auf  $k = 5$ , so dass nur noch etwas mehr als 15.000 Datensätze pro Wirbel anfallen.

**[0079]** Anstatt mit dem Roboter **44** und dem ersten Röntgengerät **10'** reale Referenz-Röntgenbilder RB des Wirbelsäulenteils **60** aufzunehmen, könnten diese auch rechnerisch erzeugt werden, wenn dem Rechner die Form des Wirbelsäulenteils **60** vorgegeben wird. Der Rechner könnte dann auf der Grundlage der Gesetze der Strahlengeometrie rechnerisch Kantenbilder erzeugen, wie sie sich bei der Anordnung des Wirbelsäulenteils **60** im simulierten Strahlengang eines Röntgengeräts ergäben. Die für Röntgenaufnahmen typischen Schattierungen und sonstige Effekte, die durch die unterschiedlichen Absorptionskoeffizienten des Knochengewebes entstehen, lassen sich bei simulierten Referenz-Röntgenaufnahmen jedoch nur schwer nachbilden. Dadurch kann es zu Abweichungen zwischen simulierten Referenz-Röntgenbildern und realen Referenz-Röntgenbildern kommen, die letztlich zu Fehlern bei der Lagebestimmung führen.

**[0080]** Die [Fig. 10](#) zeigt einen Arbeitsplatz **50** mit einem Computer **52**, einem Festplattenspeicher **54** für die Datenbank, einer Tastatur **56** und zwei Bildschirmen **58**. In den Computer **52** wird ein Ziel-Röntgenbild ZB eingelesen, das mit dem zweiten Röntgengerät **10** von einem Abschnitt der Wirbelsäule WS des Patienten **30** aufgenommen wurde. Der behandelnde Arzt oder ein Assistent markiert nun auf dem auf einem der Bildschirme **58** dargestellten Ziel-Röntgenbild einen Bildausschnitt BA, auf dem ein einzelner Wirbel erkennbar ist. Der Computer **52** erzeugt aus diesem Bildausschnitt BA ein Kantenbild BA', wie es rechts in der [Fig. 11](#) schematisch dargestellt ist. Dieses Kantenbild **60** wird nun mit den in der Datenbank gespeicherten Kantenbildern RB' der Referenz-Röntgenbilder RB verglichen, wobei an sich be-

kannte Vergleichsalgorithmen zur Anwendung kommen. Der Computer **52** wählt nun aus den Referenz-Röntgenbildern RB (oder genauer aus den diesen zugeordneten Kantenbildern RB') ein Vergleichs-Röntgenbild VB (siehe [Fig. 6](#)) aus, das dem Kantenbildausschnitt BA' aus dem Ziel-Röntgenbild ZB am ähnlichsten ist. Dann werden aus dem Datensatz, der dem Vergleichs-Röntgenbild VB zugeordnet ist, die Lageinformationen ausgelesen, die bei der Erzeugung der Referenz-Röntgenbilder RB mit abgespeichert wurden. Diese in dem Datensatz, der dem Vergleichs-Röntgenbild VB zugeordnet ist, enthaltenen Lageinformationen werden nun dem Kantenbildausschnitt BA' **60** aus dem Ziel-Röntgenbild ZB zugeordnet.

**[0081]** In entsprechender Weise werden auch die anderen Wirbel auf dem Ziel-Röntgenbild ZB markiert und daraus Kantenbildausschnitte BA' erzeugt, die dann mit den Kantenbildern RB' der Referenz-Röntgenbildern RB verglichen werden. Auf diese Weise wird jeweils die Lage bestimmt, welche die auf den Kantenbildausschnitten BA' dargestellten Wirbel relativ zu dem zweiten Röntgengerät **10** hatten, das bei der Aufnahme des Ziel-Röntgenbildes ZB verwendet wurde.

**[0082]** Der Benutzer gibt in den Computer **52** mit Hilfe der Tastatur **56** oder einer anderen Eingabeeinrichtung ferner an, um welchen Wirbel der Wirbelsäule es sich handelt, falls für jeden Wirbel eigene Datensätze gespeichert sind.

**[0083]** Falls die Auflösung  $k$  gering ist, können auch aus den Referenz-Röntgenbildern RB mehrere Vergleichs-Röntgenbilder VB ausgewählt werden, deren Kantenbilder mit dem Kantenbildausschnitt BA' aus dem Ziel-Röntgenbild ZB am ähnlichsten sind. Die Lage des Wirbels, der auf dem Kantenbild **60** abgebildet ist, wird dann durch Interpolation aus den Lageinformationen abgeleitet, die in den Datensätzen enthalten sind, denen die Vergleichs-Röntgenbilder VB zugeordnet sind.

**[0084]** Bei dem vorstehend beschriebenen Ausführungsbeispiel werden die Lageinformationen mit Bezug auf den sog. axialen Strahl des Strahlenbündels angegeben, der von der Röntgenquelle **18** erzeugt wird. In den [Fig. 1](#) und [Fig. 4](#) ist die Richtung des axialen Strahls durch eine strichpunktierte Linie **24** angedeutet. Der axiale Strahl verläuft in der Regel durch die Mitte der durch die Blende **20** festgelegten Blendenöffnung und trifft senkrecht auf den Röntgendetektor **28** auf. Gleichzeitig stellt der axiale Strahl eine Symmetrieachse dar, bezüglich der ein von dem Röntgengerät erzeugtes Röntgenstrahlenbündel symmetrisch ist.

## b) Zweites Ausführungsbeispiel

**[0085]** Mit Hilfe des erfindungsgemäßen Verfahrens lässt sich nicht nur die Lage einzelner Wirbel, sondern auch ganzer Wirbelsäulenabschnitte bestimmen, in der sich der Wirbelsäulenabschnitt bei der Aufnahme eines zweidimensionalen Röntgenbildes relativ zum Röntgengerät befand.

**[0086]** Die [Fig. 12](#) und [Fig. 13](#) zeigen den Roboter **44**, wobei es sich bei dem zwischen den Halteplatten **58** eingespannten Wirbelsäulenteil nun nicht um einen einzelnen Wirbel, sondern um einen Wirbelsäulenabschnitt **70** mit mehreren Wirbeln handelt. Anders als ein einzelner Wirbel kann ein Wirbelsäulenabschnitt **70** unterschiedliche Stellungen einnehmen, die sich voneinander durch die Lage der einzelnen Wirbel relativ zueinander unterscheiden. So befindet sich bei den in den [Fig. 12](#) und [Fig. 13](#) gezeigten Stellungen des Wirbelsäulenabschnitts **70** der unterste, mit **72** bezeichnete Wirbel am gleichen Ort und ist auch in gleicher Weise orientiert. Die obere Halteplatte **58** befindet sich in den [Fig. 12](#) und [Fig. 13](#) jedoch in unterschiedlichen Positionen, wodurch der Wirbelsäulenabschnitt **70** unterschiedlich gekrümmt ist.

**[0087]** Für jede unterschiedliche Krümmung wird ein Referenz-Röntgenbild aufgenommen und mit den entsprechenden Lageinformationen in der Datenbank abgespeichert. Man erhält dann Referenz-Röntgenbilder **RB** oder daraus abgeleitete Kantenbilder **RB'**, wie sie in den [Fig. 14](#) und [Fig. 15](#) beispielhaft für zwei unterschiedliche Krümmungen des Wirbelsäulenabschnitts **70** gezeigt sind. Die Krümmungen der Wirbelsäulenabschnitte werden dabei durch Kippwinkel zwischen benachbarten Wirbeln angegeben. Zwischen jedem Paar sind Verkippungen um drei orthogonale Achsen möglich, wodurch ein Datensatz für einen Wirbelsäulenabschnitt **60** mit vier Wirbeln zwölf zusätzliche Koordinaten enthält, wie dies die [Fig. 16](#) illustriert. Sechs Koordinaten geben dabei die Lage eines der vier Wirbel an, z. B. des untersten Wirbels, und die relative Lage zum jeweiligen Nachbarwirbel wird jeweils durch sechs weitere Koordinaten angegeben.

**[0088]** Zusätzlich können die Datensätze Informationen darüber enthalten, welche Kräfte vom Roboter **44** überwunden werden mussten, um etwa zwischen den in den [Fig. 12](#) und [Fig. 13](#) gezeigten Stellungen des Wirbelsäulenabschnitts **70** zu wechseln. Diese Kräfte werden von den zwischen den Wirbeln angeordneten Bandscheiben **74** (siehe [Fig. 12](#)) des Wirbelsäulenabschnitts **70** erzeugt; handelt es sich bei dem Wirbelsäulenabschnitt **70** um ein anatomisches Präparat eines Körperspenders, bei dem auch noch der umgebende Bandapparat ganz oder zumindest teilweise erhalten ist, so trägt auch dieser zu den Kräften bei, die bei einem Stellungswechsel vom Roboter **44** überwunden werden müssen.

**[0089]** Um aus einem Ziel-Röntgenbild **ZB**, das an einem Wirbelsäulenabschnitt **70** aufgenommen wurde, die Lage und die relative Anordnung der Wirbel zueinander mit Hilfe der Datenbank zu bestimmen, wird das Ziel-Röntgenbild **ZB** oder ein Kantenbild **ZB'** davon mit den Referenz-Röntgenbildern **RB** oder Kantenbildern **RB'** hiervon verglichen. Das Referenz-Röntgenbild **RB** mit der größten Ähnlichkeit stellt auch hier das Vergleichs-Röntgenbild **VB** dar, dessen Lageinformationen Aufschluss darüber gibt, wie der Wirbelsäulenabschnitt **70** relativ zu dem Röntgengerät **10** angeordnet war, das für die Aufnahme des Ziel-Röntgenbildes **ZB** verwendet wurde.

**[0090]** Bei diesem Ausführungsbeispiel erhält der behandelnde Arzt unmittelbar die ihn besonders interessierenden Informationen über die relative Lage zwischen den Wirbeln, die den Wirbelsäulenabschnitt **70** bilden. Diese Informationen kann er insbesondere dazu verwenden, um die Abmessungen eines in einen Zwischenwirbelraum einzuführenden Implantats zu bestimmen oder diese Informationen an ein Computerprogramm zu übergeben, das ihn bei dieser Festlegung unterstützt.

