(19) Bundesrepublik Deutschland
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 103 16 558 A1** 2004.11.18

(12) **Offenlegungsschrift**

(21) Aktenzeichen: **103 16 558.4**
(22) Anmeldetag: **10.04.2003**
(43) Offenlegungstag: **18.11.2004**

(51) Int Cl.[7]: **A61B 6/00**
A61B 5/103

(71) Anmelder:
Siemens AG, 80333 München, DE

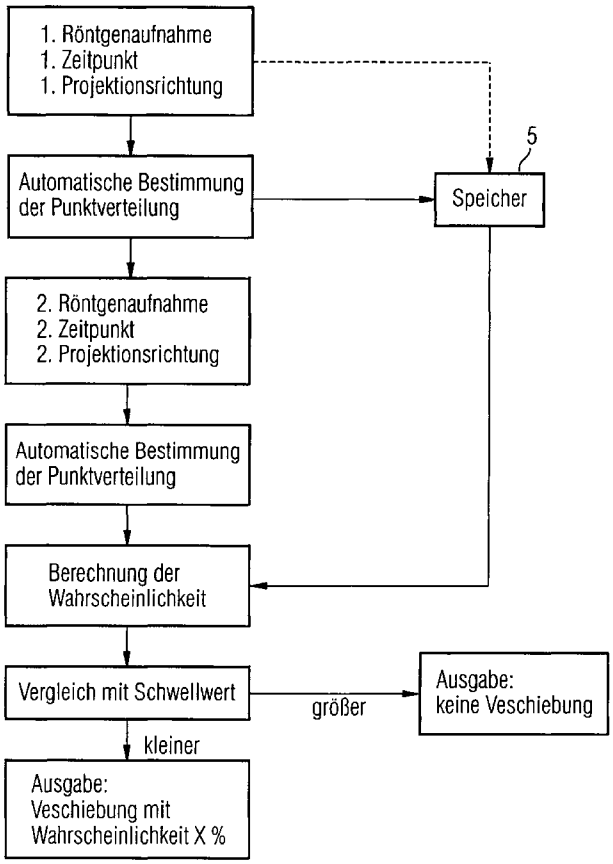
(72) Erfinder:
Georg, Christian, Dr., 35112 Fronhausen, DE; Hornegger, Joachim, Prof. Dr., 91096 Möhrendorf, DE; Klose, Klaus Jochen, Prof., 35112 Fronhausen, DE; Welker, Volkmar, Prof., 35274 Kirchhain, DE

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

(54) Bezeichnung: **Verfahren zur Detektion von Lageänderungen eines Implantates sowie Röntgenanlage zur Durchführung des Verfahrens**

(57) Zusammenfassung: Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren zur Detektion von Lageänderungen eines Implantates (1), bei dem mit Röntgenaufnahmen erfassbare Marker (2) in der Umgebung des Implantates (1) angeordnet sind und durch 2-D-Röntgenaufnahmen eines das Implantat (1) beinhaltenden Bereiches in zeitlichem Abstand zueinander eine Lageänderung des Implantates (1) anhand einer Verteilung der Marker (2) sowie markanter Punkte (2a) des Implantates (1) in jeder 2-D-Röntgenaufnahme überprüft wird, wobei eine erste (3) der 2-D-Röntgenaufnahmen zu einem ersten Zeitpunkt aus einer Projektionsrichtung und eine zweite der 2-D-Röntgenaufnahmen zu einem zweiten Zeitpunkt aus einer anderen Projektionsrichtung durchgeführt wird. Bei dem Verfahren wird die Verteilung der Marker (2) und markanten Punkte (2a) in der ersten und zweiten 2-D-Röntgenaufnahme (3, 4) von einer Auswerteeinrichtung (7) bestimmt und aus den Verteilungen ein Wahrscheinlichkeitsmaß berechnet, mit dem die Verteilung der ersten (3) und die Verteilung der zweiten 2-D-Röntgenaufnahme (4) Projektionen der gleichen dreidimensionalen Verteilung von Markern (2) und markanten Punkten (2a) sind. Das vorliegende Verfahren ermöglicht eine automatisierte Detektion von Lageänderungen von Implantaten bei verringerter Röntgenbelastung für den Patienten.



