



(12)

Patentschrift

(21) Aktenzeichen: 10 2017 217 543.5
(22) Anmelddatum: 02.10.2017
(43) Offenlegungstag: 04.04.2019
(45) Veröffentlichungstag
der Patenterteilung: 09.01.2020

(51) Int Cl.: **A61B 6/03 (2006.01)**
A61B 6/00 (2006.01)
G06T 7/00 (2017.01)
G16H 50/20 (2018.01)
G06T 1/40 (2006.01)

Innerhalb von neun Monaten nach Veröffentlichung der Patenterteilung kann nach § 59 Patentgesetz gegen das Patent Einspruch erhoben werden. Der Einspruch ist schriftlich zu erklären und zu begründen. Innerhalb der Einspruchsfrist ist eine Einspruchsgebühr in Höhe von 200 Euro zu entrichten (§ 6 Patentkostengesetz in Verbindung mit der Anlage zu § 2 Abs. 1 Patentkostengesetz).

(73) Patentinhaber:
Siemens Healthcare GmbH, München, DE

(56) Ermittelter Stand der Technik:

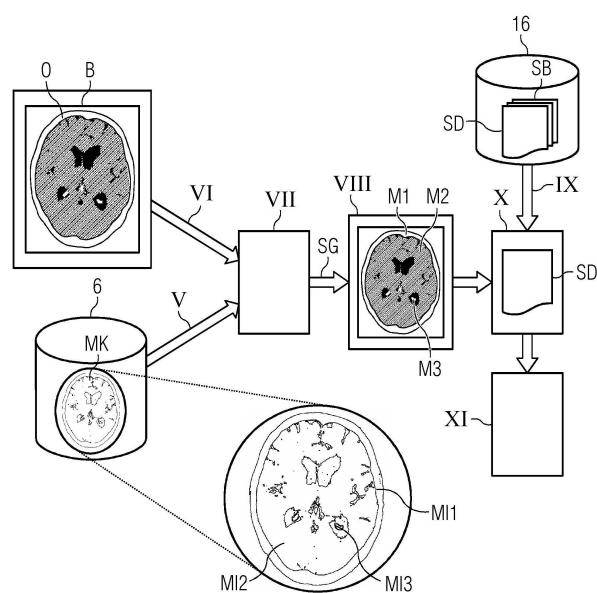
US 2011 / 0 188 715 A1
US 2016 / 0 123 904 A1

(72) Erfinder:
Flohr, Thomas, Dr., 91486 Uehlfeld, DE; Schmidt, Bernhard, Dr., 90766 Fürth, DE

(54) Bezeichnung: **Verfahren und System zur Klassifikation von Materialien mittels maschinellen Lernens**

(57) Hauptanspruch: Verfahren zum Erstellen einer Klassifizierungseinheit (6) zur automatischen Klassifizierung von Materialien (M1, M2, M3) in einer spektralen medizintechnischen Bildaufnahme (B) eines Objekts (O), umfassend die Schritte:

- Bereitstellung einer Lern-Rechenvorrichtung (7), wobei die Lern-Rechenvorrichtung (7) mittels eines Algorithmus dazu ausgestaltet ist, grafische Elemente in Bildaufnahmen zu erkennen,
- Bereitstellung einer Start-Klassifizierungseinheit (6a) auf oder an der Lern-Rechenvorrichtung (7), welche dazu ausgestaltet ist, mittels maschinellem Lernen trainiert zu werden,
- Bereitstellung eines Referenzauflnahmen-Satzes (RS) umfassend spektrale Referenzauflnahmen (RA) des Objekts (O), in denen die zu klassifizierenden Materialien (M1, M2, M3) annotiert sind,
- Trainieren der Klassifizierungseinheit (6) gemäß dem Prinzip des maschinellen Lernens, unter Verwendung der in den spektralen Referenzauflnahmen (RA) annotierten Materialien (M1, M2, M3).



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Erstellen einer Klassifikationseinheit zur automatischen Klassifikation von Materialien in einer spektralen medizinischen Bildaufnahme bzw. eine Klassifikationseinheit sowie eine Lern-Rechenvorrichtung hierzu. Des Weiteren umfasst die Erfindung ein Klassifikations-Verfahren zur automatischen Klassifikation von Materialien in einer spektralen medizinischen Bildaufnahme unter Nutzung einer solchen Klassifikationseinheit, eine Steuereinrichtung zur Steuerung eines medizintechnischen bildgebenden Systems sowie ein entsprechendes medizintechnisches bildgebendes System. Eine Bildaufnahme ist in dem Rahmen der Erfindung ein digitales Bild, umfasst also Bilddaten bzw. besteht diese aus Bilddaten.

[0002] Bei bildgebenden Verfahren in der Medizin ist man zur Erstellung eines jeden Bildpunktes einer Bildaufnahme zumeist auf die Auswertung einer einzelnen Messgröße bzw. eines einzigen physikalischen Messprinzips angewiesen. So erfasst z.B. die Computertomographie („CT“) als einzige Messgröße die lokale Röntgenschwächung des Patienten. Chemisch unterschiedliche Materialien, die z.B. aufgrund unterschiedlicher Konzentrationen die gleiche lokale Röntgenschwächung aufweisen, werden in einem CT-Bild mit dem gleichen CT-Wert (üblicherweise in Hounsfield-Einheiten HU) dargestellt und können daher im Bild nicht voneinander unterschieden werden.

[0003] Das ist in vielen CT-Anwendungen problematisch. Ein Beispiel ist die Trennung von Knochen und kontrastmittelgefüllten Gefäßen in CT-Angiographien. Das Jod im Blut kann die gleiche Röntgenabsorption wie der umgebende Knochen aufweisen, so dass Gefäße und Knochen insbesondere in komplizierten anatomischen Situationen, z.B. in der Schädelbasis, nur schwer voneinander getrennt und separat dargestellt werden können.

[0004] Ein weiteres Beispiel ist die genauere Charakterisierung von Nierensteinen. Kalziumhaltige Steine und harnsäurehaltige Steine können die gleiche Röntgenabsorption aufweisen. Sie sind daher im CT-Bild nicht zu unterscheiden, haben aber unterschiedliche Behandlungsoptionen. Ein weiteres Beispiel ist die Unterscheidung von Gichtkristallen von anderen Ablagerungen an den Gelenken.

[0005] Zur Klassifikation von unterschiedlichen Stoffen („Materialien“) im Gewebe wird zuweilen mit Strahlung in zwei oder mehreren Energiebereichen gearbeitet. Beispielsweise kann eine Aufnahme von CT-Bildern mit zwei oder mehr unterschiedlichen Röntgenenergien („Dual Energy CT“, „Spectral CT“) zur Unterscheidung verschiedener Materialien genutzt werden.

[0006] Die Röntgenabsorption von im Körper vorkommenden Materialien im Energiebereich der CT-typischen Röntgenstrahlung (30 - 150 keV) wird durch zwei physikalische Mechanismen bestimmt, den Photoelektrischen- und den Comptoneffekt. Diese Mechanismen weisen unterschiedliche Energieabhängigkeit auf und ihr relativer Anteil an der gesamten Röntgenabsorption hängt vom jeweiligen Material ab, genauer von dessen Ordnungszahl und dessen Dichte.

[0007] Wegen des Vorhandenseins von zwei physikalischen Effekten mit unterschiedlicher Energieabhängigkeit können durch Aufnahmen mit zwei oder mehr unterschiedlichen Röntgenenergien zwei Materialien unterschieden werden. Nimmt man zusätzliche Materialien dazu, die eine K-Kante im relevanten Energiebereich aufweisen, z.B. Gadolinium, Gold oder Eisen, lassen sich mit Aufnahmen mit mehr als zwei Röntgenenergien auch mehr als zwei Materialien trennen.

[0008] Eine Aufnahme von CT-Bildern mit mehreren unterschiedlichen Röntgenenergien ist beispielsweise mit Dual Source CT-Geräten mit einem Betrieb beider Röhren mit unterschiedlichen Spannungen, Single Source CT-Geräten mit Umschaltung der Röhrenspannung, CT-Geräten mit geteilter Vorfilterung („Twin Beam“), CT-Geräten mit Dual Layer Detektoren oder CT-Geräten mit photonenzählenden Detektoren möglich. Jedoch können auch andere medizintechnische bildgebende Geräte, die nicht auf dem Prinzip eines Computertomographen beruhen, mit zwei Aufnahmeenergien eine Materialklassifikation ermöglichen.

[0009] Die Trennung beruht in der Regel auf der Ermittlung einer „spektralen Größe“, die die materialabhängige Änderung der Röntgenabsorption bei den verschiedenen Röntgenenergien charakterisiert. Eine solche spektrale Größe ist z.B. der sogenannte Dual Energy Ratio, das ist der Röntgenschwächungswert bei einer niedrigen Röntgenenergie A dividiert durch den Röntgenschwächungswert bei einer höheren Energie B. Gäbe es keinerlei spektrale Effekte, wäre der Dual Energy Ratio gleich 1. Je ausgeprägter der spektrale Effekt für das jeweilige Material ist, desto mehr weicht der Dual Energy Ratio von 1 ab. In der Regel wird zur Materialtrennung von zwei Materialien A und B ein bestimmter konstanter Grenzwert der spektralen Größe verwendet. Für jedes Pixel im CT-Bild wird untersucht, ob die spektrale Größe an dieser Stelle unterhalb des Grenzwerts liegt, dann handelt es sich um Material A. Liegt die spektrale Größe oberhalb des Grenzwerts, handelt es sich um Material B.

[0010] US 2016/0123904 A1 beschreibt eine Vorrichtung zum Verarbeiten von Mehrfachenergie-Bilddaten zum Trennen von mindestens zwei Material-

typen umfassend eine Klassifizierungseinheit, wobei die Klassifizierungseinheit dazu ausgelegt ist, eine Klassifizierung von zu den Materialtypen gehörenden Pixeln oder Voxeln basierend auf einem Schwellwert zu erhalten, der in Abhängigkeit von Multi-Energie-Intensitätsinformationen, die den Pixeln oder Voxeln zugeordnet sind, adaptiv geändert wird.

