



(12) **Veröffentlichung**

der internationalen Anmeldung mit der
(87) Veröffentlichungs-Nr.: **WO 2022/096539**
in der deutschen Übersetzung (Art. III § 8 Abs. 2
IntPatÜbkG)
(21) Deutsches Aktenzeichen: **11 2021 005 801.0**
(86) PCT-Aktenzeichen: **PCT/EP2021/080567**
(86) PCT-Anmeldetag: **04.11.2021**
(87) PCT-Veröffentlichungstag: **12.05.2022**
(43) Veröffentlichungstag der PCT Anmeldung
in deutscher Übersetzung: **05.10.2023**

(51) Int Cl.: **G01R 33/54** (2006.01)
G01R 33/56 (2006.01)
G01R 33/48 (2006.01)
A61B 5/055 (2006.01)

(30) Unionspriorität:
PCT/CN2020/126499 **04.11.2020** **CN**
20214200.6 **15.12.2020** **EP**

(74) Vertreter:
Meissner Bolte Patentanwälte Rechtsanwälte
Partnerschaft mbB, 80538 München, DE

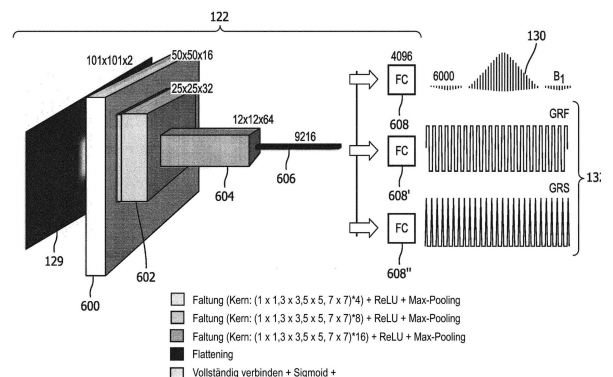
(71) Anmelder:
Koninklijke Philips N.V., Eindhoven, NL

(72) Erfinder:
Zhang, Yajing, Eindhoven, NL; Wang, Jiazheng,
Eindhoven, NL

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen.

(54) Bezeichnung: **ECHTZEIT-DESIGN VON HOCHFREQUENZIMPULSEN UND GRADIENTENIMPULSEN IN DER
MAGNETRESONANZTOMOGRAFIE**

(57) Zusammenfassung: Hierin offenbart ist ein medizinisches System (100, 300), das einen Speicher (110), der maschinenausführbare Anweisungen (120) speichert, und ein neuronales Faltungsnetz (122) umfasst. Das neuronale Faltungsnetz ist konfiguriert, um als Eingabe ein komplexes Array (128) zu empfangen, das eine Auswahl mindestens eines Anregungssichtfeldes (324, 900) codiert und als Reaktion eine Hochfrequenzwellenform (130) und mehrere räumlich selektive Gradientenimpulsformen (132) ausgibt. Das neuronale Faltungsnetz ist ein neuronales Mehrfachaufgaben-Faltungsnetz. Die Ausführung der maschinenausführbaren Anweisungen bewirkt, dass ein Rechensystem (104) eine Auswahl (124) des mindestens einen Anregungssichtfeldes empfängt (200); anfängliche Impulsfolgebefehle (126) empfängt (202); das komplexe Array unter Verwendung des mindestens einen Anregungssichtfeldes codiert (204); die Hochfrequenzwellenform und die mehreren räumlich selektiven Gradientenimpulsformen als Reaktion auf das Eingeben des komplexen Arrays in das neuronale Faltungsnetz empfängt (206); und modifizierte Impulsfolgebefehle (134) durch Modifizieren der anfänglichen Impulsfolgebefehle mit der Hochfrequenzwellenform und den mehreren räumlich selektiven Gradientenimpulsformen aufbaut (208).



Beschreibung

GEBIET DER ERFINDUNG

[0001] Diese Erfindung bezieht sich auf Magnetresonanztomografie, insbesondere auf das Design von Impulsfolgen zum Steuern von Magnetresonanztomografiesystemen.

HINTERGRUND DER ERFINDUNG

[0002] Ein großes statisches Magnetfeld wird durch Magnetresonanztomografiescanner (MRT-Scanner) verwendet, um die Kernspins von Atomen als Teil des Verfahrens zum Erzeugen von Bildern im Körper eines Patienten auszurichten. Dieses große statische Magnetfeld wird als B₀-Feld oder Hauptmagnetfeld bezeichnet. Verschiedene Messgrößen oder Eigenschaften der Person können unter Verwendung von MRT räumlich gemessen werden. Räumliche Codierung in der Magnetresonanztomografie wird unter Verwendung einer Kombination aus einer Hochfrequenzwellenform (HF-Wellenform) (oder HF-Impuls), die verwendet wird, um die Sendespule des MRT-Scanners zu steuern, und mehrerer räumlich selektiver Gradientenimpulswellenformen (Gradientenimpulse) durchgeführt.

[0003] Die Zeitschriftenveröffentlichung Vinding et al., „Ultrafast (milliseconds), multidimensional RFpulse design with deep learning“, Magn. Reson. Med. 2019; 82:586-599, offenbart die Verwendung eines neuronalen Netzes, das Eingabekarten des gewünschten Anregungsbereichs von Interesse berücksichtigt und einen einkanaligen, mehrdimensionalen HF-Impuls ausgibt.

[0004] Der Artikel „Joint Design of RF and gradient waveforms via auto-differentiation for 30 tailored excitation in MRI“ von Tianrui Luo, et al., abgerufen von ARXIV.org, Cornell University Library, 201, 24. August 2020, offenbart ein Verfahren zum gemeinsamen Design von HF- und Gradienten-Wellenformen auf der Grundlage eines autodifferenzierbaren Bloch-Simulators.

KURZDARSTELLUNG DER ERFINDUNG

[0005] Die Erfindung stellt ein medizinisches System, ein Computerprogramm und ein Verfahren in den unabhängigen Ansprüchen bereit. Ausführungsformen sind in den abhängigen Ansprüchen gegeben.

[0006] Ausführungsformen können eine verbesserte selektive HF-Anregung bereitstellen. Ausführungsformen können dies durch Verwenden eines neuronalen Faltungsnetzes erreichen, das trainiert wird, um sowohl die Hochfrequenzwellenform, die verwendet wird, um das B₁-Feld zu erzeugen, als

auch die damit einhergehenden räumlich selektiven Gradientenimpulswellenformen auszugeben. Eine Vielzahl unterschiedlicher Arten von neuronalen Netzarchitekturen wurde untersucht und neuronale Mehrfachaufgabenetze stellten die besten Ergebnisse bereit. Neuronale Mehrfachaufgabenetze stellen als Reaktion auf das Empfangen einer Eingabe mehrere Ausgaben bereit. Bei den hierin beschriebenen Beispielen nimmt das neuronale Faltungsnetz ein vollständiges komplexes Array, das mit dem gewünschten HF-Anregungssichtfeld codiert wurde, und gibt die vollständige Hochfrequenzwellenform und die vollständigen räumlich selektiven Gradientenimpulswellenformen aus. In dem Fall, in dem zweidimensionale Schichten erfasst werden, gibt es zwei räumlich selektive Gradientenimpulswellenformen, und wenn die Erfassung dreidimensional ist, gibt es drei räumlich selektive Gradientenimpulswellenformen, die ausgegeben werden.

[0007] Bei einem Aspekt stellt die Erfindung ein medizinisches System bereit, das einen Speicher, der maschinenausführbare Anweisungen speichert, und ein neuronales Faltungsnetz umfasst. Das neuronale Faltungsnetz ist konfiguriert, um als Eingabe ein komplexes Array zu empfangen, das eine Auswahl mindestens eines Anregungssichtfeldes codiert. Das komplexe Array kann zum Beispiel eine zweidimensionale Schicht, die durch Magnetresonanztomografie erfasst werden soll, oder ein dreidimensionales Volumen, das durch Magnetresonanztomografie erfasst werden soll repräsentieren.

[0008] Das neuronale Faltungsnetz ist konfiguriert, um als Reaktion auf das Empfangen des komplexen Arrays eine Hochfrequenzwellenform und mehrere räumlich selektive Gradientenimpulswellenformen auszugeben. Die Hochfrequenzwellenform kann eine Wellenform sein, die verwendet wird, um einen Sender in einem Magnetresonanztomografiesystem so zu steuern, dass er ein B₁-Magnetfeld erzeugt. Die mehreren räumlich selektiven Gradientenimpulswellenformen sind die jeweiligen Gradientenimpulswellenformen, die der Hochfrequenzwellenform zugeordnet wurden, um Magnetresonanzdaten für das mindestens eine Anregungssichtfeld zu erfassen.

[0009] Das neuronale Faltungsnetz ist ein neuronales Mehrfachaufgaben-Faltungsnetz mit einer ersten Ausgabe für die Hochfrequenzwellenform und einer separaten Ausgabe für jede der mehreren räumlich selektiven Gradientenimpulswellenformen. Bei einem zweidimensionalen Magnetresonanztomografieprotokoll gibt es zwei räumlich selektive Gradientenimpulswellenformen und bei einem dreidimensionalen Magnetresonanztomografieprotokoll gibt es drei räumlich selektive Gradientenimpulswellenformen.

[0010] Das medizinische System umfasst ferner ein Rechensystem. Die Ausführung der maschinenausführbaren Anweisungen bewirkt, dass das Rechensystem eine Auswahl des mindestens einen Anregungssichtfeldes empfängt. Dies kann zum Beispiel ein Sichtfeld sein, für das der Bediener oder Arzt eine Bildgebung wünscht. Die Ausführung der maschinenausführbaren Anweisungen veranlasst das Rechensystem ferner, anfängliche Impulsfolgebefehle zu empfangen, die zum derartigen Steuern eines Magnetresonanztomografiesystems konfiguriert sind, dass k-Raum-Daten erfasst werden, die eine Person beschreiben. Die Ausführung der maschinenausführbaren Anweisungen bewirkt ferner, dass das Rechensystem als Reaktion auf das Eingeben des komplexen Arrays in das neuronale Faltungsnetz die Hochfrequenzwellenform und die mehreren räumlich selektiven Gradientenimpulswellenformen empfängt.

[0011] Die Ausführung der maschinenausführbaren Anweisungen bewirkt ferner, dass das Rechensystem modifizierte Impulsfolgebefehle durch Modifizieren der anfänglichen Impulsfolgebefehle mit der Hochfrequenzwellenform und den mehreren räumlich selektiven Gradientenimpulswellenformen so aufbaut, dass die Impulsfolgebefehle dazu konfiguriert sind, das Magnetresonanztomografiesystem derart zu steuern, dass es die k-Raum-Daten aus dem mindestens einen Anregungssichtfeld erfasst. Diese Ausführungsform kann vorteilhaft sein, da sie ermöglicht, dass das Anregungssichtfeld durch den Bediener des Magnetresonanztomografiesystems einfach angegeben werden kann. Sie kann auch die Angabe von beliebig großen oder geformten Anregungssichtfeldern ermöglichen. In anderen Fällen kann sie auch die Angabe mehrerer Anregungssichtfelder für eine Erfassung ermöglichen.

[0012] Die anfänglichen Impulsfolgebefehle könnten beispielsweise vorläufige Impulsfolgebefehle oder Vorlagen-Impulsfolgebefehle sein, die einen Bereich enthalten, für den der HF-Impuls und die Gradientenimpulse zur Schichtauswahl angegeben werden müssen. Ausführungsformen können daher eine Anpassung der Impulsfolgebefehle für eine bestimmte Erfassung bereitstellen, indem sie sie mit der Hochfrequenzwellenform und den mehreren räumlich selektiven Gradientenimpulswellenformen modifizieren.

[0013] Die vorliegende Erfindung betrifft eine automatische Erzeugung der Hochfrequenzwellenform (HF-Wellenform) und mehrerer (zwei oder mehr) räumlich selektiver Gradientenwellenformen aus einem Eingabe-Anregungssichtfeld durch Modifizieren der anfänglichen Impulsfolgebefehle, soweit die HF-Wellenform und Gradientenwellenformen betroffen sind. Die HF-Wellenform und die Gradientenwellenformen, die automatisch erzeugt wurden, werden

als Reaktion auf das Eingabe-Anregungssichtfeld durch ein neuronales Mehrfachaufgaben-Faltungsnetz zurückgegeben. Dieses neuronales Mehrfachaufgaben-Faltungsnetz weist mehrere parallele Ausgaben (für die jeweiligen Wellenformen) auf und ist nicht vollständig verbunden. Die Erfindung erreicht eine sehr gute Genauigkeit der resultierenden Wellenformen, d. h. die nur eine geringe Abweichung von realen Informationen (ground truth) aufweisen, während eine relativ begrenzte Anzahl von Knoten und Gewichtungen im Vergleich zur Verwendung eines vollständig verbundenen neuronalen Faltungsnetzes genutzt wird.