Beschreibung

[0001] Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren zur Detektion von Lageänderungen eines Implantates, bei dem mit Röntgenaufnahmen erfassbare Marker in der Umgebung des Implantates angeordnet sind und durch 2D-Röntgenaufnahmen eines das Implantat beinhaltenden Bereiches in zeitlichem Abstand zueinander eine Lageänderung des Implantates anhand einer Verteilung der Marker in jeder 2D-Röntgenaufnahme überprüft wird, wobei eine erste der 2D-Röntgenaufnahmen zu einem ersten Zeitpunkt aus einer Projektionsrichtung und eine zweite der 2D-Röntgenaufnahmen zu einem zweiten Zeitpunkt aus einer anderen Projektionsrichtung durchgeführt wird. Die Erfindung betrifft auch eine für die Durchführung des Verfahrens ausgestaltete Röntgenanlage.

Stand der Technik

[0002] Die Kontrolle der Veränderung der Lage von Implantaten, insbesondere der Lage von implantierten Prothesen stellt eine wichtige Nachsorgemaßnahme dar, um rechtzeitig Korrekturen vornehmen zu können und Komplikationen zu vermeiden. Gerade nach der Implantation künstlicher Gelenke kann sich durch Schwächen des verwendeten Materials die eingesetzte Prothese im Laufe der Zeit lockern. Um diese Lockerung zu erkennen, werden bei der Implantation zusätzlich zur Prothese kleine Metallkugeln in an die Prothese angrenzende Knochen platziert, die in Röntgenaufnahmen dieses Bereiches deutlich lokalisiert werden können. Eine Verschiebung des künstlichen Gelenks relativ zu den Knochen kann über diese als Marker dienenden Metallkugeln in der Röntgenaufnahme erkannt werden. Eine derartige Verschiebung ist ein Indikator für die Lockerung des künstlichen Gelenks.

[0003] Ein bisher bekanntes Verfahren zur Detektion der Lageänderung eines Implantates, wie es beispielsweise in Selvik, G., Roentgen stereophotogrammetry, Acta Orthopaedica Scandinavica Supplementum No. 232, Vol 60, 1989, Reprint from the original 1971 thesis, beschrieben ist, erfordert die Durchführung von zumindest 4 Röntgenaufnahmen mit einem Kalibriermuster, um entsprechende Lageänderungen erkennen zu können. Hierfür werden in regelmäßigen zeitlichen Abständen jeweils zwei 2D-Röntgenaufnahmen eines das Implantat beinhaltenden Bereiches zusammen mit dem Kalibriermuster aus zwei durch das Kalibriermuster vorgegebenen Projektionsrichtungen durchgeführt. In den hierdurch erhaltenen 2D-Röntgenaufnahmen jeder Untersuchung werden manuell sich in den Aufnahmen jeweils entsprechende Kugeln sowie markante Punkte des Implantates markiert. Mit Hilfe dieser Korrespondenzen, der Position der Kugeln und markanten Punkte in den 2D-Röntgenaufnahmen und der metrischen Daten des Kalibriermusters wird ein 3D-Modell der Kugeln im Knochen sowie der markanten Punkte des Implantates erstellt. Der Vergleich des auf diese Weise bei jeder Untersuchung berechneten 3D-Modells mit einem jeweils früher oder später berechneten 3D-Modell erlaubt die Entscheidung, ob eine Lageänderung des Implantates stattgefunden hat und welche Größe diese Lageänderung aufweist. Der Vergleich erfordert hierbei die konsistente Nummerierung der einzelnen Punkte bzw. Kugeln in den 2D-Röntgenaufnahmen. Das Verfahren ist jedoch langwierig und belastet den Patienten zudem mit der bei den Röntgenaufnahmen applizierten Röntgendosis.

Aufgabenstellung

[0004] Die Aufgabe der vorliegenden Erfindung besteht darin, ein Verfahren zur schnellen und automatischen Erkennung von Lageänderungen eines Implantates anzugeben, das den Patienten weniger stark belastet und sich zügig durchführen lässt.

[0005] Die Aufgabe wird mit dem Verfahren gemäß Patentanspruch 1 gelöst. Patentanspruch 7 gibt eine zur Durchführung des Verfahrens ausgebildete Röntgenanlage an. Vorteilhafte Ausgestaltungen des Verfahrens sind Gegenstand der Unteransprüche oder lassen sich aus der nachfolgenden Beschreibung sowie den Ausführungsbeispielen entnehmen.