[0011] US 2011/0188715 A1 offenbart eine automatische Erkennung von Bildmerkmalen. In einer Ausführungsform identifiziert eine Vorrichtung automatisch Organe in einem medizinischen Bild unter Verwendung eines decision forests, der aus mehreren unterschiedlichen, trainierten Entscheidungsbäumen gebildet wird. Ein Bildelement aus dem Bild wird auf jeden der trainierten Entscheidungsbäume angewendet, um eine Wahrscheinlichkeit zu erhalten, dass das Bildelement eine vordefinierte Organklasse darstellt. Die Wahrscheinlichkeiten aus jedem der Entscheidungsbäume werden aggregiert und verwendet, um dem Bildelement eine Organklassifikation zuzuordnen. In einer anderen Ausführungsform wird ein Verfahren zum Trainieren eines Entscheidungsbaums zum Identifizieren von Merkmalen in einem Bild bereitgestellt. Für einen ausgewählten Knoten in dem Entscheidungsbaum wird ein Trainingsbild an einer Vielzahl von Orten analysiert, die von einem ausgewählten Bildelement versetzt sind, und einer der Offsets wird basierend auf den Ergebnissen der Analyse ausgewählt und in Verbindung mit dem Knoten gespeichert.

[0012] Nachteil des Standes der Technik ist, dass die Qualität der Materialtrennung in Aufnahmen mit mehreren Energien durch bestimmte Fehlerquellen beeinträchtigt wird. So sind z.B. die Bilder rauschbehaftet, und einzelne Pixel können durch das Vorliegen von Bildrauschen einen falschen Wert der spektralen Größe aufweisen, was zu einer falschen Materialklassifizierung führen kann. Das ist beispielsweise bei Applikationen zur automatischen Entfernung der Knochen aus CT-angiographischen Bildern der Fall, wo Bereiche des Knochens fälschlicherweise als Kontrastmittel klassifiziert werden und so im Bild stehen bleiben, während Bereiche der Gefäße, insbesondere bei niedriger Kontrastmitteldichte oder geringem Durchmesser des Gefäßes, fälschlicherweise als Knochen klassifiziert und so aus dem Bild entfernt werden.

Des Weiteren hängt die Qualität der Materialtrennung von der Ausprägung der spektralen Größe ab und die kann wiederum bei den einzelnen CT-Techniken zur Aufnahme spektraler Bilder stark schwanken. Insbesondere bei CT-Geräten mit geteilter Vorfilterung oder bei CT-Geräten mit Dual Layer Detektor ergeben sich nur geringere spektrale Effekte, so dass eine saubere Materialtrennung nicht immer gewährleistet ist.

[0013] Es ist eine Aufgabe der vorliegenden Erfindung, ein alternatives, komfortableres Verfahren zur Klassifizierung und eine entsprechende Klassifizierungseinheit sowie eine Steuereinrichtung zur automatischen Steuerung einer medizintechnischen bildgebenden Anlage zur Verfügung zu stellen, mit denen die oben beschriebenen Nachteile vermieden oder zumindest reduziert werden und unterschiedliche Materialien automatisiert und sicher erkannt werden können. Ebenso ist die Erstellung einer solchen Klassifizierungseinheit und entsprechende Rechenvorrichtungen Aufgabe dieser Erfindung.

[0014] Diese Aufgabe wird durch ein Verfahren gemäß Patentanspruch 1, eine Klassifikationseinheit gemäß Patentanspruch 6, eine Lern-Rechenvorrichtung gemäß Patentanspruch 7, ein Klassifikations-Verfahren gemäß Patentanspruch 8, eine Steuereinrichtung gemäß Patentanspruch 12 sowie ein bildgebendes medizinisches System gemäß Patentanspruch 13 gelöst.

[0015] Die Lösung des oben geschilderten Problems ist sehr komplex und eine Klassifizierung von Materialien nicht auf einfache Weise möglich. Auch ist eine erfindungsgemäße Klassifizierungseinheit nicht auf einfache Weise herstellbar. Daher umfasst diese Erfindung nicht nur die Klassifizierungseinheit bzw. ein Verfahren zur Klassifizierung von Materialien mit dieser Klassifizierungseinheit, sondern auch die Herstellung dieser Klassifizierungseinheit und die diesbezügliche Rechenvorrichtung. Auch bietet sich mit der Klassifizierung zugleich die Möglichkeit, Materialien zu eliminieren oder ein bildgebendes medizintechnisches Gerät zu steuern, dass es bei Erkennen einer falschen Materialklassifikation sofort eine zweite Bildaufnahme mit anderen Aufnahmeparametern macht, um eine korrekte Klassifizierung von unterschiedlichen Materialien zu erreichen. Auch dies ist Teil der Erfindung.

[0016] Das erfindungsgemäße Verfahren dient zum Erstellen einer Klassifikationseinheit zur automatischen Klassifikation von Materialien in einer spektralen medizintechnischen Bildaufnahme eines Objekts. Spektrale Bildaufnahmen sind im Rahmen der Medizin bekannt und bezeichnen Bildaufnahmen, die mit mindestens zwei Aufnahmeenergien erstellt worden sind. Sie umfassen zumeist Bilddaten zu zwei Teil-Bildern, einem Teil-Bild bei der ersten Aufnahmeenergie und eines bei einer zweiten Aufnahmeenergie. Oftmals werden diese Teil-Bilder entsprechend der Spannung an der Röntgenquelle zur Einstellung der Aufnahmeenergie als „High-kV“ (Hoch-Kilovolt zuweilen auch als „High-keV“: Hoch-Kiloelektronenvolt) und „Low-kV“ (Niedrig-Kilovolt; bzw. „Low-keV“) bezeichnet. Es können für die Bildaufnahmen sowohl rekonstruierte Aufnahmen als auch Rohdatensätze verwendet werden, beispielsweise spektral-

le CT-Rohdatensätze oder daraus rekonstruierte CT-Bilder.

[0017] Das Verfahren umfasst die im Folgenden beschriebenen Schritte:

- Bereitstellung einer Lern-Rechenvorrichtung. Eine solche Lern-Rechenvorrichtung wird weiter unten genauer beschrieben. Die Lern-Rechenvorrichtung ist mittels eines Algorithmus (auch als „Erkennungs-Algorithmus“ bezeichnet) dazu ausgestaltet, grafische Elemente in der Bildaufnahme bzw. in Bilddaten der Bildaufnahmen zu erkennen. Unter graphischen Elementen sind hierbei beispielsweise Muster, graphische Primitive und/oder zusammenhängende Flächen oder Strukturen oder dergleichen zu verstehen. Z. B. können hierunter auch komplexere Strukturen wie beispielsweise Organe, Knochen, Gefäße etc. oder auch Materialien fallen.

- Bereitstellung einer Start-Klassifikationseinheit.

Die Start-Klassifikationseinheit ist die spätere Klassifikationseinheit, die jedoch noch nicht trainiert wurde bzw. noch nicht optimal trainiert wurde. Sie wird auf oder an der Lern-Rechenvorrichtung bereitgestellt und ist dazu ausgestaltet, mittels maschinellen Lernens (durch die Rechenvorrichtung) trainiert zu werden. Der Erkennungs-Algorithmus kann dabei auch beispielsweise Teil der (Start-)Klassifikationseinheit selber sein.

- Bereitstellung eines Referenzaufnahmen-Satzes.

Dieser Referenzaufnahmen-Satz kann mittels einer Bilddaten-Bibliothek bereitgestellt werden, die auch als „Referenz-Bibliothek“ bezeichnet werden kann. Der Referenzaufnahmen-Satz umfasst spektrale Referenzaufnahmen, die reale Bilder eines bildgebenden medizintechnischen Systems sein können oder auch künstlich generierte Bilder. Die Referenzaufnahmen sind Bildaufnahmen, umfassen also Bilddaten bzw. bestehen sie aus Bilddaten. Die Bilddaten-Bibliothek kann beispielsweise eine Datenbank mit einem Satz von Referenzaufnahmen sein, die mit der Lern-Rechenvorrichtung datentechnisch verbunden ist. Ein geeignetes medizintechnisches bildgebendes System zur Aufnahme von spektralen Referenzaufnahmen kann z.B. ein Computertomograph („CT“) sein.

[0018] In den Referenzaufnahmen sind vorteilhaftweise die zu klassifizierenden Materialien und ggf. auch bereits schon Objektklassifikationen, wie z.B. die Objektklassifikation „Nierenstein“, annotiert. Die Referenzaufnahmen sind also betreffend Materialien „gelabelt“. Beispielsweise kann in Referenzaufnahmen eine Annotation von Knochen und Gefäßen oder eine Annotation von Steinen einschließlich des Stein-

typs, oder eine korrekte Annotation von Gichtkristallen vorliegen.

- Trainieren der Klassifikationseinheit.

Die Klassifikationseinheit wird dabei gemäß einem Prinzip des maschinellen Lernens basierend auf der Erkennung der Materialien der Referenzaufnahmen des Referenzaufnahmen-Satzes der Bilddaten-Bibliothek trainiert. Die Erkennung erfolgt mittels des Erkennungs-Algorithmus.

[0019] Unter der oben und im Folgenden genutzten Formulierung „einer Bildaufnahme (eines medizintechnischen bildgebenden Systems)“ ist hierbei eine Bildaufnahme eines Objekts, beispielsweise eines Organs, Körperteils und/oder Bereichs eines Patienten, (auch als „Motiv“ bezeichnet) zu verstehen, welche mittels eines medizintechnischen bildgebenden Systems erstellt wurde. Hierbei kann es sich um zweidimensionale Bilder bzw. Bilddaten, Volumenbilddaten oder auch einen Bilddatensatz aus mehreren Bilddaten, z.B. einen Stapel von zweidimensionalen Bilddaten, handeln.

[0020] Da Bildbereiche mit einem bestimmten Material einem Computer in der Regel nicht verständlich sind, wird diese Verständlichmachung durch die Bezeichnung „Datenobjekt“ hervorgehoben. Ein „Datenobjekt“ ist ein Bildbereich, der einem Computer als ein bestimmtes Material umfassend kenntlich ist.