[0014] Bei einer weiteren Ausführungsform wird das neuronale Faltungsnetz durch das Rechensystem trainiert, das wiederholt die folgenden Schritte durchführt: Der erste sich wiederholende Schritt dient zum Erzeugen einer Trainings-Hochfrequenzwellenform und der mehreren räumlich selektiven Trainings-Gradientenimpulswellenformen unter Verwendung eines selektiven Anregungsimpuls-Design-Algorithmus. Ein weiterer Schritt, der wiederholt durchgeführt wird, besteht darin, ein Modell-Anregungssichtfeld zu berechnen, indem die Trainings-Hochfrequenzwellenform und mehrere räumlich selektive Gradientenimpulswellenformen in ein Magnetresonanztomografie-Signalmodell eingegeben werden. Ein weiterer sich wiederholender Schritt besteht darin, eine vorwärts propagierte Hochfrequenzwellenform und mehrere vorwärts propagierte räumlich selektive Trainings-Gradientenimpulswellenformen zu empfangen, indem das Modell-Anregungssichtfeld in das neuronale Faltungsnetz eingegeben wird.

[0015] Ein weiterer wiederholter Schritt besteht darin, Parameter in dem neuronalen Faltungsnetz durch Durchführen von Rückpropagerierung mit der Trainings-Hochfrequenzwellenform und der vorwärts propagierten Hochfrequenzwellenform zu aktualisieren, und die Rückpropagerierung wird zudem mit übereinstimmenden Paaren der mehreren räumlich selektiven Trainings-Gradientenimpulswellenformen und der mehreren vorwärts propagierten räumlich selektiven Trainings-Gradientenimpulswellenformen durchgeführt. Diese Ausführungsform kann vorteilhaft sein, da sie ein neuronales Faltungsnetz bereitstellt, das in der Lage sein kann, Patientensichtfelder anzugeben, die beliebig geformt, voneinander entfernt und dimensioniert sind. Es sollte beachtet werden, dass diese Schritte in einer Schleife wiederholt werden können, aber in der Regel parallel durchgeführt werden, und die Rückpropagerierung zum Trainieren des neuronalen Faltungsnetzes als Vektorberechnungsprozess durchgeführt wird.

[0016] Bei einer weiteren Ausführungsform ist der ausgewählte Anregungsimpuls-Design-Algorithmus ein Shinnar-Le-Roux-Algorithmus.

[0017] Bei einer weiteren Ausführungsform ist der ausgewählte Anregungsimpuls-Design-Algorithmus ein Klein-Flip-Winkel-Näherungsalgorithmus.

[0018] Bei einer weiteren Ausführungsform ist der ausgewählte Anregungsimpuls-Design-Algorithmus ein numerischer optimaler Steuerungsalgorithmus.

[0019] Bei einer weiteren Ausführungsform ist das Magnetresonanztomografie-Signalmodell eine numerische Lösung der Bloch-Gleichungen.

[0020] Der Speicher enthält ferner Impulsfolgebefehle, die zum Erfassen der k-Raum-Daten gemäß einem Magnetresonanztomografieprotokoll mit paralleler Bildgebung konfiguriert sind. Diese Ausführungsform kann besonders vorteilhaft sein, da bei Kombination mit dem speziell angepassten Anregungssichtfeld sehr präzise und schnelle Magnetresonanztomografiebilder aufgenommen werden können.

[0021] Bei einer weiteren Ausführungsform bewirkt die Ausführung der maschinenausführbaren Anweisungen ferner, dass das Rechensystem ein Magnetresonanztomografie-Untersuchungsbild empfängt. Die Ausführung der maschinenausführbaren Anweisungen bewirkt ferner, dass das Datenverarbeitungssystem das Magnetresonanztomografie-Untersuchungsbild auf einer Anzeige darstellt. Die Ausführung der maschinenausführbaren Anweisungen bewirkt ferner, dass das Rechensystem als Reaktion auf das Anzeigen des Magnetresonanztomografie-Untersuchungsbildes eine Auswahl mindestens eines Anregungssichtfeldes empfängt. Die Auswahl des mindestens einen Anregungssichtfeldes erfolgt innerhalb des Magnetresonanztomografie-Untersuchungsbildes. Diese Ausführungsform ist vorteilhaft, da sie die Anpassung des Anregungssichtfeldes an eine bestimmte Person und an ein bestimmtes Magnetresonanztomografieprotokoll ermöglicht.

[0022] Bei einer weiteren Ausführungsform wird die Auswahl des mindestens einen Sichtfeldes von einem automatisierten Bildsegmentierungsalgorithmus empfangen. Wenn zum Beispiel ein Radiologe ein Magnetresonanztomografieprotokoll des Herzens anordnet, kann die automatisierte Segmentierung verwendet werden, um die Bildgebung des Herzens sehr präzise einzugrenzen und anzugeben.

[0023] Bei einer weiteren Ausführungsform wird die Auswahl des mindestens einen Sichtfeldes von einer Benutzerschnittstelle empfangen. Beispielsweise könnte der Bediener des Systems genau das gewünschte Sichtfeld umranden. Dies kann ein flexibleres Mittel zum Durchführen einer Magnetresonanztomografie bereitstellen.

[0024] Bei einer weiteren Ausführungsform wird die Auswahl des mindestens einen Sichtfeldes von einem automatisierten Segmentierungsalgorithmus und von der Benutzerschnittstelle empfangen. Zum Beispiel könnten Abschnitte der Auswahl des Anregungssichtfeldes von einem automatisierten Bildgebungssegmentierungsalgorithmus empfangen werden und andere Abschnitte könnten von einer Benutzerschnittstelle empfangen werden. Der Bediener könnte auch die Segmentierung aus dem Algorithmus unter Verwendung der Benutzerschnittstelle korrigieren.

[0025] Bei einer weiteren Ausführungsform sind die mehreren räumlich selektiven Gradientenimpulswellenformen zwei räumlich selektive Gradientenimpulswellenformen. In jedem des mindestens einen Anregungssichtfeldes ist ein zweidimensionales Anregungssichtfeld. Beispielsweise werden die beiden Gradientenimpulswellenformen angegeben und diese werden zum Aufnehmen zweidimensionaler Schichten verwendet. Es kann jedoch so konfiguriert sein, dass mehrere Schichten aufgenommen werden.

[0026] Bei einer weiteren Ausführungsform sind die mehreren räumlich selektiven Gradientenimpulswellenformen drei räumlich selektive Gradientenimpulswellenformen.

[0027] Jedes des mindestens einen Anregungssichtfeldes ist ein dreidimensionales Anregungssichtfeld. Dies kann vorteilhaft sein, da ein beliebiges dreidimensionales Anregungssichtfeld angegeben werden kann.

[0028] Bei einer weiteren Ausführungsform weist jedes des mindestens einen Anregungssichtfeldes eine beliebige Form auf. Das Anregungssichtfeld wird durch Einsetzen komplexer Werte in das komplexe Array angegeben, das verwendet wird, um die Auswahl des mindestens einen Anregungssichtfeldes zu codieren. Dies ermöglicht die Angabe eines Anregungssichtfeldes mit einer beliebigen Form.

[0029] Bei einer weiteren Ausführungsform ist jedes des mindestens einen Anregungssichtfeldes räumlich getrennt. Da zum Beispiel das Anregungssichtfeld für eine dreidimensionale Erfassung beliebig angegeben werden kann, können mehrere Anregungssichtfelder angegeben werden. Ein Beispiel wäre ein Magnetresonanztomografie-Scan, bei dem Magnetresonanztomografie-Bilder von Brustgewebe für zwei unterschiedliche Brüste gleichzeitig, aber für unterschiedliche Hochfrequenz-Anregungssichtfelder aufgenommen werden.

[0030] Bei einer weiteren Ausführungsform ist das neuronale Netz ein neuronales Multiskalen-Faltungnetz.

[0031] Bei einer weiteren Ausführungsform ist das neuronale Faltungsnetz ein neuronales U-Net-Faltungsnetz.

[0032] Bei einer weiteren Ausführungsform umfasst das medizinische System ferner das Magnetresonanztomografiesystem. Die Ausführung der maschinenausführbaren Befehle bewirkt ferner, dass das Rechensystem die k-Raum-Daten durch Steuern des Magnetresonanztomografiesystems mit den modifizierten Impulsfolgebefehlen erfasst. Die Ausführung der maschinenausführbaren Anweisungen bewirkt ferner, dass das Rechensystem Magnetresonanztomografiedaten aus den k-Raum-Daten rekonstruiert. Diese Ausführungsform kann vorteilhaft sein, da das Anregungssichtfeld an die bestimmte Magnetresonanztomografieerfassung angepasst wurde. Dies kann zum Beispiel eine höhere Bildgebungsqualität im Vergleich zu einer Situation bereitstellen, in der ein vorberechnetes Anregungssichtfeld verwendet wurde.

[0033] Bei einem weiteren Aspekt stellt die Erfindung ferner ein Computerprogramm bereit, das maschinenausführbare Anweisungen zur Ausführung durch ein Rechensystem umfasst, das ein medizinisches System steuert. Das Computerprogramm umfasst ferner ein neuronales Faltungsnetz, das konfiguriert ist, um als Eingabe ein komplexes Array zu empfangen, das eine Auswahl mindestens eines Anregungssichtfeldes codiert. Das neuronale Faltungsnetz ist konfiguriert, um als Reaktion auf das Empfangen des komplexen Arrays eine Hochfrequenzwellenform und mehrere räumlich selektive Gradientenimpulswellenformen auszugeben. Das neuronale Faltungsnetz ist ein neuronales Mehrfachaufgaben-Faltungsnetz mit einer ersten Ausgabe für die Hochfrequenzwellenform und einer separaten Ausgabe für jede der mehreren räumlich selektiven Gradientenimpulswellenformen.

[0034] Die Ausführung der maschinenausführbaren Anweisungen bewirkt, dass das Rechensystem eine Auswahl des mindestens einen Anregungssichtfeldes empfängt. Die Ausführung der maschinenausführbaren Anweisungen veranlasst das Rechensystem ferner, anfängliche Impulsfolgebefehle zu empfangen, die zum derartigen Steuern eines Magnetresonanztomografiesystems konfiguriert sind, dass k-Raum-Daten erfasst werden, die die Person beschreiben. Die Ausführung der maschinenausführbaren Anweisungen bewirkt ferner, dass das Rechensystem das komplexe Array unter Verwendung des mindestens einen Anregungssichtfeldes codiert.

[0035] Die Ausführung der maschinenausführbaren Anweisungen bewirkt ferner, dass das Rechensystem als Reaktion auf das Empfangen des komplexen Arrays in dem neuronalen Faltungsnetz die Hochfre-

quenzwellenform und die mehreren räumlich selektiven Gradientenimpulswellenformen empfängt. Die Ausführung der maschinenausführbaren Anweisungen bewirkt ferner, dass das Rechensystem modifizierte Impulsfolgebefehle durch Modifizieren der anfänglichen Impulsfolgebefehle mit der Hochfrequenzwellenform und den mehreren räumlich selektiven Gradientenimpulswellenformen so aufbaut, dass die Impulsfolgebefehle dazu konfiguriert sind, das Magnetresonanztomografiesystem derart zu steuern, dass es die k-Raum-Daten aus dem mindestens einen Anregungssichtfeld erfasst.

[0036] Bei einem weiteren Aspekt stellt die Erfindung ein Verfahren der medizinischen Bildgebung unter Verwendung eines neuronalen Faltungsnetzes bereit. Das neuronale Faltungsnetz ist konfiguriert, um als Eingabe ein komplexes Array zu empfangen, das eine Auswahl des mindestens einen Anregungssichtfeldes codiert. Das neuronale Faltungsnetz ist konfiguriert, um als Reaktion auf das Empfangen des komplexen Arrays eine Hochfrequenzwellenform und mehrere räumlich selektive Gradientenimpulswellenformen auszugeben. Das neuronale Faltungsnetz ist ein neuronales Mehrfachaufgaben-Faltungsnetz mit einer ersten Ausgabe für die Hochfrequenzwellenform und einer separaten Ausgabe für jede der mehreren räumlich selektiven Gradientenimpulswellenformen.

[0037] Das Verfahren umfasst ein Empfangen einer Auswahl des mindestens einen Anregungssichtfeldes. Das Verfahren umfasst ferner ein Empfangen der anfänglichen Impulsfolgebefehle, die zum derartigen Steuern des Magnetresonanztomografiesystems konfiguriert sind, dass es k-Raum-Daten erfasst, die eine Person beschreiben. Das Verfahren umfasst ferner ein Codieren des komplexen Arrays unter Verwendung des mindestens einen Anregungssichtfeldes. Das Verfahren umfasst ferner ein Empfangen der Hochfrequenzwellenform und der mehreren räumlich selektiven Gradientenimpulswellenformen als Reaktion auf das Eingeben des komplexen Arrays in das neuronale Faltungsnetz. Schließlich umfasst das Verfahren ferner ein Aufbauen modifizierter Impulsfolgebefehle durch Modifizieren der anfänglichen Impulsfolgebefehle mit der Hochfrequenzwellenform und den mehreren räumlich selektiven Gradientenimpulswellenformen, sodass die Impulsfolgebefehle konfiguriert sind, um das Magnetresonanztomografiesystem derart zu steuern, dass es die k-Raum-Daten aus dem mindestens einen Anregungssichtfeld erfasst.

[0038] Bei einem weiteren Aspekt stellt die Erfindung ein Verfahren zum Trainieren eines neuronalen Faltungsnetzes bereit. Das Verfahren umfasst ein wiederholtes Durchführen der folgenden Schritte. Es sollte bekannt sein, dass diese Schritte mehrmals nacheinander wiederholt werden können oder sie

mehrfach parallel durchgeführt werden können. Das Verfahren führt ein Erzeugen einer Trainings-Hochfrequenzwellenform und mehrerer räumlich selektiver Trainings-Gradientenimpulswellenformen unter Verwendung eines ausgewählten Anregungsimpuls-Design-Algorithmus durch. Das Verfahren umfasst ferner ein Berechnen eines Modell-Anregungssichtfeldes durch Eingeben der Trainings-Hochfrequenzwellenform und der mehreren räumlich selektiven Trainings-Gradientenimpulswellenformen in ein Magnetresonanztomografie-Signalmodell.