[0006] Beim vorliegenden Verfahren zur Detektion von Lageänderungen eines Implantates, bei dem mit Röntgenaufnahmen erfassbare Marker in der Umgebung des Implantates angeordnet sind, werden durch 2D-Röntgenaufnahmen eines das Implantat beinhaltenden Bereiches in zeitlichem Abstand zueinander Lageänderungen des Implantates anhand einer Verteilung der Marker sowie markanter Punkte des Implantates in jeder 2D-Röntgenaufnahme überprüft. Hierfür wird zu einem ersten Zeitpunkt eine erste 2D-Röntgenaufnahme aus einer Projektionsrichtung und zu einem in zeitlichem Abstand liegenden zweiten Zeitpunkt eine zweite 2D-Röntgenaufnahme aus einer anderen Projektionsrichtung durchgeführt. In beiden Röntgenaufnahmen wird die Verteilung der Marker und markanten Punkte durch eine Auswerteeinrichtung, die Teil einer Datenverarbeitungsanlage sein kann, bestimmt und aus den Verteilungen ein Wahrscheinlichkeitsmaß berechnet, mit dem die Verteilung in der ersten 2D-Röntgenaufnahme und die Verteilung in der zweiten 2D-Röntgenaufnahme Projektionen der gleichen dreidimensionalen Verteilung von Markern und markanten Punkten sind. Die markanten Punkte können hierbei beispielsweise in das Implantat eingearbeitete, mit Röntgenaufnahmen erfassbare Marker oder durch die geometrische Form des Implantates vorgegebene Rand- oder Eckpunkte sein, die dem Implantat räumlich eindeutig zugeordnet werden können. Da auch die in der Umgebung

des Implantates angeordneten Marker beim vorliegenden Verfahren in den Röntgenaufnahmen im Wesentlichen als Punkte erscheinen und insbesondere als Punkte ausgewertet werden, wird nachfolgend nur noch auf Punkte sowie eine zwei- oder dreidimensionale Verteilung von Punkten Bezug genommen, die sowohl die Marker als auch die markanten Punkte des Implantates umfassen.

[0007] Bei dem vorliegenden Verfahren wird somit nicht bei jeder Untersuchung bzw. Messung ein dreidimensionales Modell der Punkte berechnet, um die Modelle dann miteinander zu vergleichen. Vielmehr kommt das vorliegende Verfahren mit nur einer Röntgenaufnahme bei jeder Untersuchung aus. Es wird lediglich die Wahrscheinlichkeit bzw. das Wahrscheinlichkeitsmaß berechnet, mit der bzw. dem zwei unterschiedliche Projektionen der Punkte, die aus den beiden zu unterschiedlichen Zeitpunkten aufgenommenen 2D-Röntgenaufnahmen als eine Verteilung der Punkte erhalten werden, Projektionen der gleichen dreidimensionalen Verteilung von Punkten sind. Auf Basis dieser Wahrscheinlichkeit lässt sich dann die Entscheidung darüber treffen, ob eine Lageänderung, insbesondere eine Verschiebung des Implantates zwischen den beiden Untersuchungen stattgefunden hat. Beide Röntgenaufnahmen müssen dabei aus unterschiedlichen Projektionsrichtungen aufgenommen werden, um eine dreidimensionale Lageänderung erfassen zu können. Es muss weder eine dreidimensionale Verteilung von Punkten berechnet werden noch wird ein Kalibriermuster für die mit dem vorliegenden Verfahren beabsichtigte Detektion der Lageänderungen benötigt.

[0008] Im Gegensatz zu dem bekannten Verfahren kommt das vorliegende Verfahren somit mit nur zwei Röntgenaufnahmen aus, so dass die applizierte Röntgendosis für den Patienten halbiert wird. Durch die automatische Bestimmung der Verteilung der Punkte durch die Auswerteeinrichtung und die darauf basierende Berechnung des Wahrscheinlichkeitsmaßes lässt sich das Verfahren sehr schnell und ohne Benutzereingriff durchführen.

[0009] In einer Ausgestaltung des vorliegenden Verfahrens wird ein Schwellwert des Wahrscheinlichkeitsmaßes vorgegeben, unterhalb dessen automatisch ein Hinweis auf eine Lageänderung erzeugt, bspw. an einem Monitor ausgegeben wird. Bei dieser Ausgestaltung lässt sich das vorliegende Verfahren vollständig automatisiert durchführen, so dass dem Benutzer lediglich noch das Ergebnis der Untersuchung durch die Auswerteeinrichtung mitgeteilt wird, ob eine Lageänderung des Implantates vorliegt oder nicht. Das Verfahren erleichtert somit die notwendigen Nachsorgeuntersuchungen und verringert den damit verbundenen Zeitaufwand für den Benutzer sowie die damit verbundenen Kosten erheblich.