## c) Weitere Einsatzmöglichkeiten

**[0091]** Die Erfindung kann vorteilhaft dazu benutzt werden, ein zweidimensionales Röntgenbild eines Wirbelsäulenteils aus einer gewünschten Perspektive aufzunehmen, ohne dass man sich durch eine Vielzahl von Versuchen an die Zielposition der Röntgenquelle annähern muss.

**[0092]** Die [Fig. 17](#) zeigt schematisch in einer Seitenansicht ein Röntgengerät **100**, wie es insbesondere für die Erstellung intraoperativer Röntgenaufnahmen verwendet wird. Das Röntgengerät **100** umfasst einen mehrfach verstellbaren C-Bogen **80** und einen Gerätewagen **82**, der mittels Rollen **84**, **86** auf dem Fußboden eines Operationssaals verfahrbar ist. Der Gerätewagen **82** nimmt eine Säule **88** auf, die senkrecht zum Fußboden angeordnet und in nicht näher dargestellter Weise höhenverstellbar ist, was in der [Fig. 17](#) durch einen Doppelpfeil **90** angedeutet ist. Eine Horizontalführung **92** ist über ein Pendellager **94** mit dem oberen Ende der Säule **88** verbunden. Das Pendellager **94** ermöglicht eine Drehung der Horizontalführung **92** um eine Pendelachse **96**. Eine Stirnseite der Horizontalführung **92** ist über ein Kipplager **98** mit einer Halterung **100** verbunden, die den C-Bogen **80** hält.

**[0093]** An einem Ende des C-Bogens **80** ist eine Röntgenquelle **102** und an dem anderen Ende ein Röntgendetektor **104** befestigt. Die Lage der Röntgenquelle **102** relativ zu dem Röntgendetektor **104** ist dabei nicht veränderbar, sondern fest durch die Geometrie des C-Bogens **80** vorgegeben.

**[0094]** Der C-Bogen **80** ist längs seines Umfangs beweglich an der Halterung **100** gelagert, was in der [Fig. 1](#) durch einen Doppelpfeil **106** angedeutet ist. Ferner kann der C-Bogen **80** mit Hilfe des Kipplagers **98** um eine Kippachse **108** gekippt werden, die senkrecht zur Pendelachse **96** verläuft. Bei dem dargestellten Ausführungsbeispiel ist die Pendelachse senkrecht zum Fußboden angeordnet, so dass die Kippachse **108** stets in einer Horizontalen liegt.

**[0095]** Mit dem C-Bogen **80** ist es möglich, einen Patienten **30** auch während einer Operation zu durchleuchten und auf diese Weise ein interoperatives Röntgenbild der Wirbelsäule des Patienten **30** zu gewinnen. Der C-Bogen **80** umgreift dabei einen Operationstisch **110**, auf dem der Patient **30** gelagert ist. Infolge der mehrfachen Verlagerbarkeit des C-Bogens **80** ist es möglich, von der Wirbelsäule des Patienten **30** zweidimensionale Röntgenbilder aus unterschiedlichen Perspektiven vorzunehmen.

**[0096]** Bei dem dargestellten Ausführungsbeispiel kann der C-Bogen **80** motorisch verstellt werden. Zu diesem Zweck weist das Röntgengerät **100** eine Vielzahl von Antrieben auf, die den unterschiedlichen Bewegungsachsen zugeordnet und in der [Fig. 17](#) nicht näher dargestellt sind. Eine Steuereinheit **112** zur Steuerung der Antriebe ist über eine drahtgebundene oder eine drahtlose Datenverbindung **115** mit einer Recheneinheit **114** verbunden. Ferner gehört zum Röntgengerät **100** eine Anzeigeeinrichtung **116** und eine Eingabeeinrichtung **118**, die mit der Recheneinheit **114** über Datenverbindungen kommunizieren können. Bei der Anzeigeeinrichtung **116** handelt es sich im einfachsten Falle um einen Bildschirm, in Betracht kommen jedoch auch Projektionsgeräte (Beamer) oder Head-up-Displays. Die Eingabeeinrichtung **118** weist bei dem in der [Fig. 17](#) dargestellten Ausführungsbeispiel eine Tastatur auf, jedoch kommen auch andere Eingabeeinrichtungen wie Mauspads, berührungsempfindliche Bildschirme oder sprachgesteuerte Eingabeeinrichtungen in Betracht.

**[0097]** Die Recheneinheit **114**, die Anzeigeeinrichtung **116** und die Eingabeeinrichtung **118** können Bestandteil eines an sich herkömmlichen Personalcomputers sein, wie dies in der [Fig. 17](#) dargestellt ist. In diesem Falle ist lediglich eine erfindungsgemäße Software auf dem Personalcomputer zu installieren. In vielen Fällen wird es jedoch notwendig sein, auf speziellere Hardware zurückzugreifen, die zum einen für einen Einsatz in Operationssälen optimiert ist und es zum anderen dem Arzt gestattet, von seinem Platz am Operationstisch **110** aus bequem die von der Anzeigeeinrichtung **116** dargestellten Inhalte zu erfassen und Eingaben über die Eingabeeinrichtung **118** tätigen zu können.

**[0098]** Im Folgenden wird die Funktion des Röntgengeräts **100** erläutert:

Zunächst legt der behandelnde Arzt fest, von welcher Perspektive aus er ein Röntgenbild von einem Wirbelsäulenabschnitt des Patienten **30** aufnehmen möchte. Diese Festlegung erfolgt unter Verwendung eines dreidimensionalen Bildes des betreffenden Abschnitts der Wirbelsäule. Bei diesem Bild muss es sich nicht unbedingt um ein dreidimensionales Bild der Wirbelsäule des Patienten **30** handeln. In Betracht kommt auch, ein computergeneriertes Modell oder eine Referenz-Wirbelsäule zu diesem Zweck zu verwenden. In einem nächsten Schritt wird ein vorläufiges zweidimensionales Röntgenbild des Wirbelsäulenabschnitts mit Hilfe des Röntgengeräts **100** aufgenommen. Vorzugsweise wird der C-Bogen vor der Aufnahme des vorläufigen Röntgenbildes in eine Ausgangsposition überführt, die nach der Erfahrung des behandelnden Arztes oder eines Röntgenassistenten bereits recht nahe an einer Position liegt, von der aus man die gewünschte Perspektive vermutlich erzielen kann.

**[0099]** Das vorläufige Röntgenbild wird nun als Ziel-Röntgenbild im Sinne der vorausgehenden Ausführungsbeispiele angesehen. Nach Durchführung der weiter oben beschriebenen Schritte erhält man die Lage des Wirbelsäulenabschnitts oder der einzelnen Wirbel relativ zu dem Röntgengerät **100**, als die vorläufige Röntgenaufnahme erstellt wurde.

**[0100]** Der Recheneinheit **114** ist nun genau bekannt, in welcher Lage sich der abgebildete Wirbelsäulenabschnitt relativ zum Röntgengerät **100** befindet. In Kenntnis der zuvor festgelegten Perspektive, von der ein Röntgenbild des Wirbelsäulenabschnitts aufgenommen werden soll, kann die Recheneinheit **114** nun eine Zielposition berechnen, welche die Röntgenquelle **102** einnehmen muss, damit der Wirbelsäulenabschnitt mit der gewünschten Perspektive durchleuchtet werden kann. Eine solche Berechnung ist deswegen leicht durchführbar, weil die festgelegte Perspektive letztlich nichts anderes darstellt als die Angabe des Wirbelsäulenabschnitts relativ zur Röntgenquelle **102** des Röntgengeräts **100**. Somit müssen lediglich zwei solche relativen Angaben miteinander verglichen werden.

**[0101]** Gemäß einem aus diesem Vergleich abgeleiteten Verfahrensweg wird die Röntgenquelle **102** nun an die berechnete Zielposition verfahren. Dann wird in einem letzten Schritt das endgültige zweidimensionale Röntgenbild des Wirbelsäulenabschnitts von der gewünschten Perspektive aus mit Hilfe des Röntgengeräts **100** aufgenommen.

#### 4. Wichtige Verfahrensschritte

**[0102]** Wichtige Schritte des erfindungsgemäßen Verfahrens sind in dem Flussdiagramm gemäß der [Fig. 10](#) zusammengefasst.

**[0103]** In einem ersten Schritt S1 wird eine Datenbank mit Bildinformationen zu einem zweidimensionalen Referenz-Röntgenbild eines Wirbelsäulenteils bereitgestellt. Die Referenz-Röntgenbilder der Datensätze unterscheiden sich dabei durch die Lage des Wirbelsäulenteils relativ zu einem ersten Röntgengerät, das bei der Aufnahme der Referenz-Röntgenbilder verwendet wurde. Gespeichert werden ferner Lageinformationen zu der Lage des mindestens einen Wirbelsäulenteils relativ zu dem ersten Röntgengerät während der Aufnahme des Referenz-Röntgenbildes.

**[0104]** In einem zweiten Schritt S2 wird ein zweidimensionales Ziel-Röntgenbild von einem Wirbelsäulenabschnitt des Patienten unter Verwendung eines zweiten Röntgengeräts aufgenommen, das von dem ersten Röntgengerät verschieden sein kann.

**[0105]** In einem dritten Schritt S3 wird das in Schritt S2 aufgenommene Ziel-Röntgenbild oder einem Teil davon mit den in den in der Datenbank gespeicherten Bildinformationen zu den Referenz-Röntgenbildern verglichen.

**[0106]** In einem vierten Schritt S4 wird schließlich auf der Grundlage von in Schritt S3 enthaltenen Ergebnissen ermittelt, in welcher Lage sich der Wirbelsäulenabschnitt während des Schritts S2 relativ zu dem zweiten Röntgengerät befand.