[0039] Das Verfahren umfasst ferner ein Empfangen einer vorwärts propagierten Hochfrequenzwellenform und mehrerer vorwärts propagierter räumlich selektiver Trainings-Gradientenimpulswellenformen durch Eingeben des Modell-Anregungssichtfeldes in das neuronale Faltungsnetz. Das Verfahren umfasst ferner ein Aktualisieren von Parametern des neuronalen Faltungsnetzes durch Durchführen von Rückpropagerierung mit der Trainings-Hochfrequenzwellenform und der vorwärts propagierten Hochfrequenzwellenform. Dann wird mit übereinstimmenden Paaren der räumlich-selektiven Trainings-Gradientenwellenformen und der mehreren vorwärts propagierten räumlich selektiven Trainings-Gradientenimpulswellenformen auch eine Rückpropagerierung durchgeführt.

[0040] Es versteht sich, dass eine oder mehrere der vorstehend erwähnten Ausführungsformen der Erfindung kombiniert werden können, solange sich die kombinierten Ausführungsformen nicht gegenseitig ausschließen.

[0041] Wie der Fachmann erkennen wird, können Aspekte der vorliegenden Erfindung als eine Einrichtung, ein Verfahren oder ein Computerprogrammprodukt verkörpert sein. Dementsprechend können Aspekte der vorliegenden Erfindung die Form einer reinen Hardware-Ausführungsform, einer reinen Software-Ausführungsform (einschließlich Firmware, residenter Software, Mikrocode usw.) oder einer Ausführungsform annehmen, die Software- und Hardwareaspekte kombiniert, die alle hierin allgemein als „Schaltung“, „Modul“ oder „System“ bezeichnet werden können. Des Weiteren können Aspekte der vorliegenden Erfindung die Form eines Computerprogrammprodukts annehmen, das in einem oder mehreren computerlesbaren Medien mit einem darauf verkörperten computerausführbaren Code verkörpert ist.

[0042] Eine beliebige Kombination aus einem oder mehreren computerlesbaren Medien kann genutzt werden. Das computerlesbare Medium kann ein computerlesbares Signalmedium oder ein computerlesbares Speichermedium sein. Ein „computerlesbares Speichermedium“ im hierin verwendeten Sinne schließt ein beliebiges gegenständliches Speicher-

medium ein, das Anweisungen speichern kann, die durch einen Prozessor oder ein Rechensystem einer Datenverarbeitungsvorrichtung ausführbar sind. Das computerlesbare Speichermedium kann als computerlesbares nichtflüchtiges Speichermedium bezeichnet werden. Das computerlesbare Speichermedium kann auch als gegenständliches computerlesbares Medium bezeichnet werden. Bei einigen Ausführungsformen kann ein computerlesbares Speichermedium auch in der Lage sein, Daten zu speichern, auf die durch das Rechensystem der Datenverarbeitungsvorrichtung zugegriffen werden kann. Beispiele für computerlesbare Speichermedien schließen ein: eine Diskette, ein magnetisches Festplattenlaufwerk, einen Halbleiterspeicher, einen Flash-Speicher, einen USB-Stick, einen Direktzugriffsspeicher (Random Access Memory, RAM), einen Nur-Lese-Speicher (Read Only Memory, ROM), eine optische Platte, eine magneto-optische Platte und die Registerdatei des Datenverarbeitungssystems, ohne auf diese beschränkt zu sein. Beispiele für optische Platten schließen Compact Disks (CD) und Digital Versatile Disks (DVD) ein, zum Beispiel CD-ROM-, CD-RW-, CD-R-, DVD-ROM-, DVD-RW- oder DVD-R-Platten. Der Begriff „computerlesbares Speichermedium“ bezeichnet auch verschiedene Arten von Aufzeichnungsmedien, auf die durch die Computervorrichtung über ein Netzwerk oder eine Kommunikationsverbindung zugegriffen werden kann. Zum Beispiel können Daten über ein Modem, über das Internet oder über ein lokales Netzwerk abgerufen werden. Computerausführbarer Code, der auf einem computerlesbaren Medium verkörpert ist, kann unter Verwendung eines beliebigen geeigneten Mediums, einschließlich und ohne auf diese beschränkt sein, kabelloser, kabelgebundener Medien, Lichtwellenleiter, HF, usw. oder eine beliebige geeignete Kombination des Vorstehenden, übertragen werden.

[0043] Ein computerlesbares Signalmedium kann ein verbreitetes Datensignal mit darin verkörperten computerausführbaren Code einschließen, zum Beispiel im Basisband oder als Teil einer Trägerwelle. Ein derartiges verbreitetes Signal kann jegliche Vielfalt von Formen annehmen, einschließlich und ohne auf diese beschränkt zu sein, elektromagnetisch, optisch oder einer beliebigen geeigneten Kombination davon. Ein computerlesbares Signalmedium kann ein beliebiges computerlesbares Medium sein, das kein computerlesbares Speichermedium ist und das ein Programm zur Verwendung durch oder in Verbindung mit einem System, einer Einrichtung oder einer Vorrichtung zur Anweisungsausführung kommunizieren, verbreiten oder transportieren kann.

[0044] „Computer Hauptspeicher“ oder „Hauptspeicher“ ist ein Beispiel für ein computerlesbares Speichermedium. Computer Hauptspeicher ist ein jeglicher Speicher, auf den ein Rechensystem direkt

zugreifen kann. „Computerspeicher“ oder „Speicher“ ist ein weiteres Beispiel für ein computerlesbares Speichermedium. Computerspeicher ist ein jegliches nichtflüchtiges computerlesbares Speichermedium. Bei einigen Ausführungsformen kann ein Computerspeicher auch ein Computer Hauptspeicher sein oder umgekehrt.

[0045] Ein „Rechensystem“ im hierin verwendeten Sinne enthält eine elektronische Komponente, die in der Lage ist, ein Programm oder eine maschinenausführbare Anweisung oder einen computerausführbaren Code auszuführen. Bezugnahmen auf das Rechensystem, die das Beispiel für „ein Rechensystem“ umfassen, sollten so interpretiert werden, dass es möglicherweise mehr als ein Rechensystem oder einen Verarbeitungskern enthält. Das Rechensystem kann beispielsweise ein Mehrkernprozessor sein. Ein Rechensystem kann sich auch auf eine Gruppe von Rechensystemen in einem einzelnen Computersystem oder auf mehrere Computersysteme verteilt beziehen. Der Begriff „Rechensystem“ sollte auch so interpretiert werden, dass er sich möglicherweise auf eine Gruppe oder ein Netzwerk aus Datenverarbeitungsvorrichtungen bezieht, die jeweils einen Prozessor oder Rechensysteme umfassen. Der maschinenausführbare Code oder die maschinenausführbaren Anweisungen können durch mehrere Rechensysteme oder Prozessoren ausgeführt werden, die sich innerhalb derselben Datenverarbeitungsvorrichtung befinden können oder die sogar über mehrere Datenverarbeitungsvorrichtungen verteilt sein können.

[0046] Maschinenausführbare Anweisungen oder computerausführbarer Code können Anweisungen oder ein Programm umfassen, das einen Prozessor oder ein anderes Rechensystem veranlasst, einen Aspekt der vorliegenden Erfindung durchzuführen. Ein computerausführbarer Code zum Ausführen von Arbeitsschritten für Aspekte der vorliegenden Erfindung kann in einer beliebigen Kombination aus einer oder mehreren Programmiersprachen, einschließlich einer objektorientierten Programmiersprache wie z. B. Java, Smalltalk, C++ oder dergleichen und herkömmlicher prozeduraler Programmiersprachen wie z. B. der Programmiersprache „C“ oder ähnlicher Programmiersprachen, geschrieben und in maschinenausführbare Anweisungen kompiliert sein. In einigen Fällen kann der computerausführbare Code in der Form einer höheren Sprache oder in einer vorkompilierten Form vorliegen und in Verbindung mit einem Interpreter verwendet werden, der die maschinenausführbaren Anweisungen im laufenden Betrieb erzeugt. In anderen Fällen können die maschinenausführbaren Anweisungen oder der computerausführbare Code in Form einer Programmierung für programmierbare Logikgatteranordnungen vorliegen.

[0047] Der computerausführbare Code kann vollständig auf dem Computer des Benutzers, teilweise auf dem Computer des Benutzers, als eigenständiges Softwarepaket, teilweise auf dem Computer des Benutzers und teilweise auf einem entfernten Computer oder vollständig auf dem entfernten Computer oder Server ausgeführt werden. Bei dem letztgenannten Szenario kann der entfernte Computer mit dem Computer des Benutzers über jegliche Art von Netzwerk verbunden sein, unter anderem über ein lokales Netzwerk (Local Area Network, LAN) oder über ein Weitverkehrsnetzwerk (Wide Area Network, WAN), oder die Verbindung kann zu einem externen Computer hergestellt werden (beispielsweise über das Internet unter Nutzung eines Internetdienstanbieters (Internet Service Provider)).

[0048] Aspekte der vorliegenden Erfindung werden unter Bezugnahme auf Flussdiagrammdarstellungen und/oder Blockschemata von Verfahren, Einrichtungen (Systemen) und Computerprogrammprodukten gemäß den Ausführungsformen der Erfindung beschrieben. Es versteht sich, dass jeder Block oder ein Teil der Blöcke des Flussdiagramms, der Veranschaulichungen und/oder der Blockschemata durch Computerprogrammmanweisungen gegebenfalls in Form von durch computerausführbarem Code implementiert werden kann. Es versteht sich ferner, dass, wenn sie sich nicht gegenseitig ausschließen, Kombinationen von Blöcken in den unterschiedlichen Flussdiagrammen, Veranschaulichungen und/oder Blockschemata kombiniert werden können. Diese Computerprogrammmanweisungen können einer Rechenvorrichtung eines Universalcomputers, eines Spezialcomputers oder anderer programmierbarer Datenverarbeitungsvorrichtungen bereitgestellt werden, um eine derartige Maschine zu erzeugen, dass die Anweisungen, die über das Rechensystem des Computers oder anderer programmierbarer Datenverarbeitungseinrichtungen ausgeführt werden, Mittel zum Realisieren der in einem Block bzw. in den Blöcken der Flussdiagramme und/oder der Blockschemata angegebenen Funktionen/Aktionen schaffen.

[0049] Diese maschinenausführbaren Anweisungen oder Computerprogrammmanweisungen können auch in einem computerlesbaren Medium gespeichert sein, das einen Computer, eine andere programmierbare Datenverarbeitungseinrichtung oder andere Vorrichtungen anweisen kann, auf eine bestimmte Weise zu funktionieren, sodass die in dem computerlesbaren Medium gespeicherten Anweisungen einen Fertigungsartikel erzeugen, der Anweisungen einschließt, welche die Funktion/Aktion implementieren, die in dem Block oder den Blöcken des Flussdiagramms und/oder des Blockdiagramms angegeben sind.

[0050] Die maschinenausführbaren Anweisungen oder Computerprogrammanweisungen können auch auf einen Computer, eine andere programmierbare Datenverarbeitungseinrichtung oder andere Vorrichtungen geladen werden, um zu bewirken, dass eine Reihe von Betriebsschritten auf dem Computer, der anderen programmierbaren Einrichtung oder den anderen Vorrichtungen durchgeführt werden, um einen derartigen computerimplementierten Prozess zu erzeugen, dass die Anweisungen, die auf dem Computer oder der anderen programmierbaren Einrichtung ausgeführt werden, Prozesse zum Implementieren der Funktionen/Aktionen bereitstellen, die in dem Block oder den Blöcken des Flussdiagramms und/oder des Blockdiagramms angegebene sind.

[0051] Eine „Benutzerschnittstelle“, wie hierin verwendet, ist eine Schnittstelle, die es einem Benutzer oder Bediener ermöglicht, mit einem Computer oder Computersystem zu interagieren. Eine „Benutzerschnittstelle“ kann auch als „Human Interface Device“ bezeichnet werden. Eine Benutzerschnittstelle kann dem Bediener Informationen oder Daten bereitstellen und/oder Informationen oder Daten vom Bediener empfangen. Eine Benutzerschnittstelle kann es ermöglichen, dass Eingaben eines Bedieners vom Computer empfangen werden und der Computer Ausgaben für den Benutzer bereitstellen kann. Mit anderen Worten kann es die Benutzerschnittstelle einem Bediener ermöglichen, einen Computer zu steuern oder zu bedienen, und die Schnittstelle kann es dem Computer ermöglichen, die Auswirkungen der Steuerung oder Bedienung des Bedieners anzuzeigen. Die Anzeige von Daten oder Informationen auf einem Bildschirm oder einer grafischen Benutzerschnittstelle ist ein Beispiel für das Bereitstellen von Informationen an einen Bediener. Das Empfangen von Daten über eine Tastatur, eine Maus, einen Trackball, ein Touchpad, einen Zeigestock, ein Grafiktablett, einen Joystick, ein Gamepad, eine Webcam, ein Headset, Pedale, einen kabelgebundenen Handschuh, eine Fernbedienung und einen Beschleunigungsmesser sind alles Beispiele für Benutzerschnittstellenkomponenten, die das Empfangen von Informationen oder Daten von einem Bediener ermöglichen.