[0010] Mit dem vorliegenden Verfahren lässt sich somit für den Benutzer automatisch die Entscheidung treffen, ob eine Lageänderung zwischen zwei Zeitpunkten bzw. Untersuchungen stattgefunden hat, indem zu jedem Zeitpunkt jeweils nur eine 2D-Röntgenaufnahme unter einer jeweils unterschiedlichen Blickrichtung durchgeführt wird. Eine Lageänderung wird dann angezeigt, wenn ein vom Benutzer einzustellender Schwellwert für das Wahrscheinlichkeitsmaß unterschritten wird. Die Korrespondenzen zwischen den einzelnen Punkten beider Röntgenaufnahmen werden dabei automatisch, evtl. mit manuellen Korrekturmöglichkeiten, bestimmt. Die absolute Verschiebung der Punkte im Dreidimensionalen wird dabei nicht gemessen. Das Verfahren beruht auf einem Algorithmus, der lediglich berechnet, ob zwei Punktemengen, die Verteilungen der Marker und markanten Punkte, im Zweidimensionalen die Projektion der selben 3D-Punktemenge darstellen. Das eingesetzte Projektionsmodell, perspektivische oder parallele Projektion, ist dabei im Algorithmus selbstverständlich zu berücksichtigen. Ein Beispiel für einen derartigen Algorithmus kann beispielsweise der Veröffentlichung von J. Hornegger, V. Welker, and H. Niemann, Localization and Classification Based on Projections, Pattern Recognition, 35:1225-1235, 2002 entnommen werden. Für die automatische Bestimmung der Verteilung der Punkte in den einzelnen Röntgenaufnahmen sowie die Bestimmung der Korrespondenzen wird ein digitales Bildverarbeitungsverfahren eingesetzt, wie es beispielsweise aus "Introductory Techniques for 3-D Computer Vision" by Emanuele Trucco, Alessandro Verri; Prentice Hall; 1st edition (March 6, 1998) bekannt ist.

[0011] Die Quantifizierung einer detektierten Lageänderung des Implantates lässt sich mit dem vorliegenden Verfahren nicht unmittelbar vornehmen. Sollte eine derartige quantitative Erfassung erforderlich sein, so stehen grundsätzlich zwei Möglichkeiten zur Verfügung, die zusätzliche Röntgen- oder andere bildgebende Aufnahmen des das Implantat beinhaltenden Bereiches erfordern. In einer Ausgestaltung werden dabei pro Untersuchung, d. h. jeweils in derselben Sitzung, mindestens zwei kalibrierte 2D-Röntgenaufnahmen aus unterschiedlichen Blickrichtungen durchgeführt, aus denen jeweils die 3D-Punktemengen rekonstruiert werden. Die Bestimmung der Verteilung der Punkte in den jeweiligen 2D-Röntgenaufnahmen wird dabei ebenfalls automatisch durch die Auswerteeinrichtung durchgeführt. Durch Vergleich der kalibrierten 3D-Punktemengen der zeitlich beabstandeten Untersuchungen lässt sich die Lageänderung quantitativ bestimmen. In einer weiteren Ausgestaltung kann zur Quantifizierung der Lageänderung auch ein 3D-Volumendatensatz des das Implantat beinhaltenden Bereiches herangezogen werden, der mit einem geeigneten 3D-Bildgebungsverfahren erhalten wurde. Dies kann bspw. über einen CT-Scan oder eine MR-Aufnahme erfolgen. Aus die-

sem 3D-Volumendatensatz kann dann die Verschiebung der markanten Punkte bzw. des Implantates zu den Markern im Dreidimensionalen quantitativ bestimmt werden.

[0012] Das vorliegende Verfahren eignet sich insbesondere zur Detektion von Lageänderungen einer Prothese, bei dem die Marker als Metallkugeln in einem an die Prothese angrenzenden Knochen platziert sind. Gerade die Verschiebung von Gelenkprothesen lässt sich damit sehr schnell und mit einer geringen Anzahl von Röntgenaufnahmen erkennen.