[0021] Eine erfindungsgemäße Klassifikationseinheit zur automatischen Klassifikation von Materialien in einer spektralen medizintechnischen Bildaufnahme eines Objekts, in der Regel aufgenommen mittels eines medizintechnischen bildgebenden Systems, zeichnet sich dadurch aus, dass sie mit einem erfindungsgemäßen Verfahren hergestellt worden ist. Die erfindungsgemäße Klassifikationseinheit wurde also gemäß dem Prinzip des maschinellen Lernens aus einer Start-Klassifikationseinheit erzeugt, wobei das Training basierend auf der Erkennung von Materialien in Referenzaufnahmen eines bereitgestellten Referenzaufnahmen-Satzes erfolgte. Die Erkennung erfolgte dabei mittels des Erkennungs-Algorithmus durch eine bereitgestellte Lern-Rechenvorrichtung, die eine Start-Klassifikationseinheit aufwies, welche trainiert wurde.

[0022] Eine erfindungsgemäße Lern-Rechenvorrichtung umfasst einen Prozessor und einen Datenspeicher mit Instruktionen, welche dem Prozessor bei ihrer Ausführung ermöglichen, der Rechenvorrichtung bereitgestellte Referenzaufnahmen zu erfassen, Materialien in den Referenzaufnahmen (als computerverständliche Datenobjekte) zu erkennen, und eine Start-Klassifikationseinheit nach dem erfindungsgemäßen Verfahren zu trainieren.

[0023] Ein erfindungsgemäßes Klassifikations-Verfahren zur automatischen Klassifikation von Materialien in einer spektralen medizintechnischen Bildaufnahme, insbesondere CT-Aufnahmen oder Projektionsdaten, z.B. Dual Energy Topogrammen, umfasst die Schritte:

- Bereitstellung einer Klassifikationseinheit. Diese Klassifikationseinheit ist wie oben beschrieben trainiert. Es kann in diesem Rahmen insbesondere zunächst auch ein Training einer Start-Klassifikationseinheit durchgeführt werden.
- Bereitstellung einer Bildaufnahme. Diese Bildaufnahme ist eine spektrale medizintechnische Bildaufnahme, die z.B. mittels eines medizintechnischen bildgebenden Systems aufgenommen worden ist. Beispielsweise umfasst diese Bildaufnahme High-kV- und Low-kV-Daten eines Dual-Energy-CT, als Rohdaten oder in Form rekonstruierter Bilddaten.
- Klassifizierung von Materialien. Diese Klassifizierung von Materialien in der Bildaufnahme erfolgt mittels der Klassifizierungseinheit.
- Kennzeichnung der klassifizierten Materialien. Die Materialien können dabei einfach mit Markern gekennzeichnet werden. Es können aber auch Material-Objekte an die betreffenden Positionen eingefügt und dem resultierenden Bild damit computerverständliche Elemente hinzugefügt werden. Die Kennzeichnung kann direkt in der Bildaufnahme vorgenommen werden oder in einer zusätzlichen Darstellung, z.B. einer zusätzlichen Bildecke.

Alternativ oder ergänzend dazu kann eine materialspezifische Bearbeitung der Bildaufnahme durchgeführt werden, z.B. eine Eliminierung oder zumindest Reduzierung von ermittelten Materialien. Beispielsweise könnte eine automatische Entfernung von Knochenmaterial aus CT-angiographischen Bildern durchgeführt werden.

[0024] Auf diese Weise lassen sich z.B. Fehlerquellen durch Bildrauschen durch Training der Klassifizierungseinheit mit einer großen Menge geeigneter Datensätze reduzieren, und so die Qualität der Materialtrennung über das herkömmliche, mit rein spektralen Verfahren erreichte, Maß hinaus verbessern.

[0025] Eine erfindungsgemäßes Steuereinrichtung für ein medizintechnisches bildgebendes System ist zur Durchführung eines erfindungsgemäßen Klassifikations-Verfahrens ausgestaltet.

[0026] Ein erfindungsgemäßes medizintechnisches bildgebendes System umfasst eine erfindungsgemäßes Steuereinrichtung.

[0027] Ein Großteil der zuvor genannten Komponenten insbesondere die Klassifikationseinheit, können ganz oder teilweise in Form von Softwaremodulen in einem Prozessor einer entsprechenden Steuereinrichtung oder eines Rechensystems realisiert werden. Eine weitgehend softwaremäßige Realisierung hat den Vorteil, dass auch schon bisher verwendete Steuereinrichtungen bzw. Rechensysteme auf einfache Weise durch ein Software-Update nachgerüstet werden können, um auf die erfindungsgemäß Weise zu arbeiten. Insofern wird die Aufgabe auch durch ein entsprechendes Computerprogrammprodukt mit einem Computerprogramm gelöst, welches direkt in eine Speichereinrichtung einer Steuereinrichtung bzw. eines Rechensystems ladbar ist, mit Programmabschnitten, um alle Schritte der erfindungsgemäßen Verfahren auszuführen, wenn das Programm ausgeführt wird. Ein solches Computerprogrammprodukt kann neben dem Computerprogramm gegebenenfalls zusätzliche Bestandteile wie z. B. eine Dokumentation und/oder zusätzliche Komponenten auch Hardware-Komponenten, wie z.B. Hardware-Schlüssel (Dongles etc.) zur Nutzung der Software, umfassen.

[0028] Zum Transport zur Steuereinrichtung bzw. zum Rechensystem und/oder zur Speicherung an oder in der Steuereinrichtung bzw. dem Rechensystem kann ein computerlesbares Medium, beispielsweise ein Memorystick, eine Festplatte oder ein sonstiger transportabler oder fest eingebauter Datenträger dienen, auf welchem die von einer Rechnereinheit einlesbaren und ausführbaren Programmabschnitte des Computerprogramms gespeichert sind. Die Rechnereinheit kann z.B. hierzu einen oder mehrere zusammenarbeitende Mikroprozessoren oder dergleichen aufweisen.

[0029] Bevorzugt ist daher auch eine Klassifikationseinheit in Form eines Computerprogrammprodukts mit einem Computerprogramm, welches direkt in eine Speichereinrichtung eines Rechensystems oder einer Steuereinrichtung eines medizintechnischen bildgebenden Systems ladbar ist, mit Programmabschnitten, um alle Schritte des erfindungsgemäßen Klassifikations-Verfahrens auszuführen, wenn das Computerprogramm in dem Rechensystem oder der Steuereinrichtung ausgeführt wird.

[0030] Bevorzugt ist eine Klassifikationseinheit in Form eines computerlesbaren Mediums, auf welchem von einer Rechnereinheit einlesbare und ausführbare Programmabschnitte gespeichert sind, um alle Schritte eines erfindungsgemäßen Klassifikations-Verfahrens auszuführen, wenn die Programmabschnitte von der Rechnereinheit ausgeführt werden. Die Klassifikationseinheit kann in Form dieses computerlesbaren Mediums auch als Hardware vorliegen, z.B. als programmierte EPROM.

[0031] Weitere, besonders vorteilhafte Ausgestaltungen und Weiterbildungen der Erfindung ergeben sich aus den abhängigen Ansprüchen sowie der nachfolgenden Beschreibung, wobei die Ansprüche einer Anspruchskategorie auch analog zu den Ansprüchen und Beschreibungsteilen zu einer anderen Anspruchskategorie weitergebildet sein können und insbesondere auch einzelne Merkmale verschiedener Ausführungsbeispiele bzw. Varianten zu neuen Ausführungsbeispielen bzw. Varianten kombiniert werden können. Insbesondere kann die erfindungsgemäße Klassifizierungseinheit auch analog zu den abhängigen Verfahrensansprüchen oder Beschreibungsteilen weitergebildet sein.

[0032] Bevorzugt ist ein Verfahren, bei dem Materialindex-Karten mit ortsabhängigen Materialindex-Werten ermittelt oder bereitgestellt werden, insbesondere als Referenzaufnahmen. Diese Materialindex-Karten umfassen spezifische Materialindex-Werte MI für unterschiedliche Bereiche des aufgenommenen Objekts.

[0033] Im Grunde lässt sich ein geeigneter Materialindex-Wert auf viele verschiedene Weisen aus den spektralen Daten berechnen. Eine bevorzugte Möglichkeit wird im Folgenden als Beispiel beschrieben.

[0034] Liegen beispielsweise High-kV-Aufnahmen und Low-kV-Aufnahmen eines Objekts vor, wäre es möglich, den Materialindex-Wert für einzelne Bereiche (z.B. Pixel) gemäß der Formel $MI = (HV-LV)/(HV+LV)$ zu berechnen, wobei „HV“ der Wert des betreffenden Bildbereichs (z.B. Pixels) bei einer High-kV-Aufnahme und „LV“ der Wert des betreffenden Bildbereichs (z.B. Pixels) bei einer entsprechenden Low-kV-Aufnahme ist. Die zur Berechnung einer Materialindex-Werte, bzw. Materialindex-Karte, herangezogenen spektralen Eingangsdaten sind wohlgeklärt nicht auf High-kV und Low-kV Aufnahmen beschränkt, sondern es können auch andere spektrale Bilddaten verwendet werden, die selber erst durch Berechnung aus den aufgenommenen Daten entstehen, also z.B. pseudo-monoenergetische Bilder bei verschiedenen Energien.

[0035] Aus den Materialindex-Werten ergibt sich also eine Materialindex-Karte, bei der der Materialindex-Wert MI für jeden Bereich einen spezifischen numerischen Wert hat. Die Materialindex-Werte MI können damit zusätzlich eine Ortsinformation bezüglich der Position des Bereichs im Objekt aufweisen. Die Materialindex-Werte MI können beispielsweise ein Feld der Form $MI(x,y,z)$ bilden, was eine bevorzugte Materialindex-Karte darstellen würde.

[0036] In diesem Fall würde die Klassifizierungseinheit, bevorzugt gemäß dem Prinzip des maschinellen Lernens, unter Verwendung der ortsabhängigen Materialindex-Karten trainiert und/oder solche Karten

können im Rahmen des Trainings ausgebildet werden. Erstellt man für eine Reihe von Referenzaufnahmen desselben Objekts Materialindex-Karten, kann man dadurch, z.B. nach Mittelwertbildung, eine einzige Materialindex-Karte erhalten, die fehlerkorrigierte ortsabhängige Materialindex-Werte für alle Teile des Objekts aufweist. Die aus den spektralen Referenzaufnahmen ermittelten ortsabhängigen Materialindex-Werte gehen damit als ein Parameter in einen lernbasierten Algorithmus zur Materialklassifikation („Klassifizierungseinheit“) ein.