[0052] Eine „Hardwareschnittstelle“, wie hierin verwendet, beinhaltet eine Schnittstelle, die es dem Rechesystem eines Computersystems ermöglicht, mit einer externen Rechenvorrichtung und/oder -einrichtung zu interagieren und/oder diese zu steuern. Eine Hardwareschnittstelle kann es einem Rechesystem ermöglichen, Steuersignale oder Anweisungen an eine externe Rechenvorrichtung und/oder -einrichtung zu senden. Eine Hardwareschnittstelle kann es einem Rechesystem auch ermöglichen, Daten mit einer externen Rechenvorrichtung und/oder -einrichtung auszutauschen. Beispiele für eine

Hardwareschnittstelle schließen ein, sind jedoch nicht beschränkt auf: einen universellen seriellen Bus, einen IEEE-1394-Anschluss, einen parallelen Anschluss, einen IEEE-1284-Anschluss, einen seriellen Anschluss, einen RS-232-Anschluss, einen IEEE-488-Anschluss, eine Bluetooth-Verbindung, eine drahtlose lokale Netzwerkverbindung, eine TCP/IP-Verbindung, eine Ethernet-Verbindung, eine Steuerspannungsschnittstelle, eine MIDI-Schnittstelle, eine analoge Eingabeschnittstelle und eine digitale Eingabeschnittstelle.

[0053] Eine „Anzeige“ oder „Anzeigevorrichtung“, wie hierin verwendet, beinhaltet eine Ausgabevorrichtung oder eine Benutzerschnittstelle, die zum Anzeigen von Bildern oder Daten ausgelegt ist. Eine Anzeige kann visuelle, akustische und/oder taktile Daten ausgeben. Beispiele für eine Anzeige schließen ein, sind jedoch nicht beschränkt auf: einen Computermonitor, einen Fernsehschirm, einen Touchscreen, eine taktile elektronische Anzeige, einen Braille-Bildschirm, eine Kathodenstrahlröhre (CRT), eine Speicherröhre, eine bistabile Anzeige, elektronisches Papier, eine Vektoranzeige, einen Flachbildschirm, eine Vakuumfluoreszenzanzeige (VF), eine Lichtemitterdiodenanzeige (LED), eine Elektrolumineszenzanzeige (ELD), eine Plasmabildschirmanzeige (PDP), eine Flüssigkristallanzeige (LCD), eine Anzeige mit organischen lichtemittierenden Dioden (OLED), einen Projektor und eine an einem Kopf angebrachte Anzeige.

[0054] K-Raum-Daten sind hierin als die unter Verwendung der Antenne einer Magnetresonanzeleinrichtung während einer Magnetresonanz-Bildgebungsabastung aufgezeichneten Messungen von Hochfrequenzsignalen definiert, die von Atomspins emittiert werden. Magnetresonanzdaten sind ein Beispiel für tomografische medizinische Bilddaten.

[0055] Ein Magnetresonanztomografiebild (MRT-Bild), MR-Bild oder Magnetresonanztomografiedaten sind hierin als rekonstruierte zwei- oder dreidimensionale Visualisierung von anatomischen Daten definiert, die innerhalb der k-Raum-Daten enthalten sind. Diese Visualisierung kann unter Verwendung eines Computers durchgeführt werden.

KURZBESCHREIBUNG DER ZEICHNUNGEN

[0056] Im Folgenden werden bevorzugte Ausführungsformen der Erfindung nur beispielhaft und unter Bezugnahme auf die Zeichnungen beschrieben, in denen:

Fig. 1 ein Beispiel eines medizinischen Systems veranschaulicht;

Fig. 2 ein Flussdiagramm zeigt, das ein Verfahren zum Betreiben des medizinischen Systems von **Fig. 1** veranschaulicht;

Fig. 3 ein weiteres Beispiel eines medizinischen Systems veranschaulicht;

Fig. 4 ein Flussdiagramm zeigt, das ein Verfahren zum Verwenden des medizinischen Systems von **Fig. 3** veranschaulicht;

Fig. 5 ein Flussdiagramm zeigt, das ein Verfahren zum Trainieren eines neuronalen Faltungsnetzes veranschaulicht;

Fig. 6 ein Beispiel eines neuronalen Faltungsnetzes veranschaulicht;

Fig. 7 die Wirksamkeit des neuronalen Faltungsnetzes beim Bereitstellen eines gewünschten Anregungssichtfeldes veranschaulicht;

Fig. 8 ein gewünschtes Sichtfeld veranschaulicht; und

Fig. 9 ein Sichtfeld veranschaulicht, das sich aus der Verwendung des neuronalen Faltungsnetzes und aus der Verwendung eines des LSR-Algorithmus ergibt.

BESCHREIBUNG VON AUSFÜHRUNGSFORMEN

[0057] Gleich nummerierte Elemente in diesen Figuren sind entweder äquivalente Elemente oder führen die gleiche Funktion durch. Elemente, die zuvor erörtert wurden, werden in späteren Figuren nicht notwendigerweise erörtert, wenn die Funktion äquivalent ist.

[0058] **Fig. 1** zeigt eine Figur, die ein Beispiel eines medizinischen Systems 100 veranschaulicht. Das medizinische System 100 in **Fig. 1** ist als einen Computer 102 umfassend dargestellt, der ein Rechensystem 104 umfasst. Das Rechensystem 104 soll einen oder mehrere Verarbeitungskerne oder Rechensysteme repräsentieren, die an demselben Ort gegenwärtig oder verteilt sein können. Der Computer 102 ist als eine optionale Hardwareschnittstelle 106 und eine optionale Benutzerschnittstelle umfassend gezeigt, die mit dem Rechensystem 104 verbunden sind. Die Hardwareschnittstelle 106 kann es zum Beispiel dem Rechensystem 104 ermöglichen, Daten mit anderen Komponenten des medizinischen Systems 100 auszutauschen sowie diese anderen Komponenten zu steuern. Die Benutzerschnittstelle 108 kann es dem Bediener des medizinischen Systems 100 ermöglichen, es zu steuern und mit diesem zu interagieren. Die Benutzerschnittstelle 108 könnte zum Beispiel eine grafische Benutzeroberfläche oder eine andere grafische Steuervorrichtung umfassen.

[0059] Das medizinische System 100 ist ferner so gezeigt, dass es einen Speicher 110 umfasst, der mit dem Rechensystem 104 kommuniziert. Der Speicher 110 soll eine beliebige Kombination von Speicher darstellen, auf die das Rechensystem 104 zugreifen kann.

[0060] Der Speicher 110 ist als maschinen ausführbare Anweisungen 120 enthaltend gezeigt. Die maschinen ausführbaren Anweisungen 120 sind Anweisungen, die es dem Rechensystem ermöglichen, solche Aufgaben wie z. B. Steuern anderer Komponenten sowie Durchführung verschiedener numerischer Aufgaben und Bildverarbeitungsaufgaben durchzuführen. Der Speicher 110 ist ferner so gezeigt, dass er ein neuronales Faltungsnetz 122 umfasst. Dieses neuronale Faltungsnetz ist ein neuronales Mehrfachaufgaben-Faltungsnetz, das eine erste Ausgabe zum Ausgeben einer Hochfrequenzwellenform und eine separate Ausgabe für jeden von mehreren räumlich selektiven Gradientenimpuls wellenformen aufweist. Das neuronale Faltungsnetz gibt diese als Reaktion auf das Empfangen eines komplexen Arrays aus, das eine Auswahl mindestens eines Anregungssichtfeldes für die Magnetresonanztomografieerfassung codiert.

[0061] Der Speicher 110 ist ferner als eine Auswahl mindestens eines Anregungssichtfeldes 124 enthaltend gezeigt. Der Speicher ist ferner so gezeigt, dass er anfängliche Impulsfolgebefehle 126 enthält. Dies können zum Beispiel ein Satz von Impulsfolgebefehlen sein, die aus einer Datenbank abgerufen oder ausgewählt werden, wenn ein bestimmtes Protokoll ausgeführt werden soll.

[0062] Der Speicher 110 ist ferner als ein komplexes Array enthaltend gezeigt, das verwendet wird, um die Auswahl des mindestens einen Anregungssichtfeldes 124 zu codieren. Der Speicher ist ferner so gezeigt, dass er eine Hochfrequenzwellenform 130 und mehrere räumlich selektive Gradientenimpuls wellenformen 132 enthält, die von dem neuronalen Faltungsnetz 122 als Reaktion auf das Eingeben des komplexen Arrays 128 empfangen wurden. Der Speicher 110 ist ferner als modifizierte Impulsfolgebefehle 134 enthaltend gezeigt. Die modifizierten Impulsfolgebefehle 134 wurden aus den anfänglichen Impulsfolgebefehlen 126 aufgebaut und modifiziert, um die Hochfrequenzwellenform 130 und die mehreren räumlich selektiven Gradientenimpuls wellenformen 132 zu integrieren.

[0063] **Fig. 2** zeigt ein Flussdiagramm, das ein Verfahren zum Betreiben des medizinischen Systems 100 von **Fig. 1** veranschaulicht. Zunächst wird in Schritt 200 eine Auswahl mindestens eines Anregungssichtfeldes 124 empfangen. In Schritt 202 werden dann die anfänglichen Impulsfolgebefehle 126 empfangen. Als Nächstes wird in Schritt 204 das komplexe Array 128 unter Verwendung des mindestens einen Anregungssichtfeldes 124 codiert. In Schritt 206 werden die Hochfrequenzwellenform 130 und die mehreren räumlich selektiven Gradientenimpuls wellenformen 132 als Reaktion auf das Eingeben des komplexen Arrays 128 in das neuronale Faltungsnetz 122 empfangen. Schließlich wer-

den in Schritt 208 die modifizierten Impulsfolgebefehle durch Integrieren der Hochfrequenzwellenform 130 und der mehreren räumlich selektiven Gradientenimpulswellenformen 132 in die anfänglichen Impulsfolgebefehle 126 aufgebaut.

[0064] Fig. 3 veranschaulicht ein weiteres Beispiel eines medizinischen Systems 300. Das medizinische System 300 ähnelt dem medizinischen System 100 in Fig. 1 mit der Ausnahme, dass es zusätzlich ein Magnetresonanztomografiesystem 302 umfasst, das durch das Rechensystem 104 gesteuert wird.

[0065] Das Magnetresonanztomografiesystem 302 umfasst einen Magneten 304. Der Magnet 304 ist ein supraleitender Magnet zylindrischen Typs mit einem runden Durchgang 306. Die Verwendung unterschiedlicher Arten von Magneten ist ebenfalls möglich; beispielsweise ist es auch möglich, sowohl einen geteilten zylindrischen Magneten als auch einen sogenannten offenen Magneten zu verwenden. Ein geteilter zylindrischer Magnet ähnelt einem standardmäßigen zylindrischen Magneten, mit dem Unterschied, dass der Kryostat in zwei Sektionen geteilt worden ist, um Zugang zu der Iso-Ebene des Magneten zu ermöglichen, solche Magneten können beispielsweise in Verbindung mit einer Strahlentherapie mit geladenen Teilchen verwendet werden. Ein offener Magnet weist zwei Magnetsektionen auf, eine über der anderen mit einem Zwischenraum dazwischen, der groß genug ist, um eine Person aufzunehmen: die Anordnung des Bereichs der zwei Sektionen ist ähnlich der einer Helmholtzspule. Offene Magnete sind beliebt, weil die Person weniger eingeschlossen ist. Im Inneren des Kryostaten des zylindrischen Magneten befindet sich eine Gruppe von supraleitenden Spulen.

[0066] Innerhalb des runden Durchgangs 306 des zylindrischen Magneten 304 befindet sich eine Bildgebungszone 308, in der das Magnetfeld stark und gleichmäßig genug ist, um eine Magnetresonanztomografie durchzuführen. Die Magnetresonanzdaten, die erfasst werden, üblicherweise für den Bereich von Interesse erfasst. Eine Person 318 ist als derart auf einer Personentrage 320 liegend gezeigt, dass sich mindestens ein Teil der Person 318 innerhalb der Bildgebungszone 308 befindet.

[0067] In dem runden Durchgang 306 des Magneten befindet sich auch ein Satz von Magnetfeldgradientenspulen 310, die zur Erfassung vorläufiger Magnetresonanzdaten verwendet werden, um magnetische Spins innerhalb der Bildgebungszone 308 des Magneten 304 räumlich zu codieren. Die Magnetfeldgradientenspulen 310 sind mit einer Stromversorgung 312 für Magnetfeldgradientenspulen verbunden. Die Magnetfeldgradientenspulen 310 sollen dabei repräsentativ sein. Üblicherweise enthalten die Magnetfeldgradientenspulen 310 drei separate

Sätze von Spulen zum räumlichen Codieren in drei orthogonalen Raumrichtungen. Eine Stromversorgung für Magnetfeldgradientenspulen liefert Strom an die Magnetfeldgradientenspulen. Der Strom, der an die Magnetfeldgradientenspulen 310 geliefert wird, wird in Abhängigkeit von der Zeit gesteuert und kann eine Rampenform aufweisen oder gepulst sein.