[0013] Die vorliegende Röntgenanlage zur Durchführung des Verfahrens umfasst neben den für die Aufnahme erforderlichen bekannten Bestandteilen eine Auswerteeinrichtung zur Bestimmung einer Verteilung von Markern und markanten Punkten in einer 2D-Röntgenaufnahme und zur Berechnung eines Wahrscheinlichkeitsmaßes, mit dem zwei Verteilungen aus zwei 2D-Röntgenaufnahmen Projektionen der gleichen dreidimensionalen Verteilung von Markern und markanten Punkten sind.

[0014] Das vorliegende Verfahren wird nachfolgend anhand eines Ausführungsbeispiels in Verbindung mit den Zeichnungen nochmals kurz erläutert. Hierbei zeigen:

[0015] **Fig.** 1 ein Beispiel für zwei aus unterschiedlichen Richtungen durchgeführte 2D-Röntgenaufnahmen mit einer Verteilung von Markern;

[0016] **Fig.** 2 schematisch einen Ablaufplan für die Durchführung des vorliegenden Verfahrens; und

[0017] **Fig.** 3 stark schematisiert Bestandteile der vorliegenden Röntgenanlage.

[0018] **Fig.** 1 zeigt beispielhaft zwei 2D-Röntgenaufnahmen eines ein Implantat, im vorliegenden Beispiel eine Gelenkprothese **1** am Kniegelenk, beinhaltenden Bereiches. Beide Röntgenaufnahmen wurden zu unterschiedlichen Zeitpunkten unter unterschiedlichen Richtungen, im vorliegenden Beispiel senkrecht zueinander, durchgeführt. In den Röntgenaufnahmen sind jeweils die beiden Bestandteile der Gelenkprothese **1** sowie die im Knochen platzierten Metallkugeln **2** zu erkennen, die als Marker eingesetzt werden. Aufgrund ihrer Platzierung im Knochen verändern diese Metallkugeln **2** ihre Lage im Laufe der Zeit nicht. Tritt allerdings eine Verschiebung der Gelenkprothese **1** ein, so ist diese Verschiebung durch eine veränderte Lage der Prothese **1** bzw. markanter Punkte **2a** der Prothese **1** relativ zu den im Röntgenbild sichtbaren Metallkugeln **2** zu erkennen.

[0019] Beim vorliegenden Verfahren wird die Verteilung der Metallkugeln **2** sowie markanten Punkte **2a** sowohl in der ersten Röntgenaufnahme **3** als auch in der zweiten Röntgenaufnahme **4** über ein Bildverarbeitungsverfahren automatisch bestimmt. Ein Verfahren zur automatischen Detektion von Ecken findet sich beispielsweise in Xintong Zhang, Dongming Zhao, A Parallel Algorithm for Detecting Dominant Points on Multiple Digital Curves, Pattern Recognition, Vol. 30, No. 2, pp. 239-244, 1997. Diese Bestimmung kann, wie im Ablaufschema der **Fig.** 2 zu erkennen, jeweils unmittelbar nach der Durchführung der jeweiligen Röntgenaufnahme erfolgen, wobei dann die Verteilung in einem Speicher abgelegt wird. Die automatische Bestimmung der Verteilung kann jedoch auch erst nach Durchführung der zweiten Röntgenaufnahme erfolgen, wobei dann die Bilddaten der ersten Röntgenaufnahme in einem Speicher abgelegt sein müssen.

[0020] Im vorliegenden Beispiel, bei dem die Röntgenaufnahmen von einem künstlichen Kniegelenk und den Markern im Knochen erstellt werden, liegt beispielsweise ein Zeitraum von einigen Wochen zwischen den beiden Röntgenaufnahmen **3** und **4**, die aus unterschiedlichen Projektionsrichtungen erstellt werden. Nach der automatischen Detektion der Verteilung der Metallkugeln **2** und markanten Punkte **2a** in den Röntgenaufnahmen **3**, **4** wird das Wahrscheinlichkeitsmaß berechnet, mit dem die den Metallkugeln **2** entsprechenden Punkte sowie die markanten Punkte **2a** in den beiden Aufnahmen Projektionen ein und derselben 3D-Punktemenge sind. Wird ein gewählter Schwellwert für das Wahrscheinlichkeitsmaß unterschritten, dann gilt eine Verschiebung der Prothese **1** als sehr wahrscheinlich. Durch die Auswerteeinrichtung wird in diesem Falle ein Hinweis auf eine derartige wahrscheinliche Verschiebung der Prothese **1** ausgegeben. Im anderen Fall kann ein Hinweis auf eine wahrscheinliche Lagekonstanz der Prothese **1** angezeigt werden.