#### 4. Wichtige Aspekte der Erfindung

**[0107]** Wichtige Aspekte der vorliegenden Erfindung sind in den nachfolgenden Sätzen zusammengefasst:

1. Verfahren zur computergestützten Bestimmung der Lage eines auf einem Röntgenbild abgebildeten Abschnitts einer Wirbelsäule (WS) relativ zu einem Röntgengerät (10), das bei der Aufnahme des Röntgenbildes verwendet wurde, wobei das Verfahren die folgenden Schritte aufweist:

a) Bereitstellen einer Datenbank, in der mehrere Datensätze enthalten sind, wobei jeder Datensatz umfasst:

– Bildinformationen zu einem zweidimensionalen Referenz-Röntgenbild (RB, RB') eines Wirbelsäulenteils (60; 70), wobei sich die Referenz-Röntgenbilder (RB, RB') der Datensätze durch die Lage des Wirbelsäulenteils (60; 70) relativ zu einem ersten Röntgengerät (10') voneinander unterscheiden, das bei der Aufnahme der Referenz-Röntgenbilder (RB, RB') verwendet wurde, und

– Lageinformationen zu der Lage des mindestens einen Wirbelsäulenteils (60; 70) relativ zu dem ersten Röntgengerät (10') während der Aufnahme des Referenz-Röntgenbildes (RB, RB');

b) Aufnehmen eines zweidimensionalen Ziel-Röntgenbildes (ZB) von einem Wirbelsäulenab-

schnitt eines Patienten (30) unter Verwendung eines zweiten Röntgengeräts (10);

c) Vergleichen des in Schritt b) aufgenommenen Ziel-Röntgenbildes (ZB) oder Teilen (BA') davon mit den in der Datenbank gespeicherten Bildinformationen zu den Referenz-Röntgenbildern (RB; RB');

d) Ermitteln auf der Grundlage von in Schritt c) erhaltenen Ergebnissen, in welcher Lage sich der Wirbelsäulenabschnitt während des Schritts b) relativ zu dem zweiten Röntgengerät (10) befand.

2. Verfahren nach Satz 1, bei welchem in Schritt c) aus den Referenz-Röntgenbildern (RB, RB') mindestens ein Vergleichs-Röntgenbild (VB) ausgewählt wird, das dem Ziel-Röntgenbild (ZB) oder Teilen (BA') davon am ähnlichsten ist.

3. Verfahren nach Satz 2, bei dem die Lage des Wirbelsäulenabschnitts gemäß dem Schritt d) aus den Lageinformationen abgeleitet wird, die in dem Datensatz enthalten sind, dem das Vergleichs-Röntgenbild (VB) zugeordnet ist.

4. Verfahren nach Satz 2, bei dem aus den Referenz-Röntgenbildern (RB, RB') mehrere Vergleichs-Röntgenbilder (VB) ausgewählt werden, die dem Ziel-Röntgenbild (ZB) oder Teilen (BA') davon am ähnlichsten sind, und bei dem die Lage des Wirbelsäulenabschnitts gemäß dem Schritt d) durch Interpolation aus den Lageinformationen abgeleitet wird, die in den Datensätzen enthalten sind, denen die Vergleichs-Röntgenbilder zugeordnet sind.

5. Verfahren nach einem der vorhergehenden Sätze, bei dem die Lageinformationen Daten enthalten, wie weit das Wirbelsäulenteil von einer Symmetrieachse (24) entfernt ist, bezüglich der ein von dem Röntgengerät (10') erzeugtes Röntgenstrahlenbündel (22) symmetrisch ist.

6. Verfahren nach einem der vorhergehenden Sätze, bei dem das Wirbelsäulenteil (70) mehrere gelenkig miteinander verbundene Wirbel umfasst, und bei dem jeder Datensatz mehrere dem Datensatz zugeordnete Unterdatensätze umfasst, wobei jeder Unterdatensatz umfasst:

– Bildinformationen zu einem zweidimensionalen Referenz-Röntgenbild des Wirbelsäulenteils (70), wobei

– sich die Referenz-Röntgenbilder (RB; RB') der Unterdatensätze durch die relative Lage der Wirbel zueinander unterscheiden, als die Aufnahmen der Referenz-Röntgenbilder gemacht wurden, und wobei

– sich mindestens ein Wirbel auf den Referenz-Röntgenbildern aller einem übergeordneten Datensatz zugeordneten Unterdatensätze immer in der gleichen, durch den übergeordneten Datensatz vorgegebenen Lage relativ zu dem ersten Röntgengerät befindet,

– Lageinformationen zu der relativen Lage der Wirbel zueinander während der Aufnahme des betreffenden Referenz-Röntgenbildes.

7. Verfahren nach Satz 6, bei dem

– von dem Wirbelsäulenteil mindestens zwei Ziel-Röntgenbilder (ZB) gemacht werden, bei denen sich die Wirbel in unterschiedlichen relativen Lagen zueinander befinden,

– aus den Lageinformationen zu den relativen Lagen abgeleitet wird, wie sich die relative Lage der Wirbel zwischen der Aufnahme der mindestens zwei Ziel-Röntgenbilder (ZB) verändert hat.

8. Verfahren nach einem der vorhergehenden Sätze, bei dem zum Aufbau der Datenbank die folgenden Schritte durchgeführt werden:

a1) Bereitstellen eines Wirbelsäulenteils (**60; 70**), bei dem es sich um ein Modell oder um ein anatomisches Präparat eines Körperspenders handelt;

a2) Anordnen des Wirbelsäulenteils (**60; 70**) in unterschiedlichen Lagen in einem Strahlengang (**22**) des ersten Röntgengeräts (**10'**), wobei die Lagen bestimmt werden und in jeder Lage von dem ersten Röntgengerät (**10'**) ein Referenz-Röntgenbild (RB, RB') des Wirbelsäulenteils gemacht wird.

9. Verfahren nach Satz 8, bei dem in Schritt a2) ein Roboter (**44**) verwendet wird, der das Wirbelsäulenteil (**60; 70**) in den unterschiedlichen Lagen im Strahlengang des ersten Röntgengeräts (**10'**) anordnet.

10. Verfahren nach Satz 9, bei dem das Wirbelsäulenteil (**70**) mehrere gelenkig miteinander verbundene Wirbel umfasst, und bei dem in Schritt a2) der Roboter (**44**) ferner dazu verwendet wird, die Wirbel in unterschiedlichen relativen Lagen anzuordnen.

11. Verfahren nach Satz 9 oder 10, bei dem der Roboter (**44**) beim Anordnen der Wirbel in unterschiedlichen relativen Lagen Widerstandskräfte misst, die bei einer Veränderung der relativen Lage zwischen den Wirbeln überwunden werden müssen, wobei die Widerstandskräfte in der Datenbank gespeichert werden.

12. Verfahren nach einem der vorhergehenden Sätze, bei dem die in der Datenbank gespeicherten Bildinformationen pixelbasierte Bildinformationen oder vektorgraphikbasierte Bildinformationen sind.

13. Verfahren nach Satz 12, bei dem die Bildinformationen jeweils Kantenbilder (RB') der Wirbelsäulenteile umfassen.

14. Verfahren zum Aufnehmen eines zweidimensionalen Röntgenbildes eines Wirbelsäulenteils aus einer gewünschten Perspektive unter Verwendung des zweiten Röntgengeräts (**100**), das eine Röntgenquelle (**102**) und einen gemeinsam mit der Röntgenquelle verfahrbaren Röntgendetektor (**104**) aufweist, mit folgenden Schritten:

i) Festlegen einer Perspektive, von der aus ein zweidimensionales Röntgenbild des Wirbelsäulenteils aufgenommen werden soll, unter Verwendung eines dreidimensionalen Bildes;

ii) Aufnehmen eines vorläufigen zweidimensionalen Röntgenbildes des Wirbelsäulenteils mit Hil-

fe des zweiten Röntgengeräts (**100**), wobei sich die Röntgenquelle in einer Ausgangsposition befindet;

iii) Bestimmen der Lage des Wirbelsäulenteils relativ zu dem zweiten Röntgengerät (**100**) nach einem der vorhergehenden Sätze;

iv) Berechnen einer Zielposition, welche die Röntgenquelle (**102**) einnehmen muss, damit das Wirbelsäulenteil mit der in Schritt a) festgelegten Perspektive durchleuchtet werden kann, unter Berücksichtigung der in Schritt c) bestimmten Lage des Wirbelsäulenteils;

v) Verfahren der Röntgenquelle (**102**) an die in Schritt d) berechnete Zielposition;

vi) Aufnehmen eines endgültigen zweidimensionalen Röntgenbildes des Wirbelsäulenteils mit Hilfe des zweiten Röntgengeräts (**100**).

15. Verfahren nach Satz 14, bei dem das dreidimensionale Bild von einer Standard-Wirbelsäule aufgenommen oder auf der Grundlage eines Wirbelsäulen-Modells elektronisch erstellt wurde.

16. Computerprogramm zur Bestimmung der Lage eines auf einem Röntgenbild abgebildeten Abschnitts einer Wirbelsäule relativ zu einem Röntgengerät, das bei der Aufnahme des Röntgenbildes verwendet wurde, wobei das Computerprogramm dazu eingerichtet ist, einen Computer (**52**), auf dem das Computerprogramm abläuft, dazu zu veranlassen, die folgenden Schritte auszuführen:

a) Zugreifen auf eine Datenbank, in der mehrere Datensätze enthalten sind, wobei jeder Datensatz umfasst:

- Bildinformationen zu einem zweidimensionalen Referenz-Röntgenbild (RB, RB') eines Wirbelsäulenteils (**60; 70**), wobei sich die Referenz-Röntgenbilder der Datensätze durch die Lage des Wirbelsäulenteils relativ zu einem ersten Röntgengerät (**10'**) voneinander unterscheiden, das bei der Aufnahme der Referenz-Röntgenbilder verwendet wurde, und

- Lageinformationen zu der Lage des mindestens einen Wirbelsäulenteils relativ zu dem ersten Röntgengerät während der Aufnahme des Referenz-Röntgenbildes;

b) Einlesen eines zweidimensionalen Ziel-Röntgenbildes (ZB), das von einem Wirbelsäulenabschnitt (**60; 70**) eines Patienten (**30**) unter Verwendung eines zweiten Röntgengeräts (**10'**) aufgenommen wurde;

c) Vergleichen des in Schritt b) eingelesenen Ziel-Röntgenbildes oder Teilen davon mit den in der Datenbank gespeicherten Bildinformationen zu den Referenz-Röntgenbildern (RB, RB');

d) Ermitteln auf der Grundlage von in Schritt c) erhaltenen Ergebnissen, in welcher Lage sich der Wirbelsäulenabschnitt (**60; 70**) während des Schritts b) relativ zu dem zweiten Röntgengerät befand.