[0037] Vorzugsweise umfassen die spektralen Referenzaufnahmen des Referenzauflnahmen-Satzes die folgenden Aufnahmen:

- Aufnahmen eines Objekts mit mindestens zwei verschiedenen Aufnahme-Energien, z.B. High-kV, Low-kV, insbesondere in Form von Zwei-Spektren-Aufnahmen oder Multi-Energy-Computertomographie-Aufnahmen, und/oder
- materialspezifisch zerlegte Aufnahmen, z.B. zwei-Material-Zerlegung, drei-Material-Zerlegung, und/oder
- Mischbilder, insbesondere mit Materialinformationen versehen, und/oder
- Materialindex-Karten mit ortsabhängigen Materialindex-Werten und/oder
- eine Aufnahme mit einer von einem Benutzer vorgenommenen Klassifizierung des Objektes nach den verschiedenen, zu trennenden Materialien, z.B. eine Kennzeichnung aller Knochen und aller Gefäße in den Computertomographiebildern, die er aufgrund seiner medizinischen Kenntnisse oder anderer Parameter vornimmt, z.B. Laborergebnisse bei der Klassifizierung von Nierensteinen oder Gicht, was als im Folgenden als „Classified Gold Standard“ bezeichnet wird.

[0038] Bevorzugt ist in mindestens einer der Referenzauflnahmen zusätzlich zu der Annotation der Materialien mindestens eine Objektklassifikation annotiert.

[0039] Vorzugsweise umfassen die Referenzauflnahmen Annotationen von Materialien der Gruppe Kalzium, Jod, Wasser und Harnsäure und/oder eine Objektklassifikation der Gruppe kalziumhaltiges und Jodhaltiges Kontrastmittel, kalzifizierte Plaques, Gichtkristalle, Harnsäurekristalle und Steintypen, z.B. kalziumhaltige Steine oder harnsäurehaltige Steine.

[0040] Dies stellt einen Vorteil dar, da sich als klinische Anwendungen der Materialtrennung durch CT-Aufnahmen mit zwei oder mehr Röntgenenergien die Trennung von Kalzium und Jod in CT-angiographischen Aufnahmen etabliert hat, z.B. zur automatischen Entfernung der Knochen aus den CT-angiographischen Bildern oder zur automatischen Entfer-

nung von kalzifizierten Plaques aus den kontrastmittelgefüllten Gefäßen. Des Weiteren ergibt sich ein Vorteil da z.B. die Klassifizierung von Nierensteinen, beispielsweise in kalziumhaltige Steine oder in harnsäurehaltige Steine, oder die Charakterisierung von Ablagerungen an den Gelenken, z.B. Gicht-, Harnsäurekristalle oder andere Ablagerungen klinisch genutzt wird.

[0041] Bevorzugt ist auch, dass im Rahmen des o. g. erfindungsgemäßen Verfahrens eine Klassifizierung unter Verwendung der Materialindex-Karte erfolgt. Vorzugsweise wird dazu für einen Bildbereich der spektralen Bildaufnahme eine spektrale Größe SG berechnet, z.B. gemäß der Formel $SG = (HV-LV)/(HV+LV)$, wobei „HV“ wieder der Wert des betreffenden Bildbereichs (z.B. Pixels) bei einer High-kV-Aufnahme und „LV“ der Wert des betreffenden Bildbereichs (z.B. Pixels) bei einer entsprechenden Low-kV-Aufnahme ist. Die berechnete spektrale Größe SG kann mit einem Materialindex-Wert der Materialindex-Karte an dem entsprechenden Bildbereich verglichen werden. Hier kann der Materialindex-Wert als Grenzwert dienen. Liegt die spektrale Größe SG darüber ($SG > MI$) wird ein anderes Material klassifiziert, als wenn SG darunter liegt ($SG < MI$).

[0042] Hier bietet die Ortsabhängigkeit des Materialindex-Wertes einen großen Vorteil, da die spektrale Größe von der Position des Bildpixels im Untersuchungsobjekt abhängen kann. Zum Beispiel können bei Abdomenaufnahmen unterschiedliche Grenzwerte notwendig sein, je nachdem ob eher das Zentrum des Abdomens, oder eher die Peripherie betrachtet wird. Für eine saubere Materialtrennung ist ein positionsabhängiger Grenzwert der spektralen Größe vorteilhaft, der stark vom Untersuchungsobjekt, dessen Größe, Form etc. abhängt.

[0043] Als weitere bevorzugte Ausbildung der vorgenannten Ausführungsform des erfindungsgemäßen Klassifikations-Verfahrens, werden Materialien der Gruppe Kalzium, Jod, Wasser, Harnsäure Weichteile und Eisen klassifiziert.

[0044] Bevorzugt wird (gegebenenfalls zusätzlich) eine Objektklassifikation durchgeführt mit einer Einordnung in Klassifikationsobjekte der Gruppe kalziumhaltige und jodhaltige Kontrastmittel, kalzifizierte Plaques, Gichtkristalle, Harnsäurekristalle und Steinarten, z.B. kalziumhaltige Steine oder harnsäurehaltige Steine.

[0045] Bevorzugt ist auch eine Ausführungsform bzw. Weiterbildung des erfindungsgemäßen Klassifikations-Verfahrens, die alternativ oder zusätzlich zur Steuerung eines medizintechnischen bildgebenden Systems dienen kann. Diese Ausführungsform umfasst die zusätzlichen Schritte:

- Bereitstellung einer Steuerdaten-Bibliothek. In dieser Steuerdaten-Bibliothek sind Steuerdatensätze für ein medizintechnisches bildgebendes System hinterlegt, welche mit einer fehlerhaften Materialklassifikation, z.B. mit Fehlercodes, datentechnisch verknüpft sind. Die Steuerdatensätze können dabei insbesondere dermaßen konfiguriert sein, dass eine Wahrscheinlichkeit einer auf den damit erstellten Bildaufnahmen basierenden fehlerhaften Materialklassifikation bei Anwendung des Steuerdatensatzes reduziert, vorzugsweise minimiert, wird

- Auswahl eines Steuerdatensatzes. Der Steuerdatensatz wird dabei basierend auf einer fehlerhaften Klassifikation eines Materials, insbesondere basierend auf dem ortsabhängigen Materialindex-Wert der Materialindex-Karte und/oder eines Fehlercodes ausgewählt.

[0046] Beispielsweise kann bei der Klassifizierung eines Materials, welches in dem untersuchten Bereich nicht vorkommen kann, oder wenn die Klassifikation in einem Bereich aufgrund von Bildfehlern (z.B. Bildrauschen) Werte aufweist, die von vorgegebenen Grenzwerten abweichen, ein Fehlercode erzeugt werden.

[0047] Mittels dieses Fehlercodes kann ein bestimmter Steuerdatensatz ausgewählt werden, der so konfiguriert ist, eine Aufnahme mit festgelegten Aufnahmeenergien durchzuführen, die speziell zur Klärung des auftretenden Problems ausgestaltet sind. Es kann aber auch ein Steuerdatensatz ausgewählt werden, der eine Aufnahme aus einem anderen Aufnahmewinkel durchführen lässt. Letztendlich kann aber auch einfach ein Steuerdatensatz ausgewählt werden, der eine neue Aufnahme des betreffenden Bereichs mit gleichen Aufnahmeparametern in die Wege leitet, in der Hoffnung, dass das Rauschen lediglich statistische Gründe hatte.

- Verwendung des ausgewählten Steuerdatensatzes.

Der ausgewählte Steuerdatensatz wird dabei zur erneuten Aufnahme des Motives (bzw. Untersuchungsobjekts) der überprüften Bildaufnahme verwendet. Damit wird der bei der ursprünglichen Bildaufnahme aufgenommene Bereich des Objekts noch einmal gemäß dem ausgewählten Steuerdatensatz aufgenommen, was eine erneute, ggf. verbesserte Bildaufnahme ergibt. Eine Wiederholung der kompletten Untersuchung wegen fehlerhafter Bildaufnahmen ist damit nicht notwendig, da eine Bildaufnahme sofort bei Feststellung einer verminderten Qualität noch einmal mit einer optimierten Steuerung aufgenommen wird.

[0048] Die Erfindung wird im Folgenden unter Hinweis auf die beigefügten Figuren anhand von Ausfüh-

rungsbeispielen noch einmal näher erläutert. Dabei sind in den verschiedenen Figuren gleiche Komponenten mit identischen Bezugsziffern versehen. Die Figuren sind in der Regel nicht maßstäblich. Es zeigen:

Fig. 1 eine schematische Darstellung eines ersten Ausführungsbeispiels des erfindungsgemäßen Verfahrens zur Herstellung einer erfindungsgemäßen Klassifikationseinheit,

Fig. 2 eine schematische Darstellung eines zweiten Ausführungsbeispiels des erfindungsgemäßen Verfahrens zur Herstellung einer erfindungsgemäßen Klassifikationseinheit mit ortsabhängigen Materialindex-Werten,

Fig. 3 eine schematische Darstellung eines Ausführungsbeispiels einer bevorzugten Lern-Rechenvorrichtung,

Fig. 4 ein Ablaufplan für einen möglichen Ablauf eines Ausführungsbeispiels eines erfindungsgemäßen Verfahrens zur Klassifikation von Materialien,

Fig. 5 eine grob schematische Darstellung eines medizintechnischen bildgebenden Systems mit einem Ausführungsbeispiel einer erfindungsgemäßen Steuereinrichtung und Klassifikationseinheit zur Durchführung des Verfahrens.

[0049] Bei den folgenden Erläuterungen wird davon ausgegangen, dass es sich bei dem medizintechnischen bildgebenden Systems bzw. bildgebenden Anlage um ein Computertomographiesystem handelt. Grundsätzlich ist das Verfahren aber auch an anderen bildgebenden Anlagen einsetzbar.

[0050] **Fig. 1** zeigt eine schematische Darstellung einer einfachen Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens zur Herstellung einer erfindungsgemäßen Klassifikationseinheit.

[0051] In Schritt I erfolgt eine Bereitstellung einer Lern-Rechenvorrichtung 7, wobei die Lern-Rechenvorrichtung 7 mittels eines Algorithmus dazu ausgestaltet ist, grafische Elemente in Bildaufnahmen bzw. in Bilddaten der Bildaufnahmen zu erkennen (siehe dazu auch **Fig. 3**).