[0021] **Fig.** 3 zeigt hierzu lediglich stark schematisiert die zusätzlich zu bekannten Röntgenanlagen **6** erforderliche Auswerteeinrichtung **7** für die Erkennung der Verteilung der Punkte (**2**, **2a**) in den 2D-Röntgenaufnahmen sowie die Berechnung des Wahrscheinlichkeitsmaßes und Ausgabe eines Berechnungsergebnisses an einem Monitor **8**. Die Auswerteeinrichtung **7** ist vorzugsweise Teil einer zur Röntgenanlage gehörigen Datenverarbeitungsanlage.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Detektion von Lageänderungen eines Implantates (**1**), bei dem mit Röntgenaufnahmen erfassbare Marker (**2**) in der Umgebung des Implantates (**1**) angeordnet sind und durch 2D-Röntgenaufnahmen eines das Implantat (**1**) beinhaltenden Bereiches in zeitlichem Abstand zueinander eine Lageänderung des Implantates (**1**) anhand einer Verteilung der Marker (**2**) sowie markanter Punkte (**2a**)

des Implantates (**1**) in jeder 2D-Röntgenaufnahme überprüft wird, wobei eine erste (**3**) der 2D-Röntgenaufnahmen zu einem ersten Zeitpunkt aus einer Projektionsrichtung und eine zweite (**4**) der 2D-Röntgenaufnahmen zu einem zweiten Zeitpunkt aus einer anderen Projektionsrichtung durchgeführt wird, dadurch gekennzeichnet, dass die Verteilung der Marker (**2**) und markanten Punkte (**2a**) in der ersten und zweiten 2D-Röntgenaufnahme (**3**, **4**) von einer Auswerteeinrichtung (**7**) bestimmt und ohne eine 3D-Rekonstruktion der räumlichen Lage der Marker (**2**) und markanten Punkte (**2a**) aus den Verteilungen ein Wahrscheinlichkeitsmaß berechnet wird, mit dem die Verteilung in der ersten (**3**) und die Verteilung in der zweiten 2D-Röntgenaufnahme (**4**) Projektionen der gleichen dreidimensionalen Verteilung von Markern (**2**) und markanten Punkten (**2a**) sind.

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass ein Schwellwert des Wahrscheinlichkeitsmaßes vorgegeben wird, unterhalb dessen automatisch ein Hinweis auf eine Lageänderung erzeugt wird.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass die Verteilung der Marker (**2**) und markanten Punkte (**2a**) unter Einsatz eines digitalen Bildverarbeitungsverfahrens bestimmt wird.

4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, dass für die Bestimmung einer Größe der Lageänderung zum ersten und zweiten Zeitpunkt jeweils zwei kalibrierte 2D-Röntgenaufnahmen des Bereiches aus unterschiedlichen Richtungen durchgeführt werden und aus den 2D-Röntgenaufnahmen jedes Zeitpunktes eine 3D-Verteilung der Marker (**2**) und markanten Punkte (**2a**) berechnet und mit der 3D-Verteilung des anderen Zeitpunktes verglichen wird.

5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4 zur Detektion von Lageänderungen einer Prothese (**1**), bei dem die Marker Metallkugeln (**2**) sind, die in einem an die Prothese (**1**) angrenzenden Knochen platziert sind.

6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, bei dem die markanten Punkte (**2a**) in das Implantat (**1**) eingearbeitete, mit Röntgenaufnahmen erfassbare Marker sind.

7. Röntgenanlage zur Durchführung des Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 6 mit einer Auswerteeinrichtung (**7**) zur Bestimmung einer Verteilung von Markern (**2**) sowie markanten Punkten (**2a**) eines Implantates (**1**) in einer 2D-Röntgenaufnahme (**3**, **4**) und zur Berechnung eines Wahrscheinlichkeitsmaßes, mit dem zwei Verteilungen aus zwei 2D-Röntgenaufnahmen (**4**) Projektionen der gleichen dreidimensionalen Verteilung von Markern (**2**) und markanten Punkten (**2a**) sind.