17. Computerprogrammprodukt mit einem Computerprogramm gemäß dem Satz 16.

18. Datenträger, auf dem das Computerprogramm gemäß dem Satz 16 gespeichert ist.

19. Computer, auf dem das Computerprogramm gemäß dem Satz 18 installiert ist.

20. Wirbelsäulensimulationsvorrichtung mit:

a) einem Röntgengerät (**10'**), das eine Röntgenquelle (**18**) und einen Röntgendetektor (**28**) umfasst, wobei die Röntgenquelle (**18**) dazu eingerichtet ist, Röntgenstrahlung (**22**) zu erzeugen, die sich entlang eines Strahlengangs zum Röntgendetektor (**28**) hin ausbreitet;

b) einem Manipulator (**44**), der umfasst:

– zwei Halterungen (**58**), die dazu eingerichtet sind, zwischen sich ein Wirbelsäulenteil (**60**; **70**) zu halten, bei dem es sich um ein Modell oder um ein einem Körperspender entnommenes anatomisches Präparat eines Wirbels oder eines Wirbelsäulenabschnitts handelt,

– Stellmotoren (**61**), die dazu eingerichtet sind, die Halterungen (**58**) derart zu verfahren, dass das Wirbelsäulenteil in unterschiedlichen Lagen relativ zu dem Röntgengerät (**10'**) angeordnet ist;

c) einem Steuergerät (**63**), das dazu eingerichtet ist, die Stellmotoren (**61**) des Manipulators (**44**) und das Röntgengerät (**10'**) derart zu steuern, dass der Manipulator (**44**) das Wirbelsäulenteil in unterschiedliche Lagen relativ zu dem Röntgengerät (**10'**) verfährt, wobei in jeder der unterschiedlichen Lagen ein Röntgenbild (RB, RB') von dem Wirbelsäulengerät (**10'**) aufgenommen wird und die jeweilige Lage in einem Datenspeicher (**65**) gespeichert wird.

21. Wirbelsäulensimulationsvorrichtung nach Satz 20, bei dem

– das Wirbelsäulenteil mehrere gelenkig miteinander verbundene Wirbel umfasst,

– der Manipulator (**44**) dazu eingerichtet ist, die Wirbel in unterschiedliche relative Lagen zu überführen, und bei dem

– das Steuergerät (**63**) dazu eingerichtet ist, die Stellmotoren (**61**) des Manipulators (**44**) und das Röntgengerät (**10'**) derart zu steuern, dass der Manipulator die Wirbel in unterschiedliche relative Lagen verfährt, wobei in jeder der unterschiedlichen relativen Lagen ein Röntgenbild von dem Wirbelsäulengerät aufgenommen wird und die jeweilige relative Lage in dem Datenspeicher (**65**) gespeichert wird.

22. Wirbelsäulensimulationsvorrichtung nach Satz 20 oder 21, bei dem der Manipulator (**44**) dazu eingerichtet ist, Kräfte zu messen, die bei einer Änderung der relativen Lage überwunden werden müssen.

**ZITATE ENTHALTEN IN DER BESCHREIBUNG**

*Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde automatisiert erzeugt und ist ausschließlich zur besseren Information des Lesers aufgenommen. Die Liste ist nicht Bestandteil der deutschen Patent- bzw. Gebrauchsmusteranmeldung. Das DPMA übernimmt keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.*

**Zitierte Patentliteratur**

- WO 2011/104028 [\[0002\]](#)
- DE 102008048739 A1 [\[0025\]](#)
- DE 102009051857 A1 [\[0028\]](#)

## Patentansprüche

1. Verfahren zur computergestützten Bestimmung der Lage eines auf einem Röntgenbild abgebildeten Abschnitts einer Wirbelsäule (WS) relativ zu einem Röntgengerät (10), das bei der Aufnahme des Röntgenbildes verwendet wurde, wobei das Verfahren die folgenden Schritte aufweist:

a) Bereitstellen einer Datenbank, in der mehrere Datensätze enthalten sind, wobei jeder Datensatz umfasst:

– Bildinformationen zu einem zweidimensionalen Referenz-Röntgenbild (RB, RB') eines Wirbelsäulenteils (60; 70), wobei sich die Referenz-Röntgenbilder (RB, RB') der Datensätze durch die Lage des Wirbelsäulenteils (60; 70) relativ zu einem ersten Röntgengerät (10') voneinander unterscheiden, das bei der Aufnahme der Referenz-Röntgenbilder (RB, RB') verwendet wurde, und

– Lageinformationen zu der Lage des mindestens einen Wirbelsäulenteils (60; 70) relativ zu dem ersten Röntgengerät (10') während der Aufnahme des Referenz-Röntgenbildes (RB, RB');

b) Aufnahmen eines zweidimensionalen Ziel-Röntgenbildes (ZB) von einem Wirbelsäulenabschnitt eines Patienten (30) unter Verwendung eines zweiten Röntgengeräts (10);

c) Vergleichen des in Schritt b) aufgenommenen Ziel-Röntgenbildes (ZB) oder Teilen (BA') davon mit den in der Datenbank gespeicherten Bildinformationen zu den Referenz-Röntgenbildern (RB; RB');

d) Ermitteln auf der Grundlage von in Schritt c) erhaltenen Ergebnissen, in welcher Lage sich der Wirbelsäulenabschnitt während des Schritts b) relativ zu dem zweiten Röntgengerät (10) befand.

2. Verfahren nach Anspruch 1, bei dem das Wirbelsäulenteil (70) mehrere gelenkig miteinander verbundene Wirbel umfasst, und bei dem jeder Datensatz mehrere dem Datensatz zugeordnete Unterdatensätze umfasst, wobei jeder Unterdatensatz umfasst:

– Bildinformationen zu einem zweidimensionalen Referenz-Röntgenbild des Wirbelsäulenteils (70), wobei sich die Referenz-Röntgenbilder (RB; RB') der Unterdatensätze durch die relative Lage der Wirbel zueinander unterscheiden, als die Aufnahmen der Referenz-Röntgenbilder gemacht wurden, und wobei

– sich mindestens ein Wirbel auf den Referenz-Röntgenbildern aller einem übergeordneten Datensatz zugeordneten Unterdatensätze immer in der gleichen, durch den übergeordneten Datensatz vorgegebenen Lage relativ zu dem ersten Röntgengerät befindet,

– Lageinformationen zu der relativen Lage der Wirbel zueinander während der Aufnahme des betreffenden Referenz-Röntgenbildes.

3. Verfahren nach Anspruch 2 bei dem

– von dem Wirbelsäulenteil mindestens zwei Ziel-Röntgenbilder (ZB) gemacht werden, bei denen sich

die Wirbel in unterschiedlichen relativen Lagen zueinander befinden,

– aus den Lageinformationen zu den relativen Lagen abgeleitet wird, wie sich die relative Lage der Wirbel zwischen der Aufnahme der mindestens zwei Ziel-Röntgenbilder (ZB) verändert hat.

4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem zum Aufbau der Datenbank die folgenden Schritte durchgeführt werden:

a1) Bereitstellen eines Wirbelsäulenteils (60; 70), bei dem es sich um ein Modell oder um ein anatomisches Präparat eines Körperspenders handelt;

a2) Anordnen des Wirbelsäulenteils (60; 70) in unterschiedlichen Lagen in einem Strahlengang (22) des ersten Röntgengeräts (10'), wobei die Lagen bestimmt werden und in jeder Lage von dem ersten Röntgengerät (10') ein Referenz-Röntgenbild (RB, RB') des Wirbelsäulenteils gemacht wird.

5. Verfahren nach Anspruch 4 bei dem in Schritt a2) ein Roboter (44) verwendet wird, der das Wirbelsäulenteil (60; 70) in den unterschiedlichen Lagen im Strahlengang des ersten Röntgengeräts (10') anordnet.

6. Verfahren nach Anspruch 5 bei dem das Wirbelsäulenteil (70) mehrere gelenkig miteinander verbundene Wirbel umfasst, und bei dem in Schritt a2) der Roboter (44) ferner dazu verwendet wird, die Wirbel in unterschiedlichen relativen Lagen anzuordnen.

7. Verfahren nach Anspruch 5 oder 6, bei dem der Roboter (44) beim Anordnen der Wirbel in unterschiedlichen relativen Lagen Widerstandskräfte misst, die bei einer Veränderung der relativen Lage zwischen den Wirbeln überwunden werden müssen, wobei die Widerstandskräfte in der Datenbank gespeichert werden.

8. Verfahren zum Aufnehmen eines zweidimensionalen Röntgenbildes eines Wirbelsäulenteils aus einer gewünschten Perspektive unter Verwendung des zweiten Röntgengeräts (100), das eine Röntgenquelle (102) und einen gemeinsam mit der Röntgenquelle verfahrbaren Röntgendetektor (104) aufweist, mit folgenden Schritten:

i) Festlegen einer Perspektive, von der aus ein zweidimensionales Röntgenbild des Wirbelsäulenteils aufgenommen werden soll, unter Verwendung eines dreidimensionalen Bildes;

ii) Aufnehmen eines vorläufigen zweidimensionalen Röntgenbildes des Wirbelsäulenteils mit Hilfe des zweiten Röntgengeräts (100), wobei sich die Röntgenquelle in einer Ausgangsposition befindet;

iii) Bestimmen der Lage des Wirbelsäulenteils relativ zu dem zweiten Röntgengerät (100) nach einem der vorhergehenden Ansprüche;

iv) Berechnen einer Zielposition, welche die Röntgenquelle (102) einnehmen muss, damit das Wirbelsäu-

lenteil mit der in Schritt a) festgelegten Perspektive durchleuchtet werden kann, unter Berücksichtigung der in Schritt c) bestimmten Lage des Wirbelsäulenteils;

v) Verfahren der Röntgenquelle (**102**) an die in Schritt d) berechnete Zielposition;

vi) Aufnahmen eines endgültigen zweidimensionalen Röntgenbildes des Wirbelsäulenteils mit Hilfe des zweiten Röntgengeräts (**100**).