[0068] Benachbart zu der Bildgebungszone 308 befindet sich eine Hochfrequenzspule 314 zum Manipulieren der Ausrichtungen magnetischer Spins innerhalb der Bildgebungszone 308 und zum Empfangen von Funkübermittlungen von Spins, die ebenfalls innerhalb der Bildgebungszone 308 liegen. Die Hochfrequenzantenne kann mehrere Spulenelemente enthalten. Die Hochfrequenzantenne kann auch als Kanal oder Antenne bezeichnet werden. Die Hochfrequenzspule 314 ist mit einem Hochfrequenz-Transceiver 316 verbunden. Die Hochfrequenzspule 314 und der Hochfrequenz-Transceiver 316 können durch separate Sende- und Empfangsspulen und einen separaten Sender und Empfänger ersetzt werden. Es versteht sich, dass die Hochfrequenzspule 314 und der Hochfrequenz-Transceiver 316 repräsentativ sind. Die Hochfrequenzspule 314 soll zudem eine zweckgebundene Sendeantenne und eine zweckgebundene Empfangsantenne darstellen. Gleichermaßen kann der Transceiver 316 auch einen separaten Sender und einen separaten Empfänger darstellen. Die Hochfrequenzspule 314 kann auch mehrere Empfangs-/Sendeelemente aufweisen, und der Hochfrequenz-Transceiver 316 kann mehrere Empfangs-/Sendekanäle aufweisen. Wird zum Beispiel eine parallele Bildgebungstechnik wie z. B. SENSE durchgeführt, könnte die Hochfrequenzspule 314 mehrere Spulenelemente aufweisen.

[0069] Der Transceiver 316 und die Gradientensteuereinheit 312 sind als mit der Hardwareschnittstelle 106 des Computersystems 102 verbunden gezeigt.

[0070] Innerhalb der Bildgebungszone 308 befindet sich eine anatomische Struktur 322 der Person 318. Zu erkennen ist, dass ein Anregungssichtfeld 324 vorliegt, das modifiziert wurde, um genau zur anatomischen Struktur 322 zu passen. Das Anregungssichtfeld 324 wird durch die Auswahl des mindestens einen Anregungssichtfeldes 124 vorgegeben und wurde in das komplexe Array 128 codiert.

[0071] Der Speicher 110 ist ferner so gezeigt, dass er k-Raum-Daten 330 enthält, die durch das Magnetresonanztomografiesystem 302 erfasst wurden, indem es mit den modifizierten Impulsfolgebefehle 134 gesteuert wurde. Die k-Raum-Daten 330 beschreiben die anatomische Struktur 322. Der Speicher 110 ist ferner so gezeigt, dass er Magnetreso-

nanztomografiedaten 332 enthält, die aus den k-Raum-Daten 330 rekonstruiert wurden.

[0072] Fig. 4 zeigt ein Flussdiagramm, das ein Verfahren zum Betreiben des medizinischen Systems 300 von Fig. 3 veranschaulicht. Das Verfahren beginnt mit den Schritten 200 bis 208, die in Fig. 2 veranschaulicht sind. Nach dem Schritt 208 durchgeführt wurde, werden Schritt 400 und dann Schritt 402 durchgeführt. In Schritt 400 werden die k-Raum-Daten 330 durch Steuern des Magnetresonanztomografiesystems 302 mit den modifizierten Impulsfolgebefehle 134 erfasst. Als Nächstes werden in Schritt 402 die Magnetresonanztomografiedaten 332 aus den k-Raum-Daten 330 rekonstruiert.

[0073] Fig. 5 zeigt ein Flussdiagramm, das ein Verfahren zum Trainieren eines neuronalen Faltungsnetzes 122 veranschaulicht. Die Schritte 500, 502, 504 und 506 sind als in einer Schleife durchgeführt oder als immer wieder wiederholt gezeigt. Diese Schritte können parallel durchgeführt werden. Das heißt, alle Trainingsdaten können durchgeführt werden, indem der Schritt 500 mehrmals durchgeführt wird, dann der Schritt 502 mehrmals durchgeführt wird, nachdem die Schritte 504 und dann 506 mehrmals durchgeführt wurden. Zunächst werden in Schritt 500 die Trainings-Hochfrequenzwellenform und mehrere räumlich selektive Trainings-Gradientenimpulswellenformen unter Verwendung eines ausgewählten Anregungsimpuls-Design-Algorithmus erzeugt. Als Nächstes wird in Schritt 502 ein Modell-Anregungssichtfeld berechnet, indem die Trainings-Hochfrequenzwellenform und die räumlich selektiven Gradientenimpulse in ein Magnetresonanztomografie-Signalmodell eingegeben werden.

[0074] Danach werden in Schritt 504 eine vorwärts propagierten Hochfrequenzwellenform und die mehreren Vorwärtsausbreitungs-Gradientenimpulswellenformen empfangen, indem das Modell-Anregungssichtfeld in das neuronale Faltungsnetz eingegeben wird. Dann wird in Schritt 506 das neuronale Faltungsnetz durch Aktualisieren von Parametern des neuronalen Faltungsnetzes trainiert, indem eine Rückpropagerierung durchgeführt wird. Die Rückpropagerierung wird mit der Trainings-Hochfrequenzwellenform und der vorwärts propagierten Hochfrequenzwellenform durchgeführt. Die Rückpropagerierung wird auch mit übereinstimmenden Paaren der mehreren räumlich selektiven Trainings-Gradientenimpulswellenformen und der mehreren vorwärts propagierten räumlich selektiven Trainings-Gradientenimpulswellenformen durchgeführt.

[0075] Moderne MRT-Systeme laden in der Regel die voreingestellten HF und die zugehörigen Gradienten während klinischer Scans mit minimaler Anpassung an die spezifischen Anforderungen

jedes Scans. Beispiele können ein Mehrfachaufgaben-Multiskalen-CNN-Verfahren zum Echtzeit-Design von Anregungs-HF-Impulsen und der zugehörigen Gradienten bereitstellen, die eine räumlich zweidimensionale Selektivität erreichen. Die durch das CNN designten HF und Gradienten lagen sehr nahe bei mittels SLR designten Gegenstücken, wobei bei 400 Testdaten NRMSE $0,0075 \pm 0,0038$ betrug. Die Phantombildgebung unter Verwendung der vorhergesagten HF lag ebenfalls nahe bei der mittels SLR designten Anregung. Der Algorithmus läuft auf einer handelsüblichen Workstation innerhalb von 500 ms

[0076] Trotz der gelegentlichen Anforderungen wie z. B. Selbst-Neufokussierung oder Adiabazität besteht die häufigste Anforderung für einen zweidimensionalen Anregungsimpuls in dem Anregungsprofil in beiden Dimensionen. Das Design der HF-Impulse stellt somit angesichts des gewünschten Raum- und Frequenzprofil ein umgekehrtes Problem dar, bei dem eine Klein-Tip-Winkel-Näherungsfunktion für kleine Anregungswinkel funktioniert und für den Shinnar-Le-Roux-Algorithmus (SLR-Algorithmus) sich gezeigt hat, dass er beliebige Flip-Winkel von 0° bis 180° behandeln kann. Bei modernen MRT-Geräten werden herkömmliche HF-Impulse und die zugehörigen Gradienten üblicherweise bei der Freigabe des Systems unter Verwendung eines dieser beiden Verfahren gemäß den Hardware-Einschränkungen einschließlich des maximal zulässigen B 1-Feldes, der Gradientenfeldstärke und Gradientenfeld-Anstiegsgeschwindigkeit designt, und die resultierenden Wellenformen werden auf dem System gespeichert. Bei jedem einzelnen Scan werden einige dieser Wellenformen in das Spektrometer mit einer Skalierung hinsichtlich der Größenordnung oder zeitlich gestreckt geladen.

[0077] Obwohl das SLR-Verfahren praktisch ist und ermöglicht, dass herkömmliche Bildgebungssequenzen erfasst werden können, schränkt es den Bereich von Anwendungen ein, sodass alle Erfassungen, bei denen hochspezifische Signalanregungen vorteilhaft wären, unmöglich sind. Zum Beispiel wird klinisch eine räumlich zweidimensionale Anregung bei der Diffusionsbildgebung von Rückenmark, Brust, Bauchspeicheldrüse, Prostata und Gebärmutterhals eingesetzt, um für eine verbesserte Auflösung und eine reduzierte Geometrieverzerrung das Phasencodierungs-FOV zu begrenzen. Darüber hinaus sind unter Verwendung des SLR-Algorithmus einfache zweidimensionale Anregungen, HF- und Gradienten-Wellenformen mit vollkommen beliebigen Formen möglich, um das Gleichgewicht zwischen HF-Leistung und Dauer zu optimieren. Das Design dieser beliebigen HF- und Gradienten-Wellenformen erfordert jedoch iterative Algorithmen, die zeitaufwendig sind und die Wellenformerzeugung in Echtzeit verhindern.

[0078] In Beispielen wird ein auf neuronalen Netzen beruhendes zweidimensional selektives HF-Design offenbart, bei der sowohl HF- als auch Gradienten-Wellenformen durch ein neuronales Mehrfachaufgaben-Faltungsnetz in weniger als einer Sekunde erzeugt werden. Dieses Verfahren kann bei jedem einzelnen Scan für eine optimierte HF-Leistung unter den gegebenen Bildgebungsbedingungen einschließlich der Hardware-Einschränkungen (HF- und Gradienten-Beschränkungen und Anzahl der Übertragungskanäle), von Systemfehlern (Wirbelströme und B0-Inhomogenitäten), von bildgebungsobjektabhängigen Problemen (lokale Magnetfeldinhomogenitäten in Bezug auf B0 und B1) und von verschreibungsabhängigen Anforderungen (FOV von Interesse) ablaufen. Das selektive Anregungsverfahren mit variabler Rate (VERSE-Verfahren) (VERSE = variable rate selective excitation) wurde manchmal klinisch angewendet und sein iterativer Design-Algorithmus wurde vor Kurzem vereinfacht, löst aber nur einen Teil der oben aufgeführten Probleme. Hier vorgestellt wird das Pilotergebnis dieses umfangreichen Echtzeit-HF-Design-Projekts. Dies zeigt den Nutzen von DL als Weg zu optimierten beliebigen Anregungsimpulse in Echtzeit.

[0079] Fig. 6 veranschaulicht ein Beispiel für eine Topologie oder Struktur für das neuronale Faltungsnetz 122. Dieses neuronale Netz 122 empfängt ein Eingabe-Array 128. Es liegt eine erste Schicht 600 vor, die einen Faltungskern plus ReLU plus Max-Pooling umfasst. Dies wird in eine zweite Schicht gespeist, die einen weiteren Faltungskern plus ReLU plus Max-Pooling umfasst. Dies wird dann in einen dritten Faltungskern oder eine Schicht 604 gespeist, der bzw. die ebenfalls ReLU- und Max-Pooling-Schichten aufweist. Dies wird dann in eine Flattening-Schicht 606 gespeist, die dann zu drei separate vollständig verbundene Schichten 608, 608' und 608'' verbunden wird. Schicht 608 gibt die Hochfrequenzwellenform 130 aus. Nur die verbundenen Schichten 608', 608'' geben zwei räumlich selektive Gradientenimpulswellenformen 132 aus. Das in Fig. 6 veranschaulichte neuronale Netz 122 kann für zweidimensionale Schichten verwendet werden. Die Grundstruktur könnte für ein dreidimensionales Anregungssichtfeld wiederverwendet und modifiziert werden. Zum Beispiel könnte eine zusätzliche verbundene Schicht für die dritte räumlich selektive Gradientenimpulswellenform hinzugefügt werden, und auch die Eingabe könnte modifiziert werden, um ein komplexes dreidimensionales Array entgegenzunehmen. Die genaue Struktur der verschiedenen Faltungsschichten ist nicht wesentlich. Die Verwendung der separaten verbundenen Schichten, die mit der Flattening-Schicht 606 verbunden sind, zeigt jedoch bessere Ergebnisse als andere Arten neuronaler Netztopologien.

[0080] Beispielhafte Mehrfachaufgaben-CNN können basierend auf dem Faltungsgerüst (nachstehend CNN) aufgebaut werden. Wie vorstehend in Fig. 6 gezeigt, besteht es aus einer Eingabeschicht; drei Faltungsblöcken 600, 602, 604; einer Flattening-Schicht 606; einer vollständig verbundene Schicht 608, 608', 608''; und der Ausgabeschicht. Die Eingabeschicht nahm die realen und imaginären Komponenten des gewünschten Anregungsprofils entgegen, also eine dreidimensionale Matrix (z. B. $101 \times 101 \times 2$) mit einer Größe der dritten Dimension von 2. Der erste Faltungsblock 600 enthielt 16 Faltungskerne und einen Rectifier (ReLU), gefolgt von einem Schritt des Max-Poolings. Der zweite 602 und der dritte 604 Faltungsblock enthielten jeweils 32 und 64 Faltungskerne, jeweils gefolgt von der gleichen ReLU-Aktivierung und Max-Pooling. Dann wurde eine Flattening-Schicht 606 eingerichtet, um Daten in einen Vektor von 9216 zu transformieren, der durch eine vollständig verbundene Schicht verkettet wurde, um mit der Ausgabe übereinstimmender Abmessungen ein High-Level-Reasoning zu erhalten. Die Konvergenz des Netzes wurde mittels des minimierten Verlusts bewertet, der als Quadratwurzel des mittleren quadratischen Fehlers (root mean square error, RMSE) gemessen wurde. Die Parameter des Netzes wurden so lange angepasst, bis die optimale Netzeinstellung erreicht wurde.