Es folgen 2 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

FIG 1

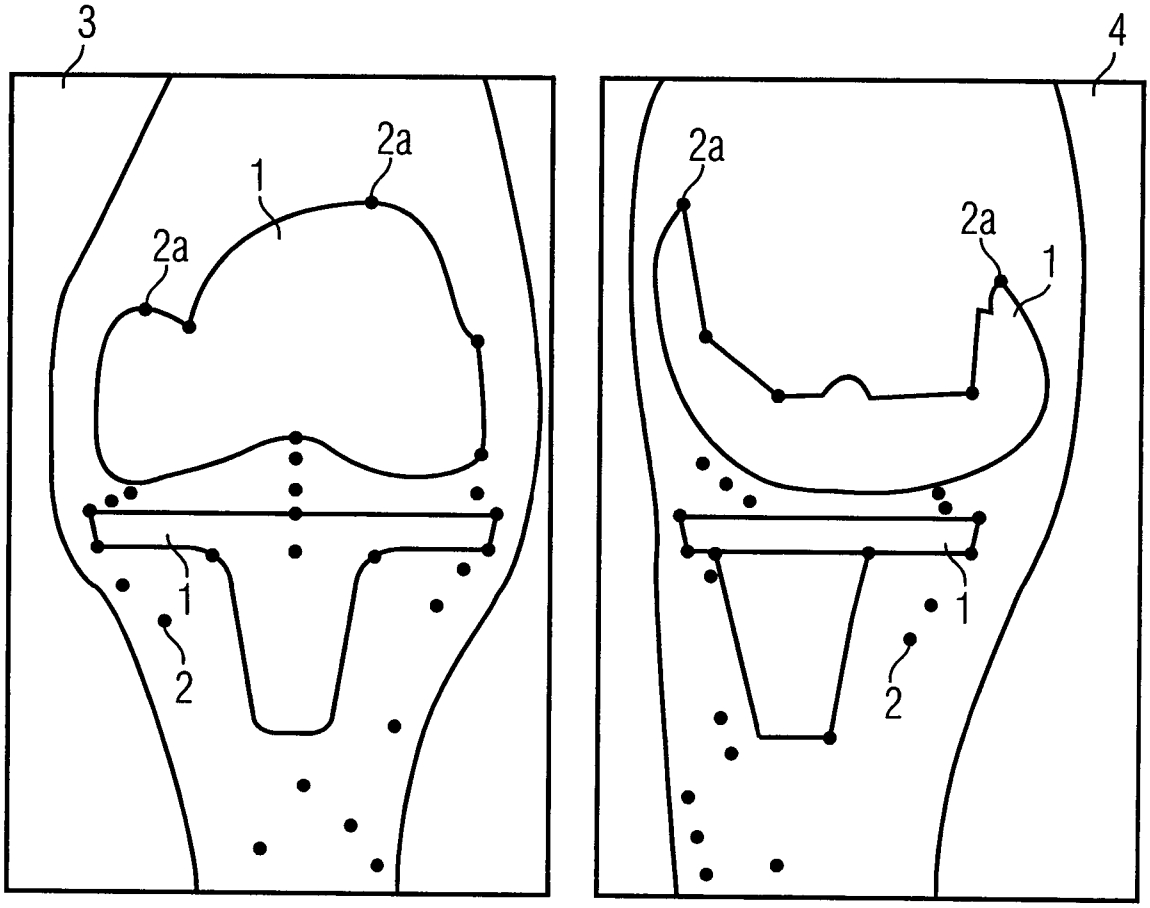


FIG 3

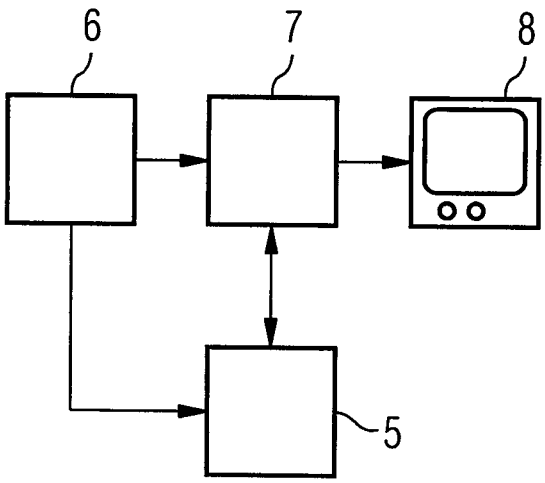
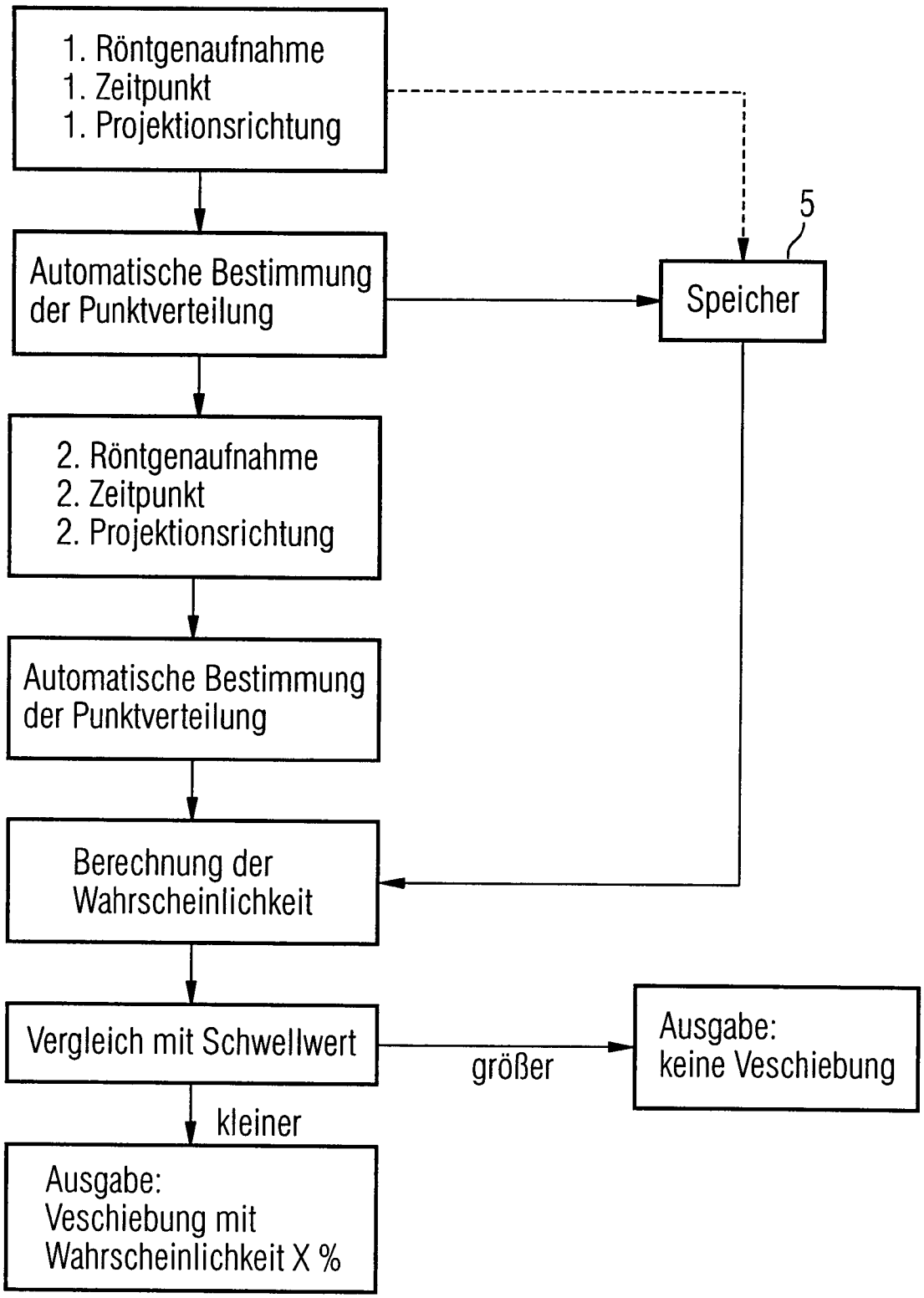


FIG 2


1. Röntgenaufnahme
1. Zeitpunkt
1. Projektionsrichtung
5
Automatische Bestimmung der Punktverteilung
Speicher
2. Röntgenaufnahme
2. Zeitpunkt
2. Projektionsrichtung
Automatische Bestimmung der Punktverteilung
Berechnung der Wahrscheinlichkeit
Vergleich mit Schwellwert
größer
Ausgabe: keine Veschiebung
kleiner
Ausgabe: Veschiebung mit Wahrscheinlichkeit X %