9. Verfahren nach Anspruch 8, bei dem das dreidimensionale Bild von einer Standard-Wirbelsäule aufgenommen oder auf der Grundlage eines Wirbelsäulen-Modells elektronisch erstellt wurde.

10. Computerprogramm zur Bestimmung der Lage eines auf einem Röntgenbild abgebildeten Abschnitts einer Wirbelsäule relativ zu einem Röntgengerät, das bei der Aufnahme des Röntgenbildes verwendet wurde, wobei das Computerprogramm dazu eingerichtet ist, einen Computer (**52**), auf dem das Computerprogramm abläuft, dazu zu veranlassen, die folgenden Schritte auszuführen:

a) Zugreifen auf eine Datenbank, in der mehrere Datensätze enthalten sind, wobei jeder Datensatz umfasst:

– Bildinformationen zu einem zweidimensionalen Referenz-Röntgenbild (RB, RB') eines Wirbelsäulenteils (**60; 70**), wobei sich die Referenz-Röntgenbilder der Datensätze durch die Lage des Wirbelsäulenteils relativ zu einem ersten Röntgengerät (**10'**) voneinander unterscheiden, das bei der Aufnahme der Referenz-Röntgenbilder verwendet wurde, und

– Lageinformationen zu der Lage des mindestens einen Wirbelsäulenteils relativ zu dem ersten Röntgengerät während der Aufnahme des Referenz-Röntgenbildes;

b) Einlesen eines zweidimensionalen Ziel-Röntgenbildes (ZB), das von einem Wirbelsäulenabschnitt (**60; 70**) eines Patienten (**30**) unter Verwendung eines zweiten Röntgengeräts (**10'**) aufgenommen wurde;

c) Vergleichen des in Schritt b) eingelesenen Ziel-Röntgenbildes oder Teilen davon mit den in der Datenbank gespeicherten Bildinformationen zu den Referenz-Röntgenbildern (RB, RB');

d) Ermitteln auf der Grundlage von in Schritt c) erhaltenen Ergebnissen, in welcher Lage sich der Wirbelsäulenabschnitt (**60; 70**) während des Schritts b) relativ zu dem zweiten Röntgengerät befand.

11. Wirbelsäulensimulationsvorrichtung mit:

a) einem Röntgengerät (**10'**), das eine Röntgenquelle (**18**) und einen Röntgendetektor (**28**) umfasst, wobei die Röntgenquelle (**18**) dazu eingerichtet ist, Röntgenstrahlung (**22**) zu erzeugen, die sich entlang eines Strahlengangs zum Röntgendetektor (**28**) hin ausbreitet;

b) einem Manipulator (**44**), der umfasst:

– zwei Halterungen (**58**), die dazu eingerichtet sind, zwischen sich ein Wirbelsäulenteil (**60; 70**) zu halten,

bei dem es sich um ein Modell oder um ein einem Körperspender entnommenes anatomisches Präparat eines Wirbels oder eines Wirbelsäulenabschnitts handelt,

– Stellmotoren (**61**), die dazu eingerichtet sind, die Halterungen (**58**) derart zu verfahren, dass das Wirbelsäulenteil in unterschiedlichen Lagen relativ zu dem Röntgengerät (**10'**) angeordnet ist;

c) einem Steuergerät (**63**), das dazu eingerichtet ist, die Stellmotoren (**61**) des Manipulators (**44**) und das Röntgengerät (**10'**) derart zu steuern, dass der Manipulator (**44**) das Wirbelsäulenteil in unterschiedliche Lagen relativ zu dem Röntgengerät (**10'**) verfährt, wobei in jeder der unterschiedlichen Lagen ein Röntgenbild (RB, RB') von dem Wirbelsäulengerät (**10'**) aufgenommen wird und die jeweilige Lage in einem Datenspeicher (**65**) gespeichert wird.