[0081] Die HF-, GRS- und GRF-Wellenformen wurden als drei Kanäle eines HF-Impulses betrachtet, um das Anregungsprofil zu erzeugen, und es wurde eine Mehraufgaben-Lerntechnik genutzt, wobei die Flattening-Schicht, die gemeinsamen Merkmale aufweist, mit drei vollständig verbundenen Schichten parallel verkettet wurde. Außerdem wurden die Faltungskerne an mehrere Größen von $1 \times 1,3 \times 3,5 \times 5$ und 7×7 angepasst, ähnlich der Strategie beim Inception-Modul. Die Faltung mit mehreren Kerngrößen erfasste die Merkmalsinformationen im Vergleich zu herkömmlichen Faltungsvorgängen mit anderen Skalen, und vermied somit das mögliche Problem einer Überpassung, wenn ein tieferes Netz verwendet wird.

[0082] In den Beispielen kann eine oder können mehrere der folgenden Merkmale enthalten sein:

- 1) Ein ausreichend großer Satz von 2D-HF-Impulsen wurde unter Verwendung des herkömmlichen SLR-Algorithmus zum Trainieren des CNN erzeugt.
- 2) Das Anregungsprofil jedes Impulses wurde über Bloch-Simulation zum Trainieren des CNN erzeugt.
- 3) Eine speziell angepasste neuronale Faltungsnetzarchitektur mit optimierten Schichten und Verbindungen.

4) Das Netz wurde mit den erzeugten Anregungsprofilen als Eingaben und den entsprechenden HF-Impulsen als Ausgaben trainiert.

5) Das gewünschte Anregungsprofil wurde in das trainierte Netz eingegeben, um die durch das CNN designte HF zu erhalten.

[0083] Fig. 7 veranschaulicht die Wirksamkeit der Hochfrequenzwellenform 130 und mehrerer räumlich selektiver Gradientenimpulsformen 132, die durch das neuronale Faltungsnetz 122 bereitgestellt werden. In dieser Figur sind die beispielhafte Hochfrequenzwellenform 130 und mehrere räumlich selektive Gradientenimpulsformen 132 oben veranschaulicht. Diese Wellenformen 130, 132 wurden verwendet, um das Anregungsprofil 700 in der Mitte bereitzustellen. Dies ähnelt sehr dem realen Anregungssichtfeld, das nachstehend im Kasten 702 bildlich dargestellt ist.

[0084] Des Weiteren kann die vorhergesagte HF das Anregungsprofil praktisch sehr nah an dem gewünschten FOV-Anregungsprofil bereitstellen. Dies wurde durch Phantombildgebung an dem klinischen Scanner MR 3.0 T getestet.

[0085] Die Wirksamkeit des neuronalen Faltungsnetzes wird ferner unter Verwendung von Fig. 8 und Fig. 9 veranschaulicht. Fig. 8 zeigt ein gewünschtes Anregungssichtfeld 800. In Fig. 9 zeigt Fig. 900 das Anregungssichtfeld, das sich aus der Verwendung des neuronalen Faltungsnetzes ergibt. Auf der rechten Seite zeigt der Kasten 902 das Anregungssichtfeld, das sich aus dem mit LSR designten HF-Impuls ergibt. Es ist ersichtlich, dass das neuronale Faltungsnetz sehr gut mit dem mit LSR designten HF-Impuls übereinstimmt.

[0086] In den Beispielen kann eine oder können mehrere der folgenden Merkmale enthalten sein:

- 1) Ein CNN-basiertes HF-Design für sowohl HF- als auch Gradienten-Wellenformen.
- 2) Mehrfachaufgaben-Technologie wird mit einer gemeinsamen Schicht verwendet, um die HF-Wellenform und die zwei Gradienten zu verbinden.
- 3) Multiskalen-Kerne in dem CNN wurden verwendet, um die Details unterschiedlicher Skalen in den Eingabe-FOV-Bildbereich zu erfassen.
- 4) Zur HF-Erzeugung des Trainingsdatensatzes wurde eine echo-planare Bahn ausgewählt.

[0087] Diese Technik kann möglicherweise durch Experiment beim Scannen und Erfassen von Bildern erkannt werden.

[0088] Eine Anwendung zur räumlich zweidimensionalen oder dreidimensionalen Anregung bei der Bild-

gebung von Gehirn, Rückenmark, Kopf-Hals-Tumoren, Brust, Bauchspeicheldrüse und Prostata ist möglich. Sie ermöglicht eine verbesserte räumliche Auflösung und eine reduzierte Geometrieverzerrung bei der diffusionsgewichteten Bildgebung.

[0089] Zwar wurde die Erfindung im Detail in den Zeichnungen und der vorstehenden Beschreibung veranschaulicht und beschrieben, eine derartige Darstellung und Beschreibung sind jedoch als veranschaulichend oder beispielhaft und nicht als einschränkend zu betrachten; die Erfindung ist nicht auf die offenbarten Ausführungsformen beschränkt.

[0090] Weitere Variationen der offenbarten Ausführungsformen können durch Fachleute, die die beanspruchte Erfindung umsetzen, anhand eines Studiums der Zeichnungen, der Offenbarung und der beiliegenden Ansprüche gefolgert und bewirkt werden. In den Ansprüchen schließt das Wort „umfassen“ andere Elemente oder Schritte nicht aus, und der unbestimmte Artikel „ein“, „eine“ oder „eines“ schließt eine Vielzahl nicht aus. Ein einzelner Prozessor oder eine andere Einheit kann die Funktionen mehrerer in den Ansprüchen angegebener Elemente erfüllen. Die bloße Tatsache, dass bestimmte Maßnahmen in voneinander unterschiedlichen abhängigen Ansprüchen angegeben sind, bedeutet nicht, dass eine Kombination dieser Maßnahmen nicht vorteilhaft verwendet werden kann. Ein Computerprogramm kann auf einem geeigneten Medium wie z. B. einem optischen Speichermedium oder einem Halbleitermedium, das zusammen mit oder als Teil anderer Hardware geliefert wird, gespeichert/ausgeteilt werden, kann jedoch auch in anderen Formen ausgeteilt werden, wie z. B. über das Internet oder andere kabelgebundene oder kabellose Telekommunikationssysteme. Jegliche Bezugszeichen in den Ansprüchen sind nicht als Einschränkungen des Schutzzumfangs auszulegen.

LISTE DER BEZUGSZEICHEN

100	medizinisches System
102	Computer
104	Rechensystem
106	optionale Hardwareschnittstelle
108	optionale Benutzerschnittstelle
110	Speicher
120	maschinenausführbare Anweisungen
122	neuronales Faltungsnetz
124	Auswahl mindestens eines Anregungssichtfeldes
126	anfängliche Impulsfolgebefehle
128	komplexes Array

130	Hochfrequenzwellenform	400	Die k-Raum-Daten durch Steuern des Magnetresonanztomografiesystems mit den modifizierten Impulsfolgebefehlen erfassen
132	mehrere räumlich selektive Gradientenimpulswellenformen		
134	modifizierte Impulsfolgebefehle	402	Magnetresonanzbilddaten aus den k-Raum-Daten rekonstruieren
200	Eine Auswahl des mindestens einen Anregungssichtfeldes empfangen	500	Erzeugen einer Trainings-Hochfrequenzwellenform und mehrerer räumlich selektiver Trainings-Gradientenimpulswellenformen unter Verwendung eines selektiven Anregungsimpuls-Design-Algorithmus
202	Anfängliche Impulsfolgebefehle empfangen, die zum derartigen Steuern eines Magnetresonanztomografiesystems konfiguriert sind, dass es k-Raum-Daten erfasst, die eine Person beschreiben	502	Ein modelliertes Anregungssichtfeld durch Eingeben der Trainings-Hochfrequenzwellenform und mehrerer räumlich selektiver Trainings-Gradientenimpulswellenformen in ein Magnetresonanztomografie-Signalmodell berechnen
204	Das komplexe Array unter Verwendung des mindestens einen Anregungssichtfeldes codieren		
206	Die Hochfrequenzwellenform und die mehreren räumlich selektiven Gradientenimpulswellenformen als Reaktion auf das Eingeben des komplexen Arrays in das neuronale Netz empfangen	504	Eine vorwärts propagierte Hochfrequenzwellenform und mehrere vorwärts propagierte räumlich selektive Trainings-Gradientenimpulswellenformen durch Eingeben des modellierten Anregungssichtfeldes in das neuronale Faltungsnetz empfangen
208	Die modifizierten Impulsfolgebefehle durch Modifizieren der anfänglichen Impulsfolgebefehle mit der Hochfrequenzwellenform und den mehreren räumlich selektiven Gradientenimpulswellenformen so aufbauen, dass die Impulsfolgebefehle konfiguriert sind, um das Magnetresonanztomografie-system derart zu steuern, dass es die k-Raum-Daten aus dem mindestens einen Anregungssichtfeld erfasst	506	Parameter des neuronalen Faltungsnetzes durch Durchführen von Rückpropagerierung mit der Trainings-Hochfrequenzwellenform und der vorwärts propagierten Hochfrequenzwellenform und mit übereinstimmenden Paaren der mehreren räumlich selektiven Trainings-Gradientenimpulswellenformen und der mehreren vorwärts propagierten räumlich selektiven Trainings-Gradientenimpulswellenformen aktualisieren
300	medizinisches System		
302	Magnetresonanztomografiesystem		
304	Magnet		
306	runder Durchgang des Magneten	600	Faltungskern mit ReLu- und Max-Pooling-Schichten
308	Bildgebungszone		
310	Magnetfeldgradientenspulen	602	Faltungskern mit ReLu- und Max-Pooling-Schichten
312	Stromversorgung für Magnetfeldgradientenspulen	604	Faltungskern mit ReLu- und Max-Pooling-Schichten
314	Hochfrequenzspule		
316	Transceiver	606	Flattening-Schicht
318	Person	608	vollständig verbundene Schicht
320	Personen-trage	608'	vollständig verbundene Schicht
322	anatomische Struktur	608"	vollständig verbundene Schicht
324	Anregungssichtfeld	700	erzeugtes Anregungssichtfeld
330	k-Raum-Daten	702	reales Anregungssichtfeld
332	Magnetresonanztomografiedaten	800	gewünschtes Anregungssichtfeld

- 900 Anregungssichtfeld, das aus dem CNN resultiert
- 902 Anregungssichtfeld, das aus der Verwendung des mit LSR designten HF-Impulses resultiert

Patentansprüche

1. Medizinisches System (100, 300), umfassend:
- einen Speicher (110), der maschinenausführbare Anweisungen (120) und ein neuronales Faltungsnetz (122) speichert, wobei das neuronale Faltungsnetz konfiguriert ist, um als Eingabe ein komplexes Array (128) zu empfangen, das eine Auswahl (124) mindestens eines Anregungssichtfeldes (324, 900) codiert, wobei das neuronale Faltungsnetz konfiguriert ist, um eine Hochfrequenzwellenform (130) und mehrere räumlich selektive Gradientenimpulswellenformen (132) auszugeben, wobei das neuronale Faltungsnetz ein neuronales Mehrfachaufgaben-Faltungsnetz mit einer ersten Ausgabe für die Hochfrequenzwellenform und einer separaten Ausgabe für jede der mehreren räumlich selektiven Gradientenimpulswellenformen ist; und
 - ein Rechensystem (104), wobei die Ausführung der maschinenausführbaren Anweisungen das Rechensystem veranlasst zum:
 - Empfangen (200) der Auswahl des mindestens einen Anregungssichtfeldes;
 - Empfangen (202) von anfänglichen Impulsfolgebefehlen (126), die zum derartigen Steuern eines Magnetresonanztomographiesystems (302) konfiguriert sind, dass es k-Raum-Daten (330) erfasst, die eine Person (318) beschreiben;
 - Codieren (204) des komplexen Arrays unter Verwendung des mindestens einen Anregungssichtfeldes;
 - Empfangen (206) der Hochfrequenzwellenform und der mehreren räumlich selektiven Gradientenimpulswellenformen als Reaktion auf das Eingeben des komplexen Arrays in das neuronale Faltungsnetz; und
 - Aufbauen (208) modifizierter Impulsfolgebefehle (134) durch Modifizieren der anfänglichen Impulsfolgebefehle mit der Hochfrequenzwellenform und den mehreren räumlich selektiven Gradientenimpulswellenformen, sodass die Impulsfolgebefehle dazu konfiguriert sind, das Magnetresonanztomographiesystem dazu zu steuern, die k-Raum-Daten aus dem mindestens einen Anregungssichtfeld zu erfassen.
2. Medizinisches System nach Anspruch 1, wobei das neuronale Faltungsnetz durch das Rechensystem trainiert wird, das wiederholt die folgenden Schritte durchführt:
- Erzeugen (500) einer Trainings-Hochfrequenzwellenform und mehrerer räumlich selektiver Trainings-Gradientenimpulswellenformen unter Verwendung eines selektiven Anregungsimpuls-Design-Algorithmus;

- Berechnen (502) eines modellierten Anregungssichtfeldes durch Eingeben der Trainings-Hochfrequenzwellenform und mehrerer räumlich selektiver Trainings-Gradientenimpulswellenformen in ein Magnetresonanztomografie-Signalmodell;
- Empfangen (504) einer vorwärts propagierten Hochfrequenzwellenform und mehrerer vorwärts propagierter räumlich selektiver Trainings-Gradientenimpulswellenformen durch Eingeben des modellierten Anregungssichtfeldes in das neuronale Faltungsnetz;
- Aktualisieren (506) von Parametern des neuronalen Faltungsnetzes durch Durchführen von Rückpropagerierung mit der Trainings-Hochfrequenzwellenform und der vorwärts propagierten Hochfrequenzwellenform und mit übereinstimmenden Paaren der mehreren räumlich selektiven Trainings-Gradientenimpulswellenformen und der mehreren vorwärts propagierten räumlich selektiven Trainings-Gradientenimpulswellenformen.