[0052] In Schritt II erfolgt eine Bereitstellung einer Start-Klassifikationseinheit 6a, welche dazu ausgestaltet ist, mittels maschinellen Lernens trainiert zu werden, und im Grunde die untrainierte Klassifikationseinheit 6 darstellt. Diese Start-Klassifikationseinheit 6a wird dabei auf oder an der Lern-Rechenvorrichtung 7 bereitgestellt, also z.B. als mit dieser Lern-Rechenvorrichtung 7 datentechnisch verbundene Datenbank, wie hier skizziert, oder als Datenstruktur direkt in dieser Lern-Rechenvorrichtung 7.

[0053] In Schritt III erfolgt eine Bereitstellung einer Bilddaten-Bibliothek BB umfassend einen Referenzaufnahmen-Satz RS aus spektralen Referenzaufnahmen RA (dies können Referenzaufnahmen RA sein, welche mittels eines medizintechnischen bildgebenden Systems 1 erzeugt wurden oder aber künstlich erzeugte Referenzaufnahmen), wobei in den Referenzaufnahmen RA Materialien M1, M2, M3 (siehe z. B. **Fig. 4**) annotiert sind.

[0054] Der Kreis, in den die drei Pfeile mit den Bezeichnungen I, II und III münden, ist hier der Ausgangszustand, zu dem die drei vorangegangenen Aspekte bereitgestellt worden sind. Nun muss zur Herstellung der Klassifikationseinheit 6 die Start-Klassifikationseinheit 6a trainiert werden.

[0055] In Schritt IV erfolgt dieses Training der Klassifikationseinheit 6 gemäß dem Prinzip des maschinellen Lernens basierend auf der Erkennung der in den Referenzaufnahmen RA annotierten Materialien M1, M2, M3. Ein Beispiel für ein solches Training unter Nutzung ortsabhängiger Materialindex-Werte MI1, MI2, MI3 ist in **Fig. 2** dargestellt.

[0056] **Fig. 2** zeigt eine schematische Darstellung eines bevorzugten Ausführungsbeispiels des erfindungsgemäßen Verfahrens zur Herstellung einer erfindungsgemäßen Klassifikationseinheit. Diese Figur stellt eine Erweiterung der **Fig. 1** dar, wobei auch hier die Schritte I, II und III durchgeführt werden. Ergänzend zu dem Verfahren nach **Fig. 1** gehen hier ortsabhängige Materialindex-Werte MI1, MI2, MI3 in den Lernprozess ein.

[0057] Diese können beispielsweise direkt in den Referenzaufnahmen RA vorliegen oder aus den Bilddaten der Referenzaufnahmen berechnet werden.

[0058] In Schritt III ist die Bereitstellung der Bilddaten-Bibliothek BB dahingehend konkretisiert worden, dass der Referenzaufnahmen-Satz RS spektrale Referenzaufnahmen RA aufweist, in denen außer Materialien M1, M2, M3 zusätzlich noch Objektklassifikationen OK (wie z.B. „Nierenstein“, „Gefäßwand“, o.ä.) annotiert worden sind. Die hier dargestellte Objektklassifikation OK könnte beispielsweise „Schädelwand“ lauten.

[0059] In dem Kreis der **Fig. 2** ist eine Materialindex-Karte MK dargestellt, wie sie aus den Referenzaufnahmen RA gewonnen werden könnte. Die Referenzaufnahmen RA enthalten beispielsweise zusätzlich zu den in ihnen annotierten Materialien M1, M2, M3, die in unterschiedlichen Bildbereichen B1, B2, B3 vorliegenden, spektralen Größen in ihren Bilddaten. Diese spektralen Größen können dazu verwendet werden, Materialindex-Werte MI1, MI2, MI3 zu berechnen.

[0060] In einem einfachen Fall könnte aus einem annotierten „Jod“ für ein Bildelement in einem Bildbereich **B3** und einer dort in den Bilddaten vorliegenden spektralen Größe **SG** (welche z.B. nach der obigen Formel berechnet werden kann) daraus geschlossen werden, dass bei Vorliegen dieser Größe mit diesem Wert **SG** Jod in diesem Bildbereich **B3** vorliegt und dieser Wert **SG** als Grenzwert für Jod in Form eines Materialindex-Werts **MI1** abgespeichert werden. Geschieht dies für mehrere Referenzbilder in mehreren unterschiedlichen Bildbereichen **B1**, **B2**, **B3**, kann eine Karte mit spezifischen (zumeist unterschiedlichen) Materialindex-Werten **MI1**, **MI2**, **MI3** für unterschiedliche Bildbereiche **B1**, **B2**, **B3** erstellt werden.

[0061] Die zunächst berechneten Werte **SG** ergeben also in der Materialindex-Karte **MK** die Materialindex-Werte **MI1**, **MI2**, **MI3**, die bei einer späteren Klassifikation als Grenzwerte dienen können. Für unterschiedliche Materialien **M1**, **M2**, **M3** können unterschiedliche Materialindex-Karten **MK** im Laufe des Trainings erstellt werden.

[0062] Das Trainieren der Klassifikationseinheit **6** in Schritt **IV** basiert in diesem Beispiel auf dem Erstellen einer oder mehrerer Materialindex-Karten **MK**.

[0063] **Fig. 3** zeigt eine schematische Darstellung einer bevorzugten Lern-Rechenvorrichtung **7**. Diese Lern-Rechenvorrichtung **7** umfasst einen Prozessor **8** und einen Datenspeicher **9**, die hier als Blöcke dargestellt sind. Der Datenspeicher **9** enthält Instruktionen, welche dem Prozessor **8** bei ihrer Ausführung ermöglichen, der Rechenvorrichtung bereitgestellte Referenzaufnahmen **RA** zu erfassen, annotierte Materialien **M1**, **M2**, **M3** in den Referenzaufnahmen **RA** (Siehe **Fig. 2**) als Datenobjekte zu erkennen, und Materialien **M1**, **M2**, **M3** in diesen Bilddaten zu klassifizieren und/oder Materialindex-Karten **MK** zu erstellen und eine Start-Klassifikationseinheit **6a** zu trainieren, z. B. nach einer Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens wie sie in den **Fig. 1** und **Fig. 2** dargestellt wird.

[0064] **Fig. 4** zeigt ein Ablaufplan für einen möglichen Ablauf eines erfindungsgemäßen Verfahrens zur Klassifikation von Materialien **M1**, **M2**, **M3** in einer aktuell zu prüfenden bzw. zu analysierenden medizinischen Bilddaten **B**. Diese Bilddaten **B** kann beispielsweise mittels eines medizintechnischen bildgebenden Systems **1** aufgenommen worden sein, wie es in **Fig. 5** dargestellt ist.

[0065] In Schritt **V** erfolgt eine Bereitstellung einer Klassifikationseinheit **6**, die beispielsweise nach einem Verfahren hergestellt worden ist, wie es in den **Fig. 1** oder **Fig. 2** gezeigt ist. Die Materialindex-Karte **MK** in der Klassifikationseinheit **6** soll verdeutlichen, dass die Klassifikationseinheit **6** mit ortsabhängigen Materialindex-Werten **MI1**, **MI2**, **MI3** trainiert

worden ist bzw. mit einer dementsprechenden Materialindex-Karte **MK** ausgestattet ist. Neben der Darstellung der Klassifikationseinheit **6** ist die Materialindex-Karte **MK** für ein CT-Schichtbild mit ortsabhängigen Materialindex-Werten **MI1**, **MI2**, **MI3** vergrößert dargestellt.

[0066] In Schritt **VI** erfolgt eine Bereitstellung einer aktuell zu analysierenden Bilddaten **B** eines Objekts. Diese Bilddaten **B** ist z.B. eine mittels eines medizintechnischen bildgebenden Systems **1** angefertigte spektrale Aufnahme. In diesem Fall ist die Bilddaten **B** eine Schichtaufnahme durch einen menschlichen Schädel.

[0067] Es erfolgt in Schritt **VII** eine Klassifizierung von Materialien **M1**, **M2**, **M3** in der spektralen Bilddaten **B**, wobei in diesem Beispiel die Klassifizierung unter Verwendung der Materialindex-Karte **MK** erfolgt. Dabei wird für einen Bildbereich (**B1**, **B2**, **B3**), z.B. jedem einzelnen Pixel, eine spektrale Größe **SG** berechnet. Dies kann z.B. bei einer Bilddaten **B** umfassend eine Aufnahme bei hoher Röntgenenergie („High kV“) und eine Aufnahme bei niedriger Röntgenenergie („Low kV“) durch Berechnung der Formel $SG = (HV-LV)/(HV+LV)$ geschehen, wobei wie erwähnt „HV“ der Wert des betreffenden Pixels bei der High-kV-Aufnahme und „LV“ der Wert des betreffenden Pixels bei der Low-kV-Aufnahme ist. Die spektrale Größe kann aber auch beliebig anders definiert werden. Diese spektrale Größe **SG** wird dann mit einem Materialindex-Wert **MI1**, **MI2**, **MI3** aus der Materialindex-Karte **MK** verglichen und zwar so, dass der Materialindex-Wert **MI1**, **MI2**, **MI3** desjenigen Bereichs in der Materialindex-Karte **MK** gewählt wird, der der Position des Pixels der Bilddaten **B** im Objekt **O** entspricht.

In Schritt **VIII** erfolgt eine automatische Kennzeichnung (Annotation) der ermittelten Materialien **M1**, **M2**, **M3**, wobei mehrere Materialindex-Karten **MK** für die Klassifikation mehrerer unterschiedlicher Materialien **M1**, **M2**, **M3** verwendet werden können.

[0068] Bis zu diesem Schritt wäre ein beispielhaftes Verfahren zur reinen Klassifikation von Materialien dargestellt. Mit der automatischen Klassifikation von Materialien **M1**, **M2**, **M3** kann aber auch, zusätzlich oder alternativ zur automatischen Kennzeichnung, eine automatische Steuerung eines bildgebenden medizinischen Systems **1** einhergehen, wie die weiteren Verfahrensschritte verdeutlichen. Beispielsweise kann der Fall auftreten, dass in einem Bildbereich **B1**, **B2**, **B3** ein Material **M1**, **M2**, **M3** klassifiziert wird, welches in dem betreffenden Bereich oder der erkannten Objektklassifikation **OK** nach voreingestellten Richtlinien nicht vorkommen kann.