Es folgen 8 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

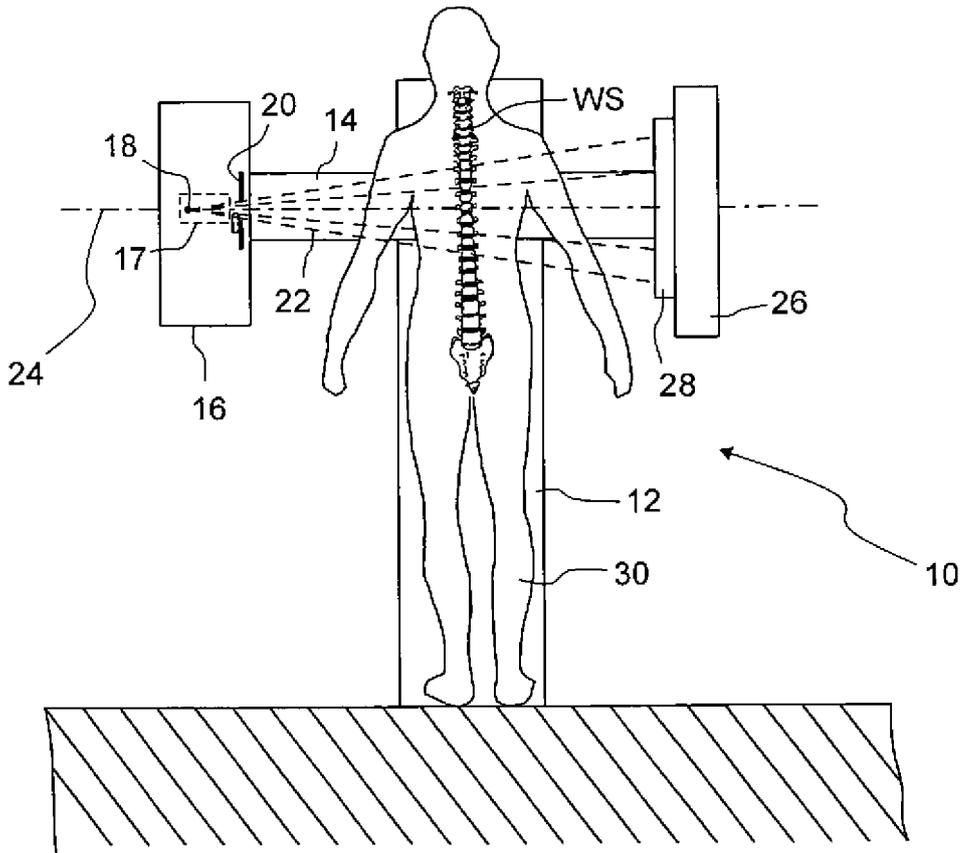


Fig. 1

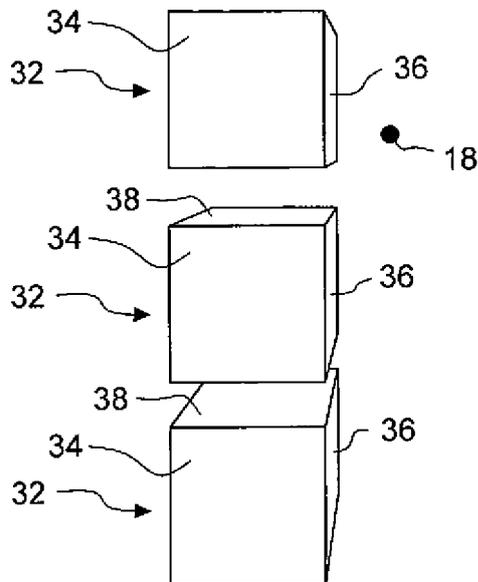


Fig. 2

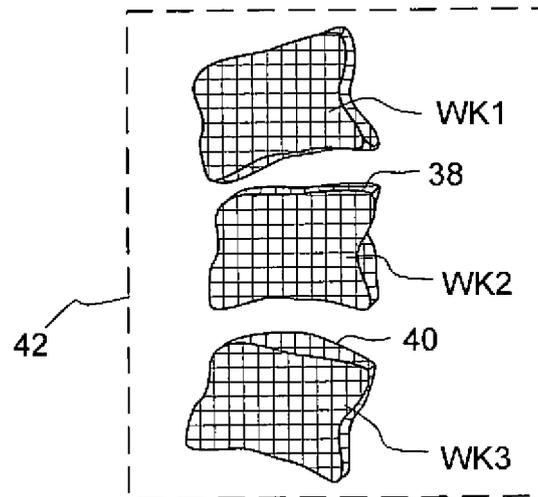


Fig. 3

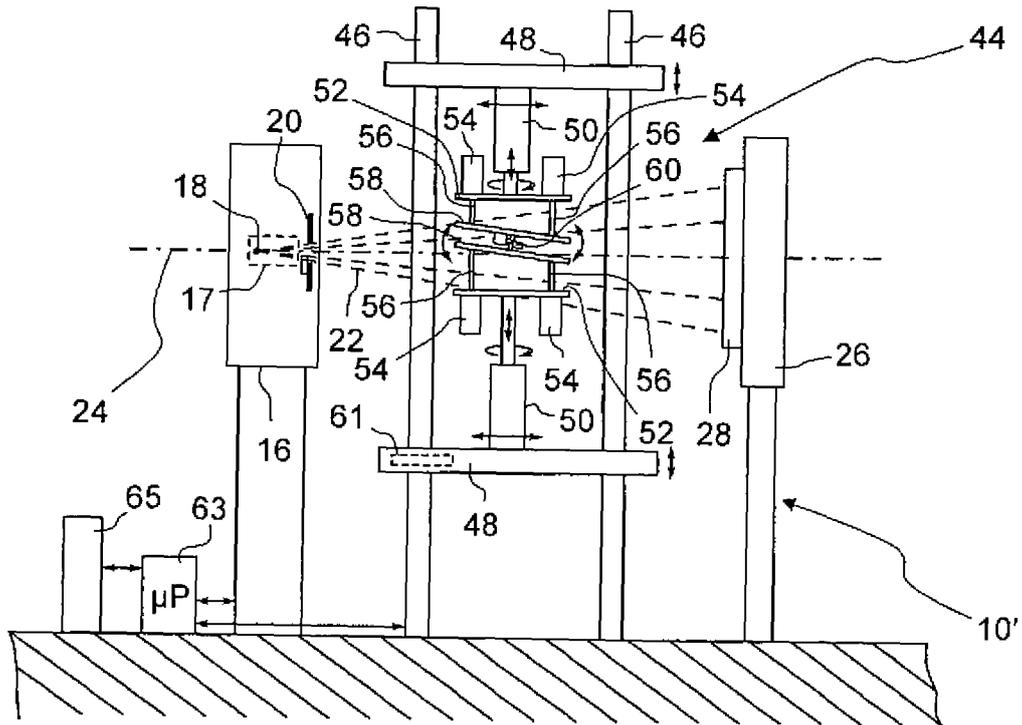


Fig. 4

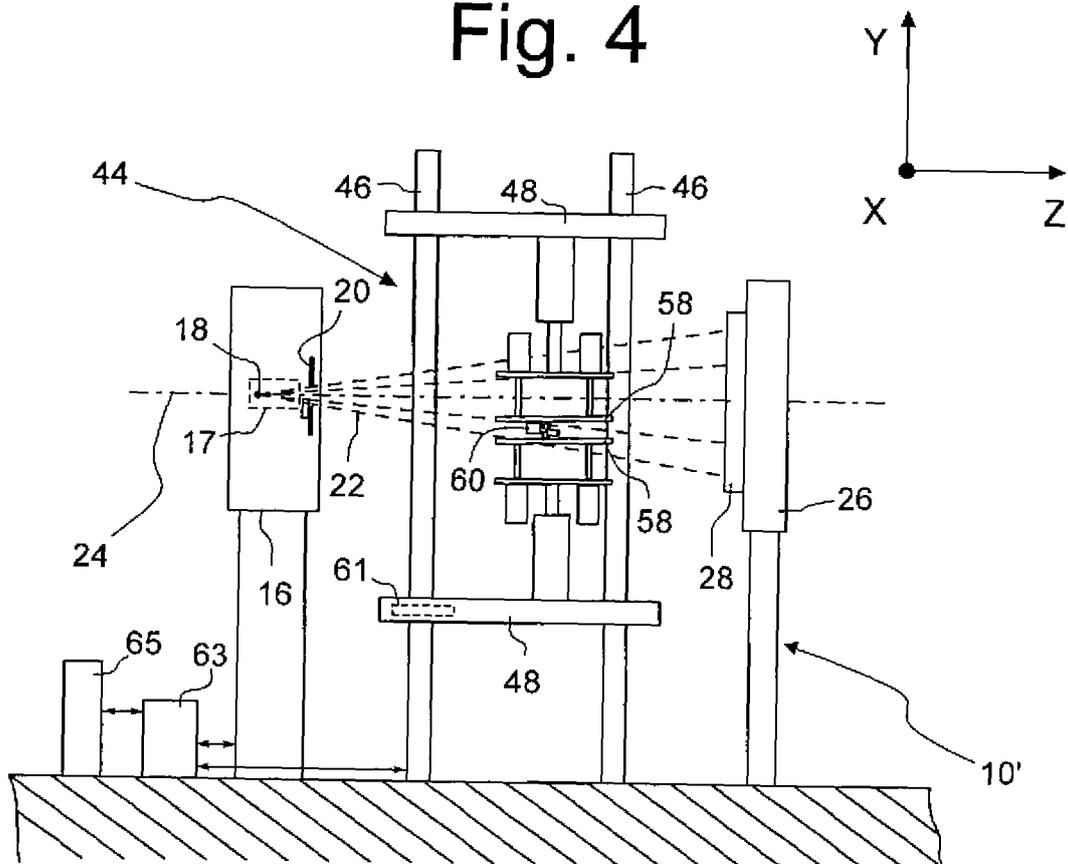


Fig. 5

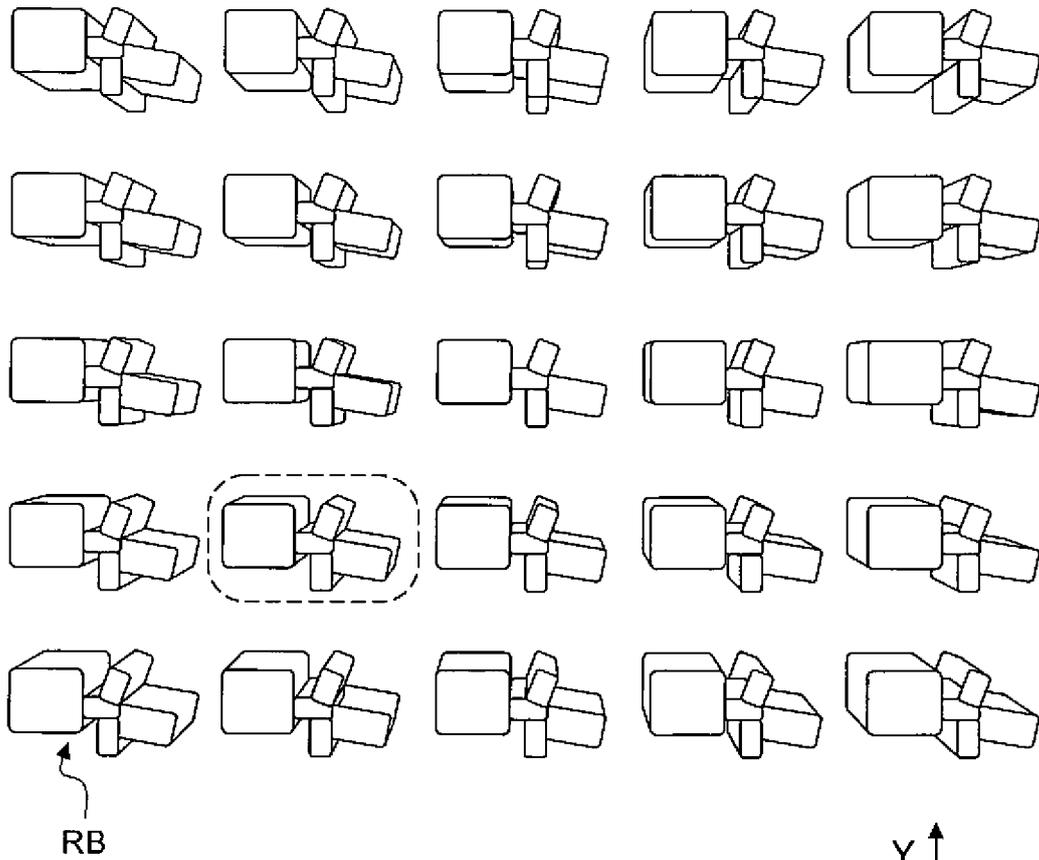


Fig. 6

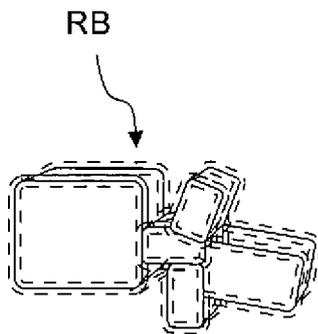
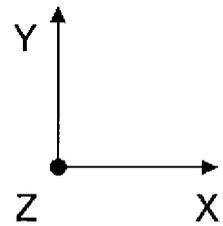