3. Medizinisches System nach Anspruch 2, wobei der selektive Anregungsimpuls-Design-Algorithmus eines aus den Folgenden ist: ein Shinnar-Le-Roux-Algorithmus, ein Klein-Flip-Winkel-Näherungsalgorithmus und ein numerischer optimaler Steueralgorithmus.

4. Medizinisches System nach Anspruch 2 oder 3, wobei das Magnetresonanztomografie-Signalmodell eine numerische Lösung der Bloch-Gleichungen ist.

5. Medizinisches System nach einem der vorstehenden Ansprüche, wobei die Impulsfolgebefehle zum Erfassen der k-Raum-Daten gemäß einem Magnetresonanztomografieprotokoll mit paralleler Bildgebung konfiguriert sind.

6. Medizinisches System nach einem der vorstehenden Ansprüche, wobei die Ausführung der maschinenausführbaren Anweisungen das Rechensystem ferner veranlasst zum:

- Empfangen eines Magnetresonanztomografie-Untersuchungsbildes;
- Darstellen des Magnetresonanztomografie-Untersuchungsbildes auf einer Anzeige; und
- Empfangen der Auswahl des mindestens einen Anregungssichtfeldes als Reaktion auf das Anzeigen des Magnetresonanztomografie-Untersuchungsbildes, wobei die Auswahl des mindestens einen Anregungssichtfeldes innerhalb des Magnetresonanztomografie-Untersuchungsbildes erfolgt.

7. Medizinisches System nach einem der vorstehenden Ansprüche, wobei die Auswahl des mindestens einen Sichtfeldes von einem aus den Folgenden empfangen wird: einem automatisierten Bildsegmentierungsalgorithmus, von einer Benutzerschnittstelle und Kombinationen davon.

8. Medizinisches System nach einem der vorstehenden Ansprüche, wobei die mehreren räumlich selektiven Gradientenimpulswellenformen zwei räumlich selektive Gradientenimpulswellenformen sind und wobei jedes des mindestens einen Anregungssichtfeldes ein zweidimensionales Anregungssichtfeld ist.

9. Medizinisches System nach einem der Ansprüche 1 bis 7, wobei die mehreren räumlich selektiven Gradientenimpulswellenformen drei räumlich selektive Gradientenimpulswellenformen sind und wobei jedes des mindestens einen Anregungssichtfeldes ein dreidimensionales Anregungssichtfeld ist.

10. Medizinisches System nach einem der vorstehenden Ansprüche, wobei jedes des mindestens einen Anregungssichtfeldes eine beliebige Form aufweist und/oder räumlich getrennt ist.

11. Medizinisches System nach einem der vorstehenden Ansprüche, wobei das neuronale Faltungsgnetz eines aus den Folgenden ist: ein neuronales Multiskalen-Faltungsgnetz und ein neuronales U-Net-Faltungsgnetz.

12. Medizinisches System nach einem der vorstehenden Ansprüche, wobei das medizinische System das Magnetresonanztomografiesystem umfasst, wobei das Ausführen der maschinenausführbaren Anweisungen das Rechensystem ferner veranlasst zum:

- Erfassen (400) von k-Raum-Daten (330) durch Steuern des Magnetresonanztomografiesystems mit den modifizierten Impulsfolgebefehlen; und
- Rekonstruieren (402) von Magnetresonanztomografiedaten (332) aus den k-Raum-Daten.

13. Computerprogramm, umfassend maschinenausführbare Anweisungen (120) zur Ausführung durch ein Rechensystem (104), das ein medizinisches System steuert, wobei das Computerprogramm ferner ein neuronales Faltungsgnetz (122) umfasst, das konfiguriert ist, um als Eingabe ein komplexes Array (128) zu empfangen, das eine Auswahl (124) mindestens eines Anregungssichtfeldes (324, 900) codiert, wobei das neuronale Faltungsgnetz konfiguriert ist, um eine Hochfrequenzwellenform (130) und mehrere räumlich selektive Gradientenimpulswellenformen (132) auszugeben, wobei das neuronale Faltungsgnetz ein neuronales Mehrfachaufgaben-Faltungsgnetz mit einer ersten Ausgabe für die Hochfrequenzwellenform (130) und einer separaten Ausgabe für jede der mehreren räumlich selektiven Gradientenimpulswellenformen ist, wobei die Ausführung der maschinenausführbaren Anweisungen das Rechensystem veranlasst zum:

- Empfangen (200) der Auswahl des mindestens

einen Anregungssichtfeldes;

- Empfangen (202) von anfänglichen Impulsfolgebefehlen (126), die zum derartigen Steuern eines Magnetresonanztomografiesystems (302) konfiguriert sind, dass es k-Raum-Daten (330) erfasst, die eine Person (318) beschreiben;

- Codieren (204) des komplexen Arrays unter Verwendung des mindestens einen Anregungssichtfeldes;

- Empfangen (206) der Hochfrequenzwellenform und der mehreren räumlich selektiven Gradientenimpulswellenformen als Reaktion auf das Eingeben des komplexen Arrays in das neuronale Faltungsgnetz; und

- Aufbauen (208) modifizierter Impulsfolgebefehle (134) durch Modifizieren der anfänglichen Impulsfolgebefehle mit der Hochfrequenzwellenform und den mehreren räumlich selektiven Gradientenimpulswellenformen, sodass die Impulsfolgebefehle dazu konfiguriert sind, das Magnetresonanztomografiesystem dazu zu steuern, die k-Raum-Daten aus dem mindestens einen Anregungssichtfeld zu erfassen.

14. Verfahren zur medizinischen Bildgebung unter Verwendung eines neuronalen Faltungsgnetzes (122), wobei das neuronale Faltungsgnetz konfiguriert ist, um als Eingabe ein komplexes Array (128) zu empfangen, das eine Auswahl (200) mindestens eines Anregungssichtfeldes (324, 900) codiert, wobei das neuronale Faltungsgnetz konfiguriert ist, um eine Hochfrequenzwellenform (130) und mehrere räumlich selektive Gradientenimpulswellenformen (132) auszugeben, wobei das neuronale Faltungsgnetz ein neuronales Mehrfachaufgaben-Faltungsgnetz mit einer ersten Ausgabe für die Hochfrequenzwellenform (130) und einer separaten Ausgabe für jede der mehreren räumlich selektiven Gradientenimpulswellenformen ist, wobei das Verfahren umfasst:

- Empfangen (200) der Auswahl des mindestens einen Anregungssichtfeldes;

- Empfangen (202) von anfänglichen Impulsfolgebefehlen, die zum derartigen Steuern eines Magnetresonanztomografiesystems (302) konfiguriert sind, dass es k-Raum-Daten (330) erfasst, die eine Person (318) beschreiben;

- Codieren (204) des komplexen Arrays unter Verwendung des mindestens einen Anregungssichtfeldes;

- Empfangen (206) der Hochfrequenzwellenform und der mehreren räumlich selektiven Gradientenimpulswellenformen als Reaktion auf das Eingeben des komplexen Arrays in das neuronale Faltungsgnetz; und

- Aufbauen (208) modifizierter Impulsfolgebefehle (134) durch Modifizieren der anfänglichen Impulsfolgebefehle mit der Hochfrequenzwellenform und den mehreren räumlich selektiven Gradientenimpulswellenformen, sodass die Impulsfolgebefehle dazu konfiguriert sind, das Magnetresonanztomografiesys-

tem dazu zu steuern, die k-Raum-Daten aus dem mindestens einen Anregungssichtfeld zu erfassen.

15. Verfahren zum Trainieren eines neuronalen Faltungsnetzes (122), wobei das Verfahren das wiederholte Durchführen der folgenden Schritte umfasst:

- Erzeugen (500) einer Trainings-Hochfrequenzwellenform und mehrerer räumlich selektiver Trainings-Gradientenimpulswellenformen unter Verwendung eines selektiven Anregungsimpuls-Design-Algorithmus;
- Berechnen (502) eines modellierten Anregungssichtfeldes durch Eingeben der Trainings-Hochfrequenzwellenform und mehrerer räumlich selektiver Trainings-Gradientenimpulswellenformen in ein Magnetresonanztomografie-Signalmodell;
- Empfangen (504) einer vorwärts propagierten Hochfrequenzwellenform und mehrerer vorwärts propagierter räumlich selektiver Trainings-Gradientenimpulswellenformen durch Eingeben des modellierten Anregungssichtfeldes in das neuronale Faltungsnetz;
- Aktualisieren (506) von Parametern des neuronalen Faltungsnetzes durch Durchführen von Rückpropagerierung mit der Trainings-Hochfrequenzwellenform und der vorwärts propagierten Hochfrequenzwellenform und mit übereinstimmenden Paaren der mehreren räumlich selektiven Trainings-Gradientenimpulswellenformen und der mehreren vorwärts propagierten räumlich selektiven Trainings-Gradientenimpulswellenformen.