[0069] In dem folgenden (optionalen) Schritt **IX** erfolgt die Bereitstellung einer Steuerdaten-Bibliothek **SB**, in der Steuerdatensätze **SD** für ein medizintechni-

nisches bildgebendes System **1** hinterlegt sind. Diese Steuerdatensätze **SD** sind mit den Ergebnissen der Klassifikationseinheit **6** datentechnisch so verknüpft, so dass in Abhängigkeit von einem falsch identifizierten Material **M1, M2, M3** in einem Bildbereich **B1, B2, B3** der Bildaufnahme **B** ein Steuerdatensatz ausgewählt werden kann.

[0070] In Schritt **X** erfolgt eine Auswahl eines Steuerdatensatzes **SD** gemäß einem inkorrekt klassifizierten Material **M1, M2, M3** bzw. einem Fehlercode, der aufgrund dieser falschen Klassifizierung generiert worden ist.

[0071] In Schritt **XI** wird dieser ausgewählte Steuerdatensatz **SD** zur Steuerung des bildgebenden medizintechnischen Systems **1** für die erneute Aufnahme des Motivs der untersuchten Bildaufnahme **B** verwendet. Dadurch kann die neue Bildaufnahme **B** mit neuen Parametern aufgenommen werden, die speziell ausgewählt sind, um den betreffenden Bereich des Objekts nach speziellen Vorgaben für eine verbesserte Materialklassifikation (z.B. die Wahl anderer Aufnahmeenergien oder einen anderen Aufnahmewinkel, oder einfach eine erneute Aufnahme um statistisches Rauschen zu kompensieren) aufzunehmen.

[0072] **Fig. 5** zeigt grob schematisch ein Dual-Energy-Computertomographiesystem **1** mit einer Steuereinrichtung **10**, die zur Durchführung einer Klassifikation von Materialien ausgestaltet ist und bevorzugt auch zur Durchführung eines Lernprozesses nach einem erfindungsgemäßen Verfahren.

[0073] Das Computertomographiesystem **1** (CT) weist in üblicher Weise einen Scanner **2** mit einer Gantry auf, in der eine Röntgenquelle **3** rotiert, die jeweils einen Patienten **P** mit zwei Strahlenergien durchstrahlt, welcher mittels einer Liege **5** in einen Messraum der Gantry hineingeschoben wird, so dass die Strahlung auf einen der Röntgenquelle **3** jeweils gegenüberliegenden Detektor **4** trifft. Es wird ausdrücklich darauf hingewiesen, dass es sich bei dem Ausführungsbeispiel gemäß **Fig. 5** nur um ein Beispiel eines CTs handelt und die Erfindung auch an beliebigen anderen CTs genutzt werden kann. Oftmals werden z.B. für zwei Strahlenergien zwei Röntgenquellen **3** verwendet (Dual-Source-CT-System).

[0074] Ebenso sind bei der Steuereinrichtung **10** nur die Komponenten dargestellt, die für die Erläuterung der Erfindung wesentlich oder für das Verständnis hilfreich sind. Grundsätzlich sind derartige CT-Systeme und zugehörige Steuereinrichtungen dem Fachmann bekannt und brauchen daher nicht im Detail erläutert zu werden.

[0075] Ebenso kann die Erfindung auch an beliebigen anderen medizintechnischen bildgebenden Systemen genutzt werden.

[0076] Eine Kernkomponente der Steuereinrichtung **10** ist hier ein Prozessor **11**, auf dem verschiedene Komponenten in Form von Softwaremodulen realisiert sind. Die Steuereinrichtung **10** weist weiterhin eine Terminalsschnittstelle **14** auf, an die ein Terminal **20** angeschlossen ist, über das ein Bediener die Steuereinrichtung **10** und somit das Computertomographiesystem **1** bedienen kann. Eine weitere Schnittstelle **15** ist eine Netzwerkschnittstelle zum Anschluss an einen Datenbus **21**, um so eine Verbindung zu einem RIS bzw. PACS herzustellen (RIS: Radiologieinformationssystem; PACS: Picture Archiving and Communication System = Bildarchivierungs- und Kommunikationssystem). Über diesen Bus **21** können beispielsweise Bilddaten von Bildaufnahmen weitergesendet oder Daten (beispielsweise Referenzaufnahme-Sätze) übernommen werden.

[0077] Über eine Steuerschnittstelle **13** kann von der Steuereinrichtung **10** der Scanner **2** angesteuert werden, d. h. es werden z. B. die Rotationsgeschwindigkeit der Gantry, die Verschiebung der Patientenliege **5** und die Röntgenquelle **3** selbst gesteuert. Über eine Akquisitionsschnittstelle **12** werden die Rohdaten **RD** aus dem Detektor **4** ausgelesen.

[0078] Weiterhin weist die Steuereinrichtung **10** eine Speichereinheit **16** auf, in der eine Steuerdaten-Bibliothek **SB** mit Steuerdatensätzen **SD** hinterlegt ist. Die Steuerdatensätze **SD** können dabei u. a. mit einer fehlerhaften Materialklassifikation bzw. mit einem diesbezüglichen Fehlercode datentechnisch verknüpft sein.

[0079] Eine Komponente auf dem Prozessor **11** ist eine Bilddaten-Rekonstruktionseinheit **18**, mit welcher aus den über die Datenakquisitions-Schnittstelle **12** erhaltenen Rohdaten **RD** die gewünschten Bilddaten **B** der Bildaufnahmen **B** eines Objekts **O** rekonstruiert werden. Diese Bilddaten-Rekonstruktionseinheit **18** gibt die rekonstruierten Bilddaten **B** einer Bildaufnahme **B** an eine Klassifikationseinheit **6** weiter, in der zunächst gemäß einem erfindungsgemäßen Verfahren Materialien **M1, M2, M3** (s. z.B. **Fig. 4**) klassifiziert werden.

[0080] In dem Fall, dass festgestellt wurde, dass ein klassifiziertes Material **M1, M2, M3** an seiner Position im Objekt **O** nicht vorkommen kann (z.B. ein Nierenstein in der Leber), wird aus der von der Speichereinheit **16** bereitgestellten Steuerdaten-Bibliothek (**SB**) ein Steuerdatensatz **SD** gemäß mindestens einem vorbestimmten klassifizierungs-Fehlercode ausgewählt und unter Verwendung des ausgewählten Steuerdatensatzes **SD** eine erneute Bildaufnahme **B** des Objekts **O** erstellt, in der bevorzugt

ebenfalls eine Klassifikation von Materialien vorgenommen wird. Auf diese Weise kann automatisch ein Satz von Bildaufnahmen **B** erstellt werden, in denen Materialien korrekt klassifiziert wurden.

[0081] Es wird abschließend noch einmal darauf hingewiesen, dass es sich bei den vorhergehend detailliert beschriebenen Verfahren sowie bei den dargestellten Vorrichtungen lediglich um Ausführungsbeispiele handelt, welche vom Fachmann in verschiedenster Weise modifiziert werden können, ohne den Bereich der Erfindung zu verlassen. Weiterhin schließt die Verwendung der unbestimmten Artikel „ein“ bzw. „eine“ nicht aus, dass die betreffenden Merkmale auch mehrfach vorhanden sein können. Ebenso schließen die Begriff „Einheit“ und „Modul“ nicht aus, dass die betreffenden Komponenten aus mehreren zusammenwirkenden Teil-Komponenten bestehen, die gegebenenfalls auch räumlich verteilt sein können.

Patentansprüche

1. Verfahren zum Erstellen einer Klassifizierungseinheit (6) zur automatischen Klassifizierung von Materialien (M1, M2, M3) in einer spektralen medizintechnischen Bildaufnahme (B) eines Objekts (O), umfassend die Schritte:

- Bereitstellung einer Lern-Rechenvorrichtung (7), wobei die Lern-Rechenvorrichtung (7) mittels eines Algorithmus dazu ausgestaltet ist, grafische Elemente in Bildaufnahmen zu erkennen,
- Bereitstellung einer Start-Klassifizierungseinheit (6a) auf oder an der Lern-Rechenvorrichtung (7), welche dazu ausgestaltet ist, mittels maschinellem Lernen trainiert zu werden,
- Bereitstellung eines Referenzaufnahmen-Satzes (RS) umfassend spektrale Referenzaufnahmen (RA) des Objekts (O), in denen die zu klassifizierenden Materialien (M1, M2, M3) annotiert sind,
- Trainieren der Klassifizierungseinheit (6) gemäß dem Prinzip des maschinellen Lernens, unter Verwendung der in den spektralen Referenzaufnahmen (RA) annotierten Materialien (M1, M2, M3).

2. Verfahren nach Anspruch 1, wobei Materialindex-Karten (MK) mit ortsabhängigen Materialindex-Werten (MI1, MI2, MI3) ermittelt oder bereitgestellt werden, wobei der Materialindex-Wert (MI1, MI2, MI3) für jeden Bereich (B1, B2, B3) einen spezifischen numerischen Wert hat, und wobei die Klassifizierungseinheit (6) bevorzugt gemäß dem Prinzip des maschinellen Lernens, unter Verwendung der Bildaufnahmen und unter Verwendung und/oder zur Ausbildung der Materialindex-Karten (MK) trainiert wird.

3. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, wobei die spektralen Referenzaufnahmen (RA) des Referenzaufnahmen-Satzes (RS).

- Aufnahmen eines Objekts (O) mit mindestens zwei verschiedenen Aufnahme-Energien umfassen, und/oder
- materialspezifisch zerlegte Aufnahmen umfassen und/oder
- Mischbilder umfassen, insbesondere mit Materialinformationen versehen, und/oder
- Materialindex-Karten (MK) mit ortsabhängigen Materialindex-Werten (MI) umfassen und/oder
- einen „Classified Gold Standard“ umfassen

4. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, wobei in den Referenzaufnahmen (RA) zusätzlich zu der Annotation der Materialien (M1, M2, M3) mindestens eine Objektklassifikation (OK) annotiert ist.

5. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, wobei die Referenzaufnahmen (RA) zumindest eine Annotation von Materialien (M1, M2, M3) der Gruppe Kalzium, Jod, Wasser und Harnsäure umfassen, und/oder zumindest eine Objektklassifikation (OK) der Gruppe:

- kalziumhaltige und/oder jodhaltige Kontrastmittel,
- kalifizierte Plaques,
- Gichtkristalle,
- Harnsäurekristalle,
- Steintypen, z.B. kalziumhaltige oder harnsäurehaltige Steine.