Fig. 7

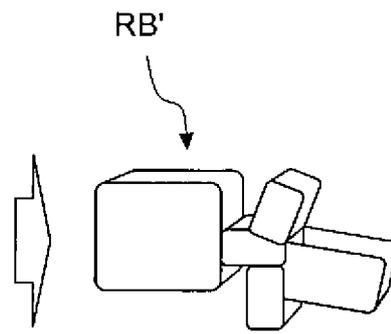


Fig. 8

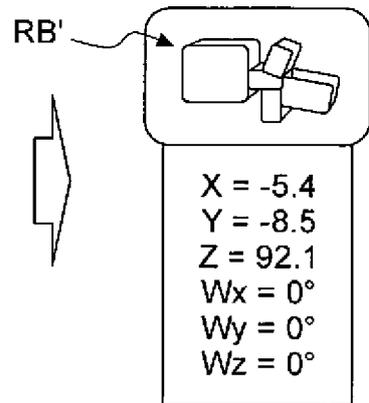


Fig. 9

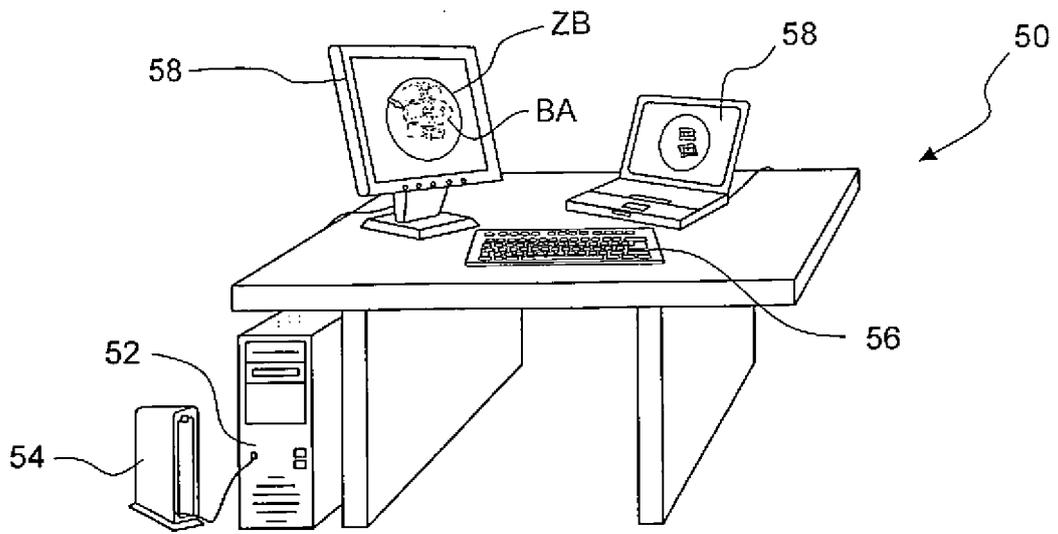


Fig. 10

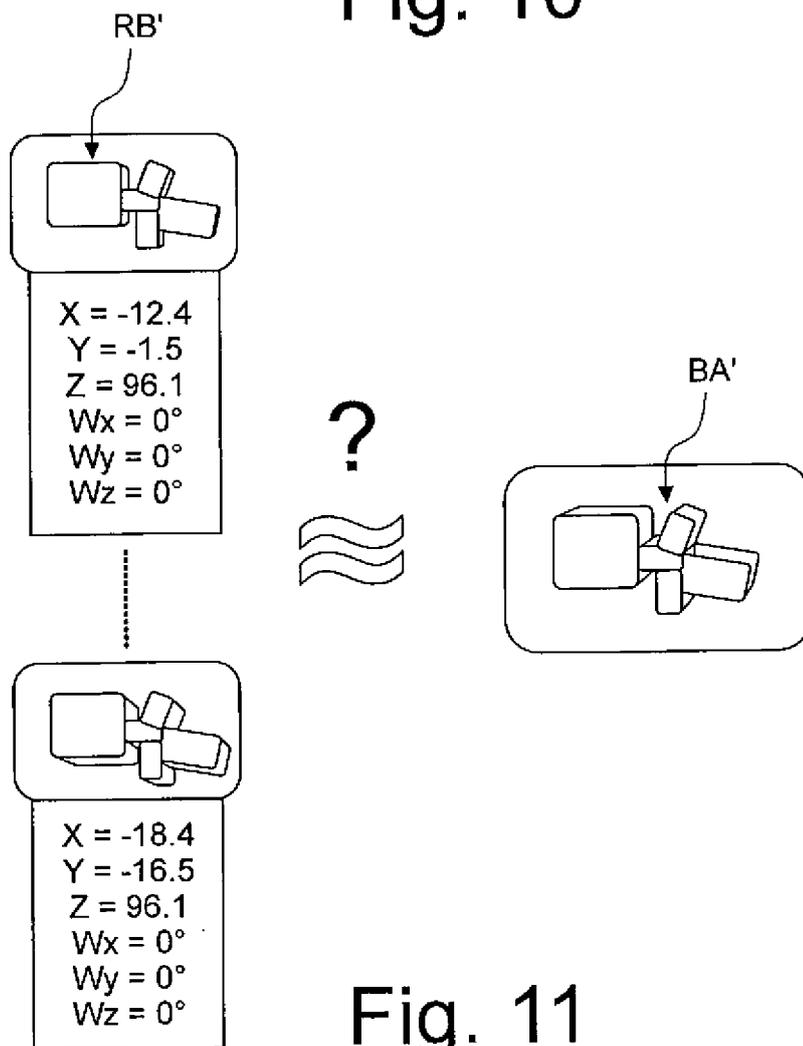


Fig. 11

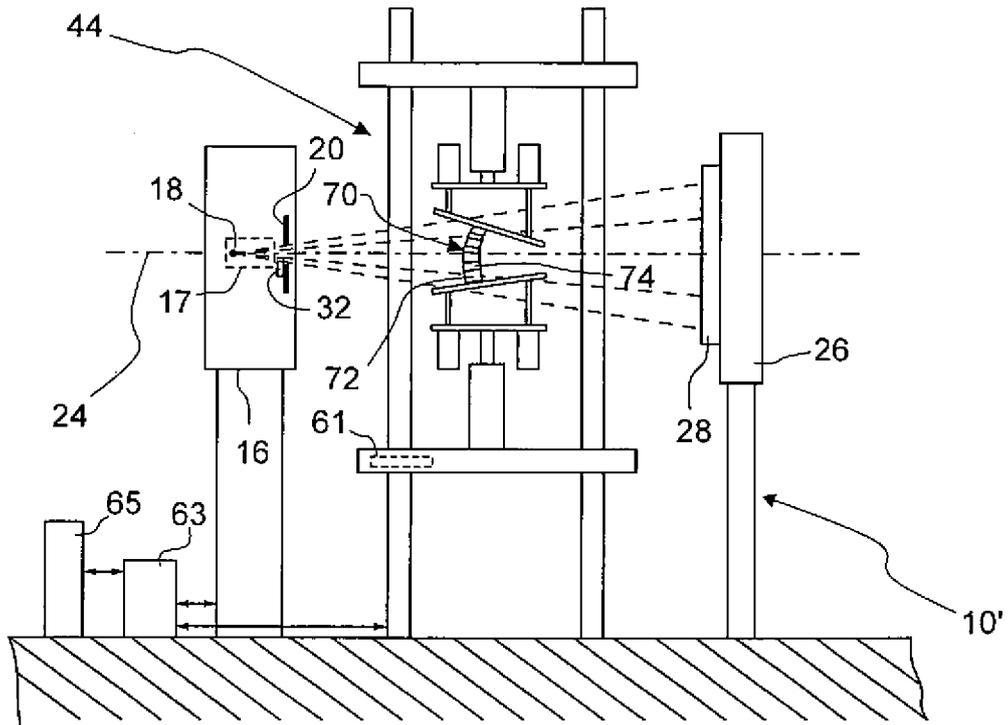


Fig. 12

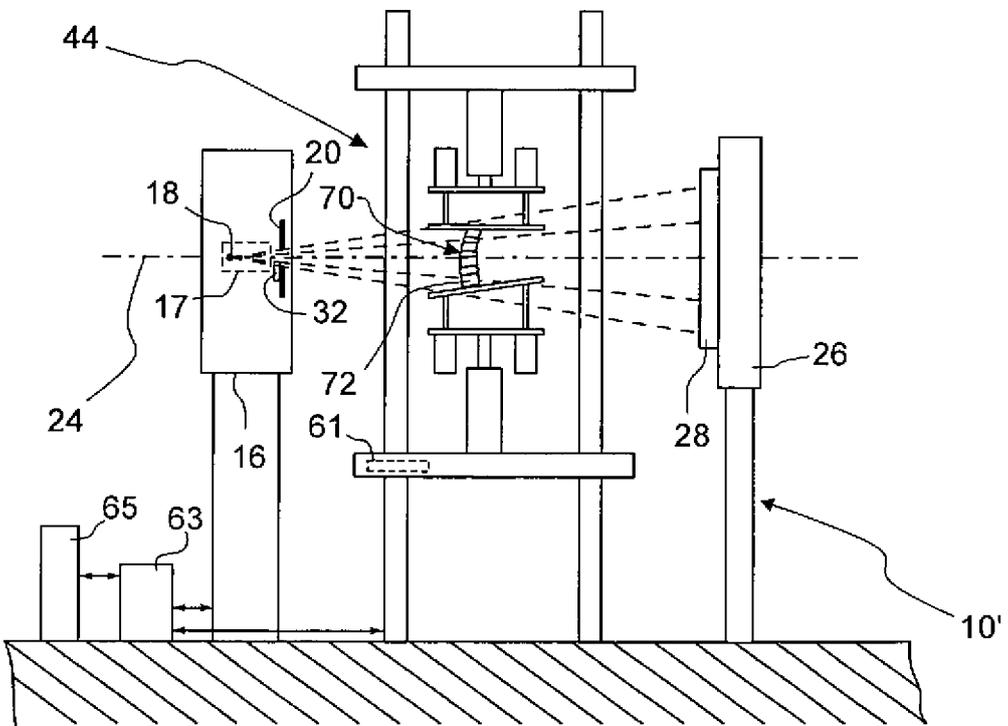


Fig. 13

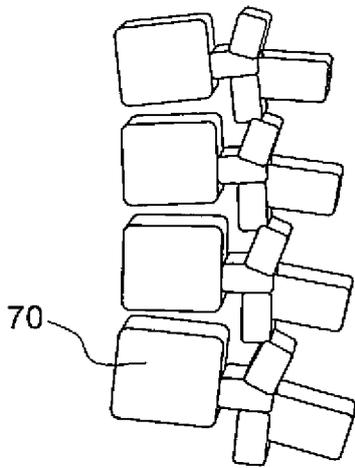


Fig. 14

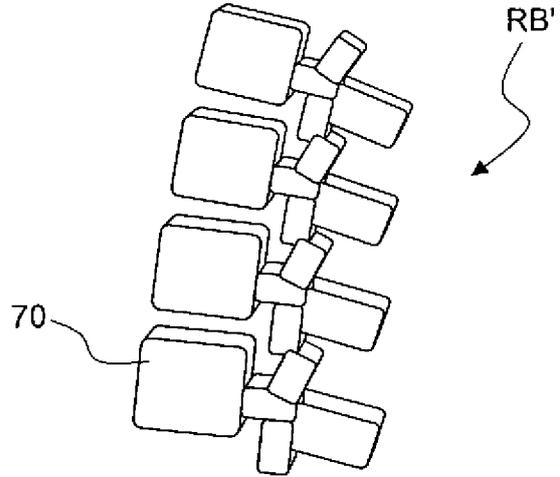


Fig. 15

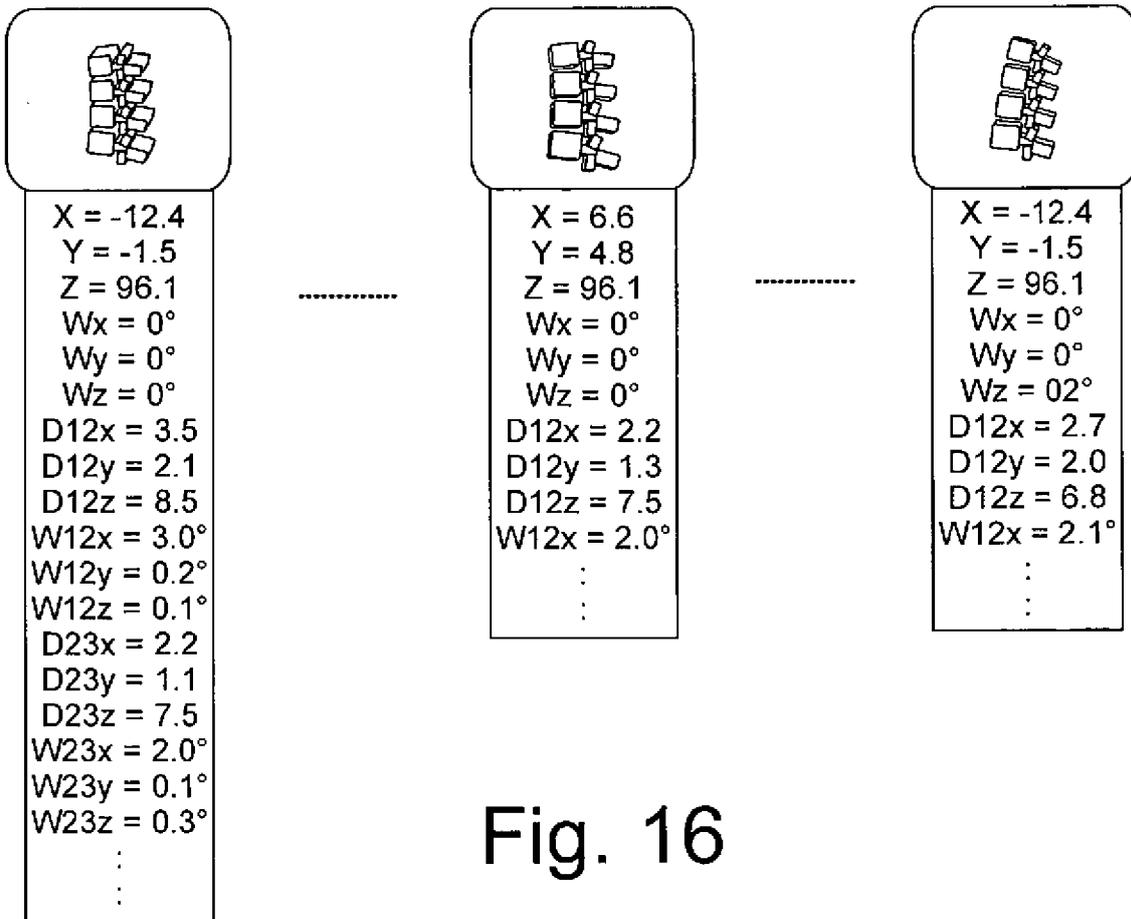


Fig. 16

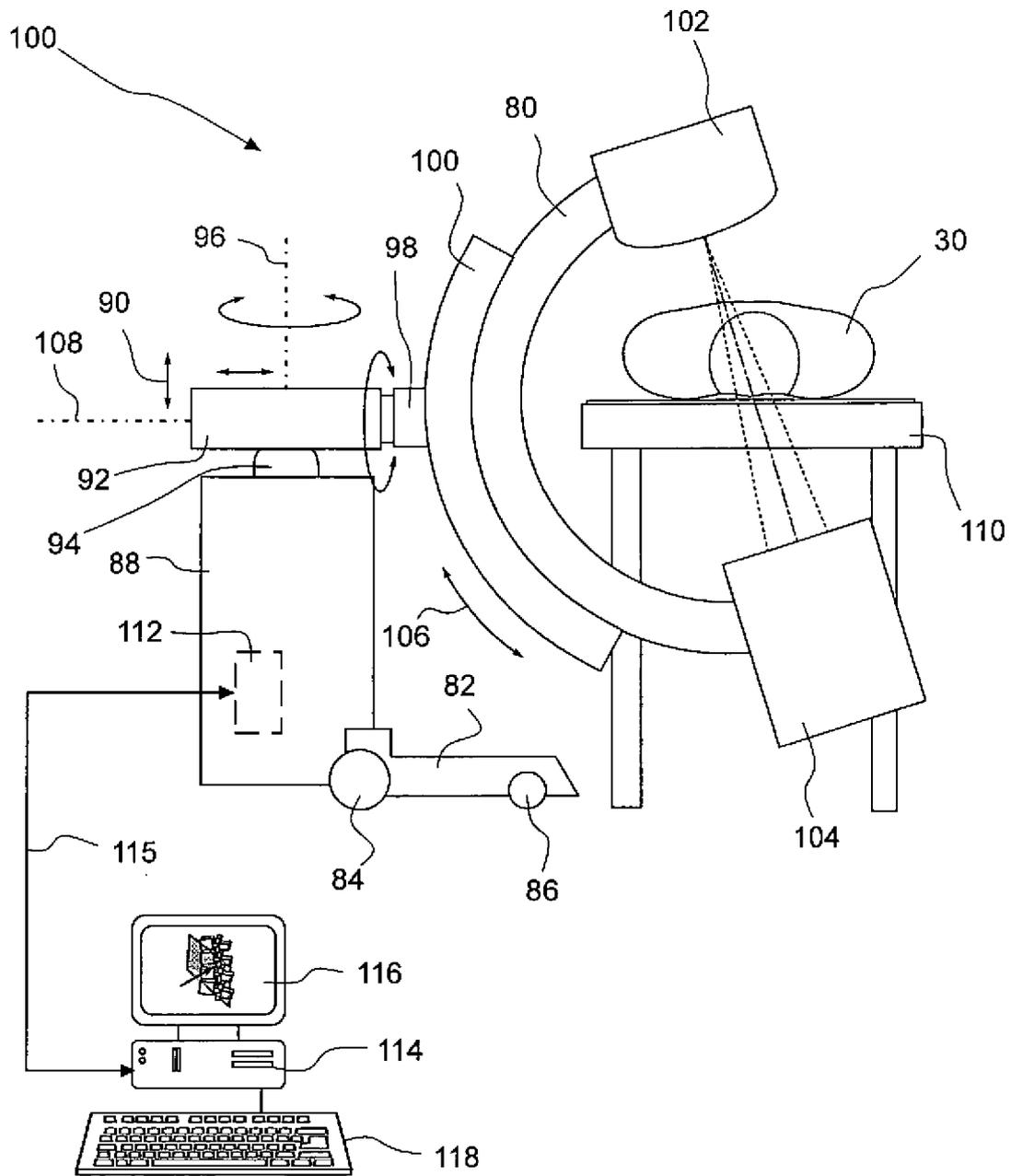


Fig. 17

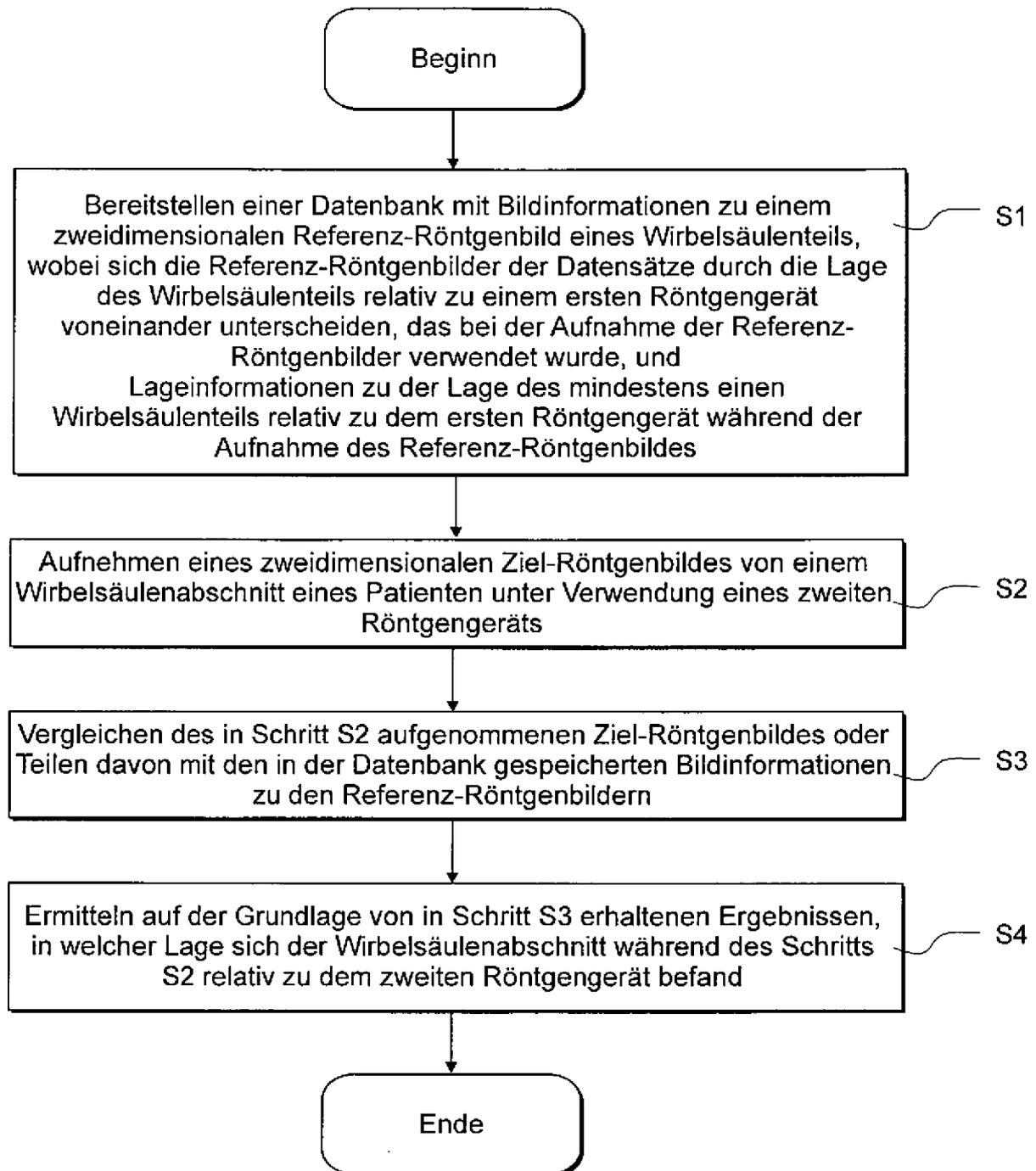


Fig. 18