6. Klassifizierungseinheit (6) zur automatischen Klassifikation von Materialien (M1, M2, M3) in einer spektralen medizintechnischen Bildaufnahme (B) eines Objekts (O), herstellbar mit einem Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5.

7. Lern-Rechenvorrichtung (7) umfassend einen Prozessor (8) und einen Datenspeicher (9) mit Instruktionen, welche dem Prozessor bei ihrer Ausführung ermöglichen:

- der Rechenvorrichtung bereitgestellte Referenzaufnahmen (RA) als Bilddaten zu erfassen,
- Materialien (M1, M2, M3) in den Referenzaufnahmen (RA) zu erkennen,
- eine Start-Klassifizierungseinheit (6a) nach einem Verfahren gemäß einem der Ansprüche 1 bis 5 zu trainieren.

8. Klassifikations-Verfahren zur automatischen Klassifikation von Materialien (M1, M2, M3) in einer spektralen medizintechnischen Bildaufnahme (B), umfassend die Schritte:

- Bereitstellung einer Klassifizierungseinheit (6) nach Anspruch 6 oder Erstellen einer Klassifizierungseinheit (6) gemäß einem der Ansprüche 1 bis 5,
- Bereitstellung einer spektralen medizintechnischen Bildaufnahme (B) eines Objekts (O),
- Klassifizierung von Materialien (M1, M2, M3) in der Bildaufnahme (B) mittels der Klassifizierungseinheit (6),

- Kennzeichnung der klassifizierten Materialien (M1, M2, M3) und/oder materialspezifische Bearbeitung der Bildaufnahme (B) .

9. Klassifikations-Verfahren nach Anspruch 8, wobei die Klassifizierung unter Verwendung zumindest einer Materialindex-Karte (MK) erfolgt, wobei bevorzugt für einen Bildbereich (B1, B2, B3) der spektralen Bildaufnahme (B) eine spektrale Größe (SG) berechnet wird und die berechnete spektrale Größe (SG) mit einem Materialindex-Wert (MI1, MI2, MI3) der Materialindex-Karte (MK) an einem entsprechenden Bildbereich (B1, B2, B3) verglichen wird.

10. Klassifikations-Verfahren nach Anspruch 8 oder 9, wobei Materialien (M1, M2, M3) der Gruppe Kalzium, Jod, Wasser, Harnsäure, Weichteile, und Eisen klassifiziert werden, und vorzugsweise zusätzlich eine Objektklassifikation mit Einordnung in Klassifikationsobjekte der Gruppe kalziumhaltige und jodhaltige Kontrastmittel, kalzifizierte Plaques, Gichtkristalle, Harnsäurekristalle und Steintypen, z.B. kalziumhaltige Steine oder harnsäurehaltige Steine, durchgeführt wird.

11. Klassifikations-Verfahren nach einem der Ansprüche 8 bis 10, umfassend die Schritte:

- Bereitstellung einer Steuerdaten-Bibliothek (SB), in der Steuerdatensätze (SD) für ein medizintechnisches bildgebendes System (1) hinterlegt sind,
- Auswahl eines Steuerdatensatzes (SD) basierend auf einer fehlerhaften Klassifikation eines Materials (M1, M2, M3), insbesondere basierend auf dem ortsabhängigen Materialindex-Wert (MI1, MI2, MI3) und/oder eines Fehlercodes,
- Verwendung des ausgewählten Steuerdatensatzes (SD) zur erneuten Aufnahme des Motives der untersuchten Bildaufnahme (B) .

12. Steuereinrichtung (10) zur Steuerung eines medizintechnischen bildgebenden Systems (1), welche zur Durchführung eines Klassifikations-Verfahrens nach einem der Ansprüche 8 bis 11 ausgestaltet ist.

13. Bildgebendes medizinisches System (1) umfassend eine Steuereinrichtung (10) nach Anspruch 12.

14. Computerprogrammprodukt mit einem Computerprogramm, welches direkt in eine Speichereinrichtung eines Rechensystems (10) oder einer Steuereinrichtung (10) eines medizintechnischen bildgebenden Systems (1) ladbar ist, mit Programmabschnitten, um alle Schritte des Klassifikations-Verfahrens nach einem der Ansprüche 8 bis 11 oder ein Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5 auszuführen, wenn das Computerprogramm in dem Rechensystem (10) oder der Steuereinrichtung (10) ausgeführt wird.

15. Computerlesbares Medium, auf welchem von einer Rechnereinheit einlesbare und ausführbare Programmabschnitte gespeichert sind, um alle Schritte eines Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 5 oder eines Klassifikations-Verfahrens nach einem der Ansprüche 8 bis 11 auszuführen, wenn die Programmabschnitte von der Rechnereinheit ausgeführt werden.

Es folgen 5 Seiten Zeichnungen

FIG 1

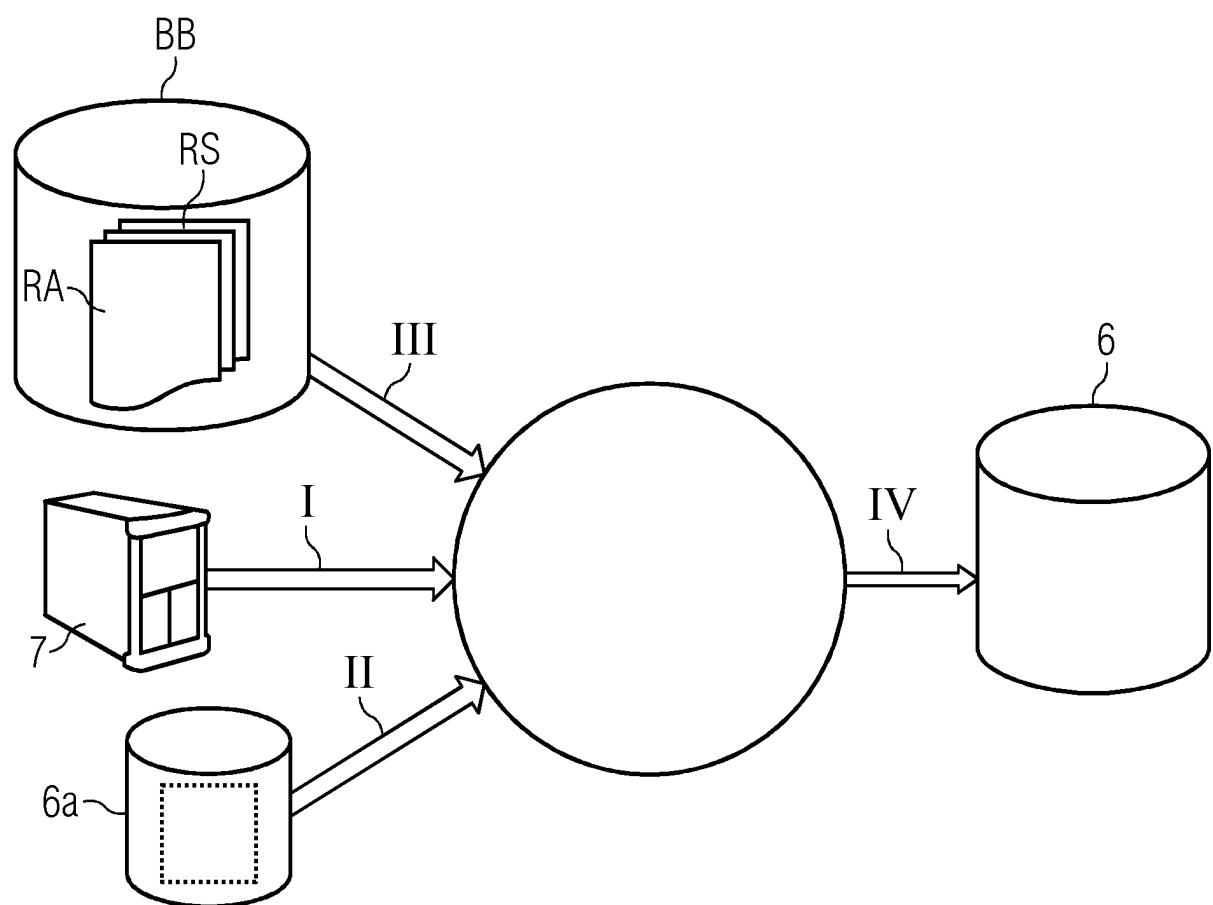


FIG 2

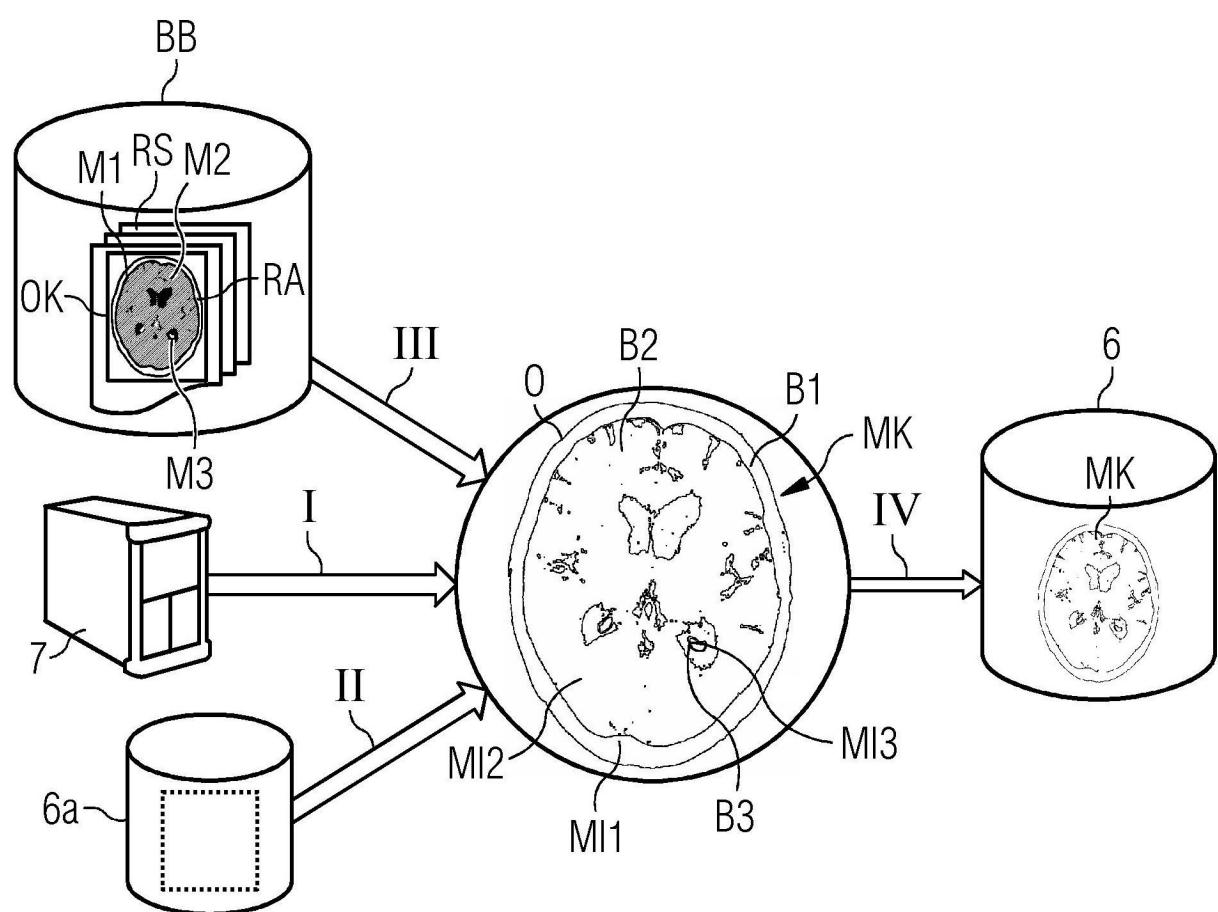


FIG 3

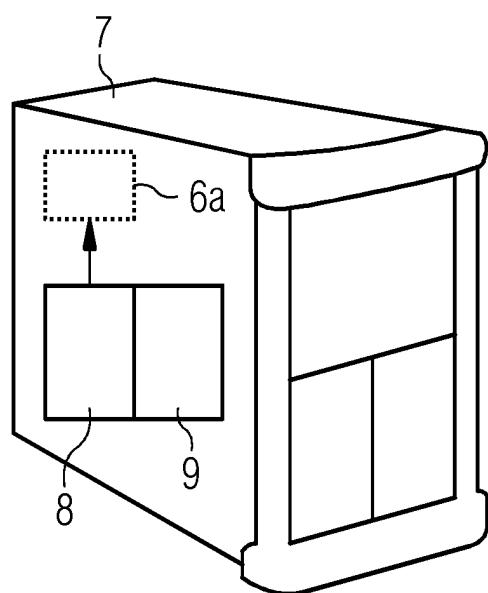
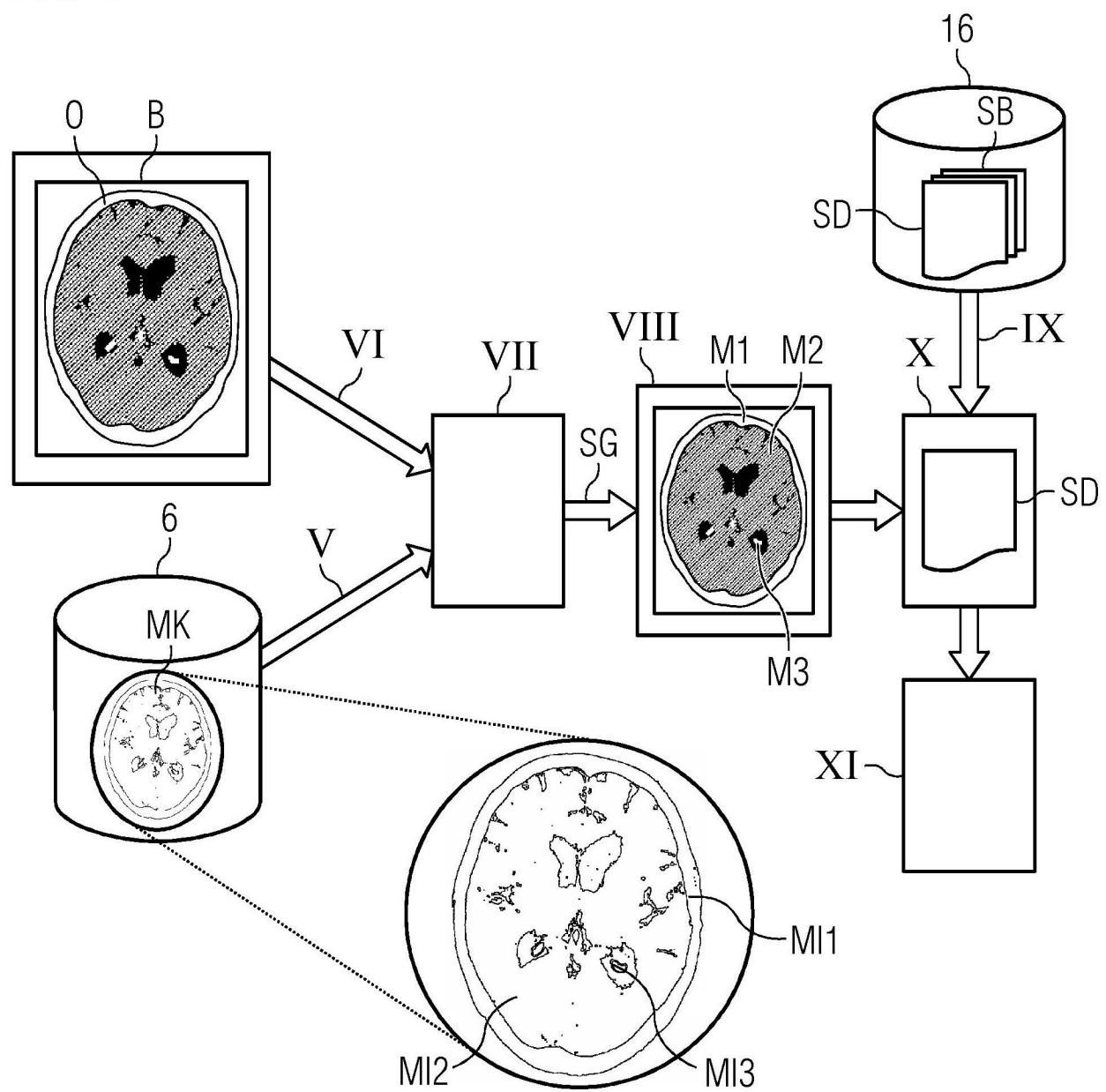


FIG 4



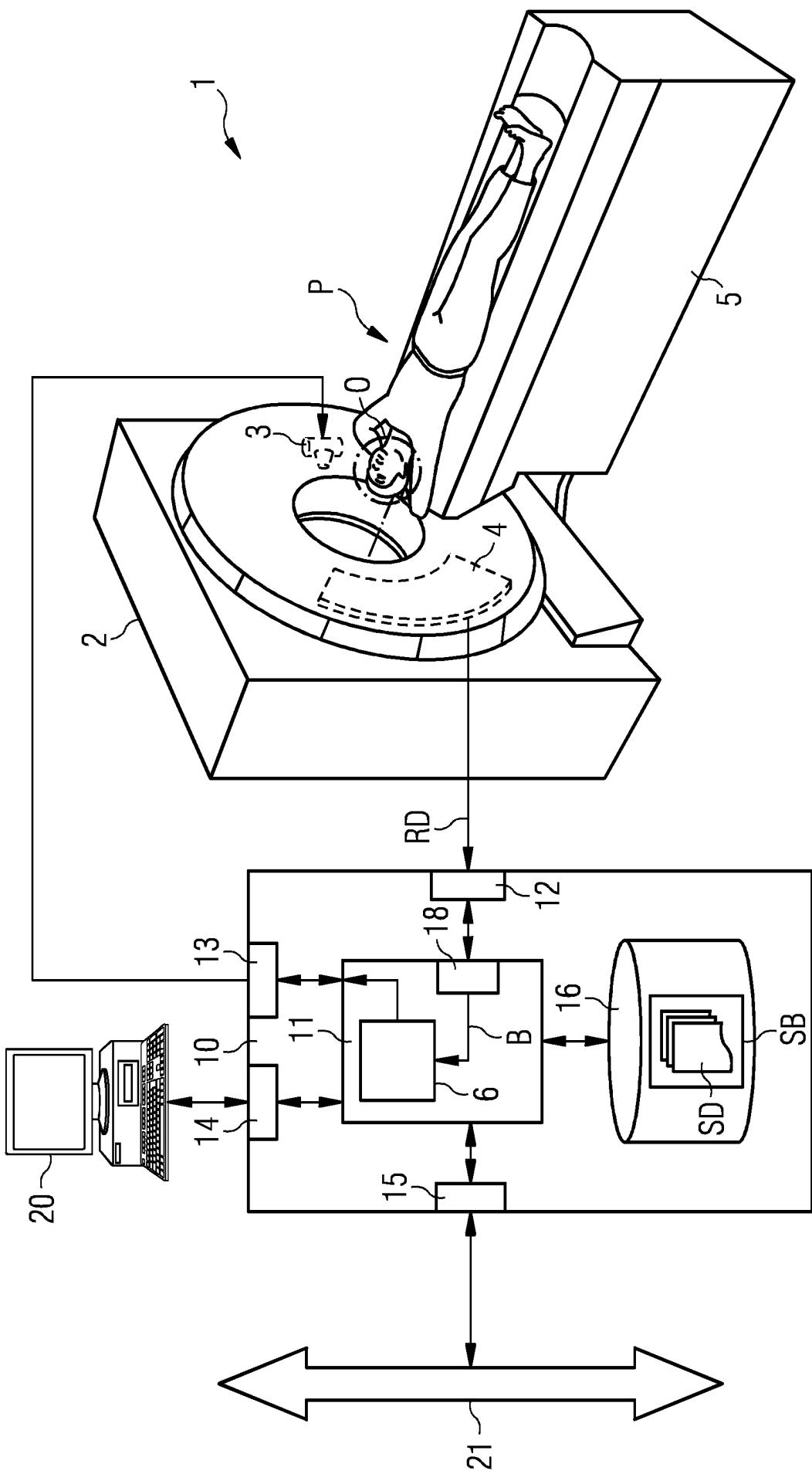


FIG 5