Es folgen 8 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

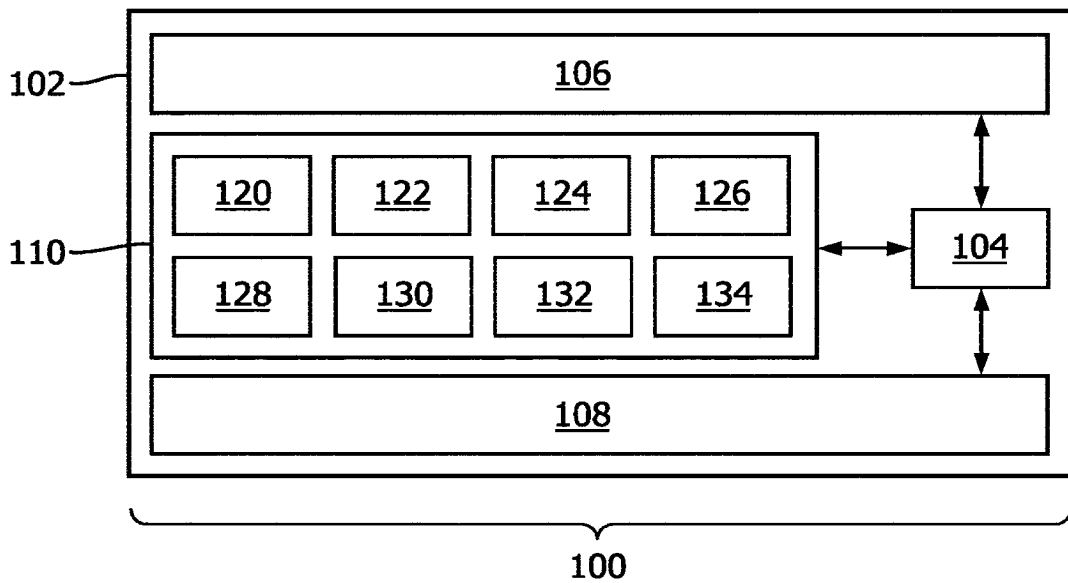


FIG. 1

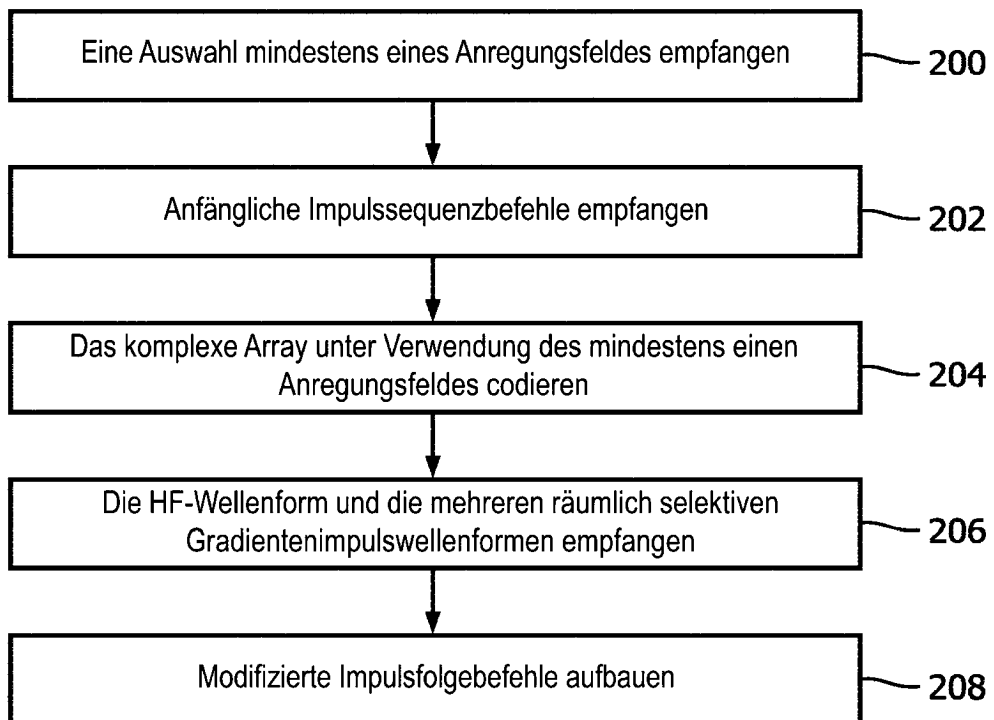


FIG. 2

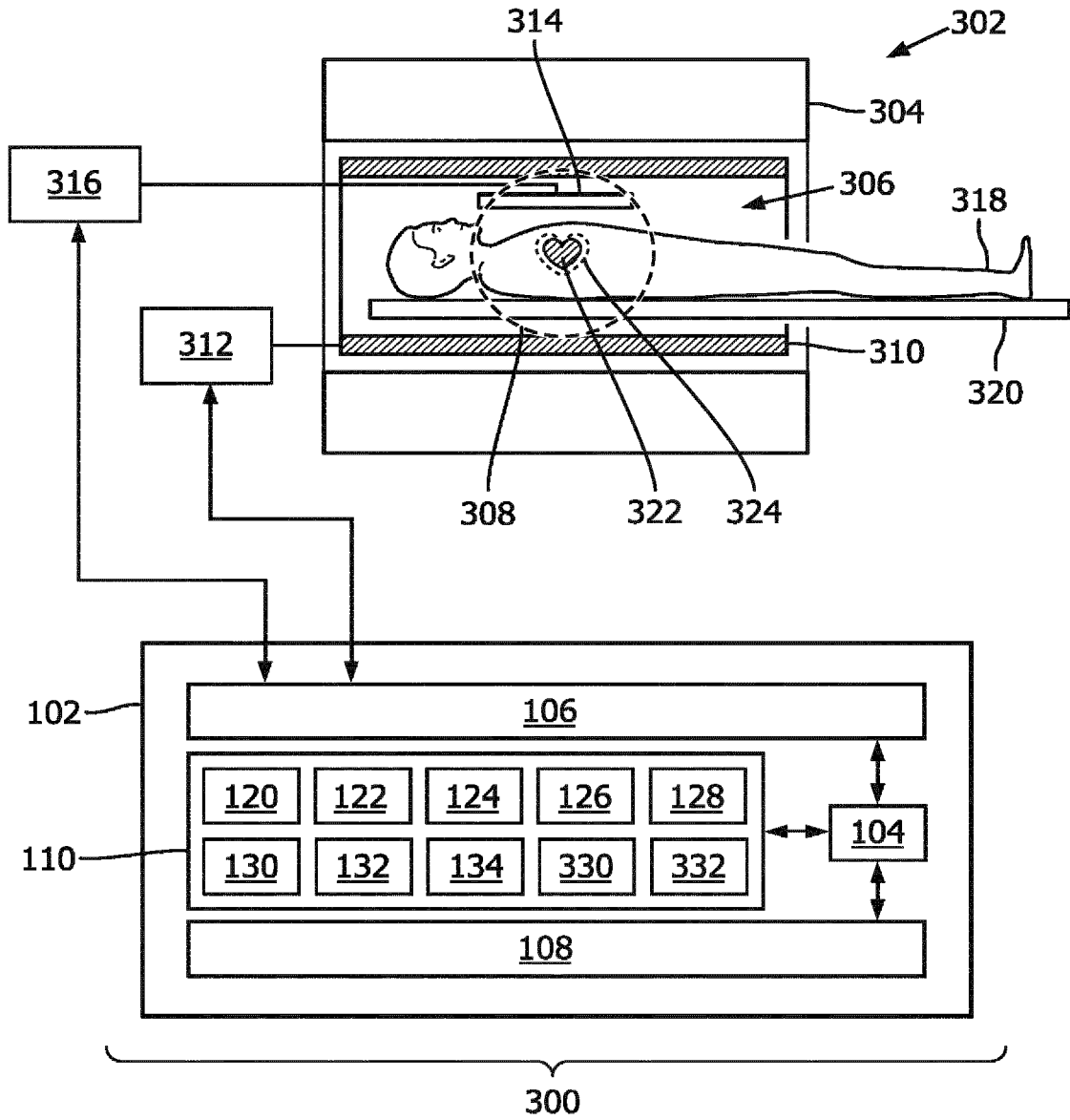


FIG. 3

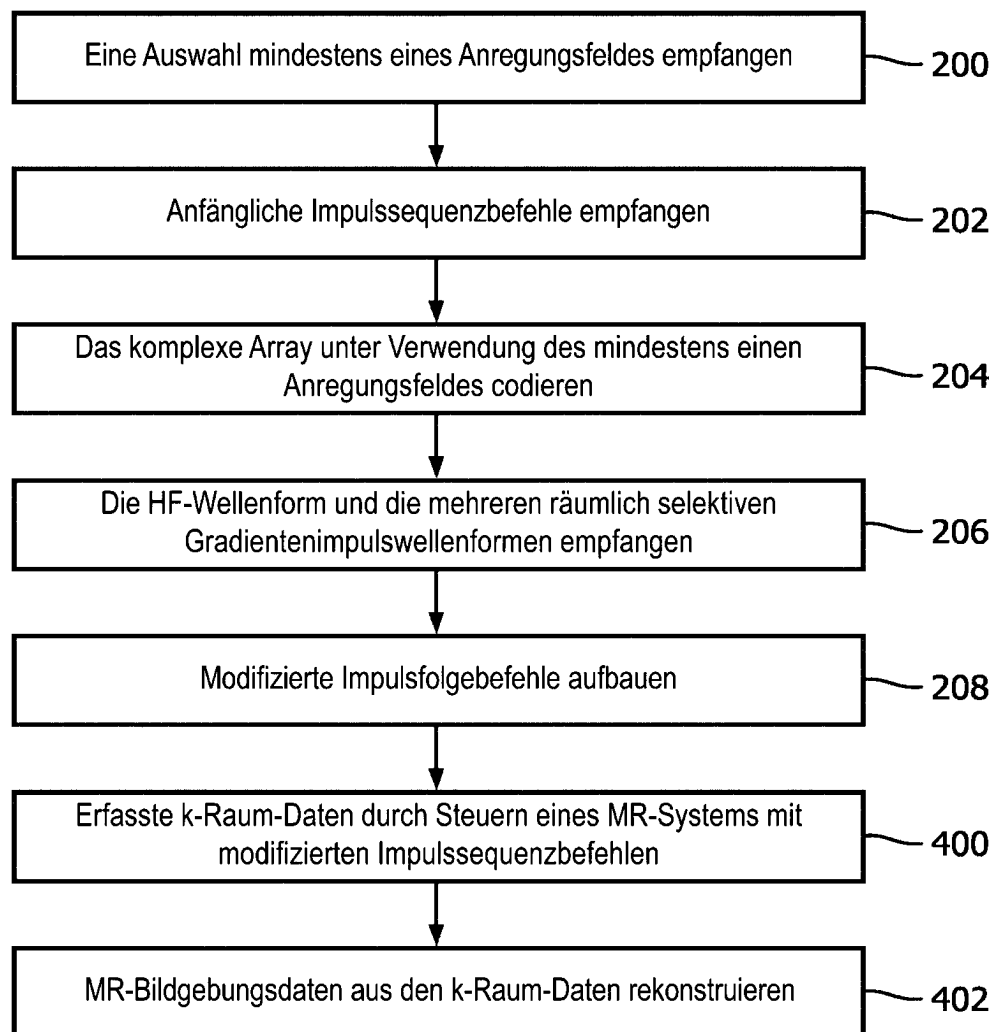


FIG. 4

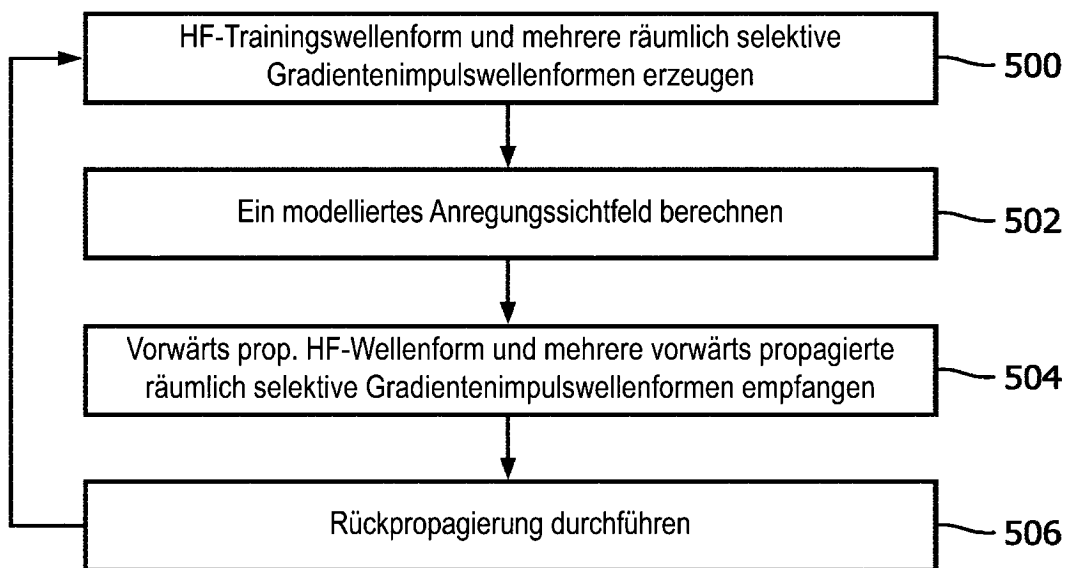


FIG. 5

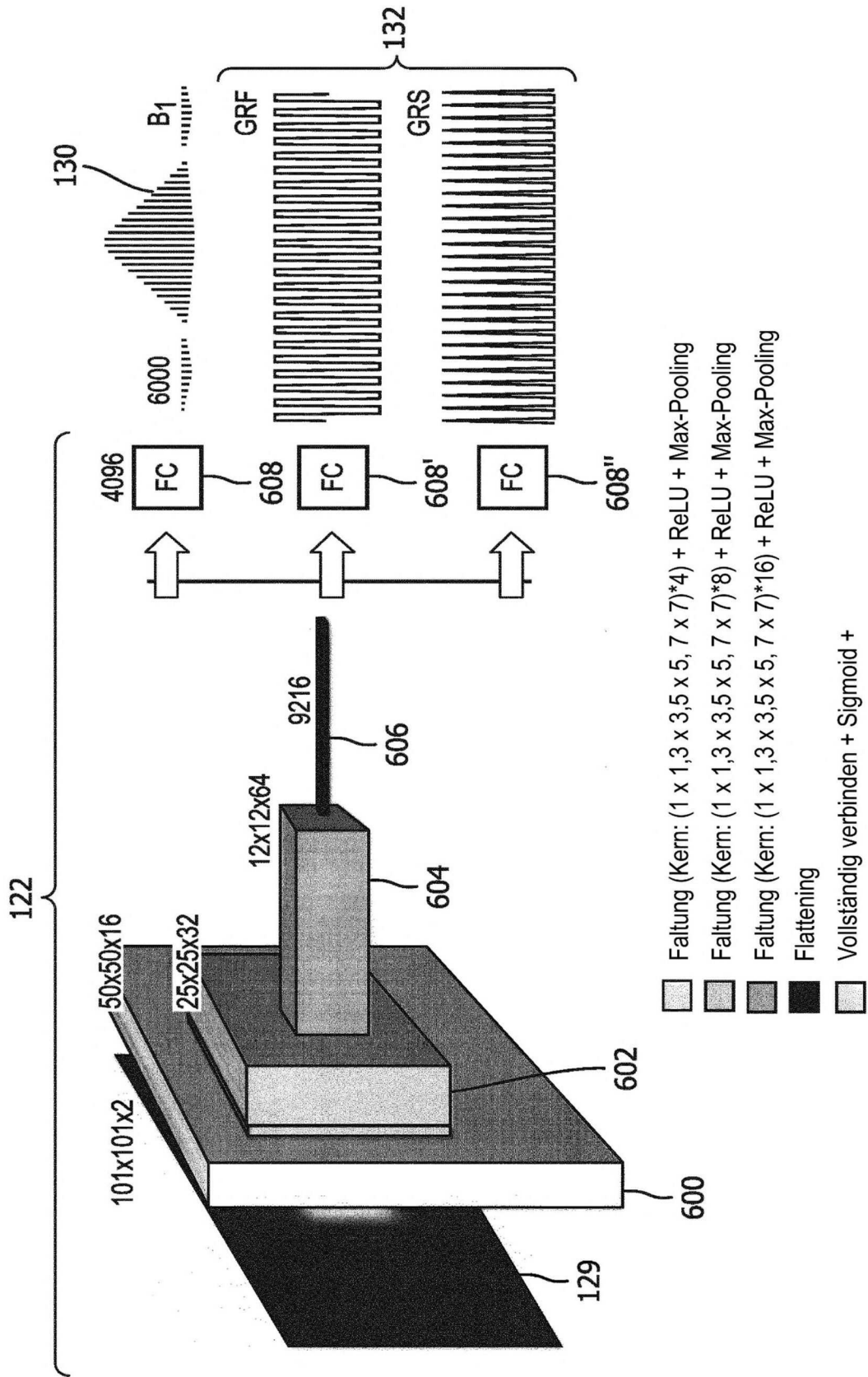


FIG. 6

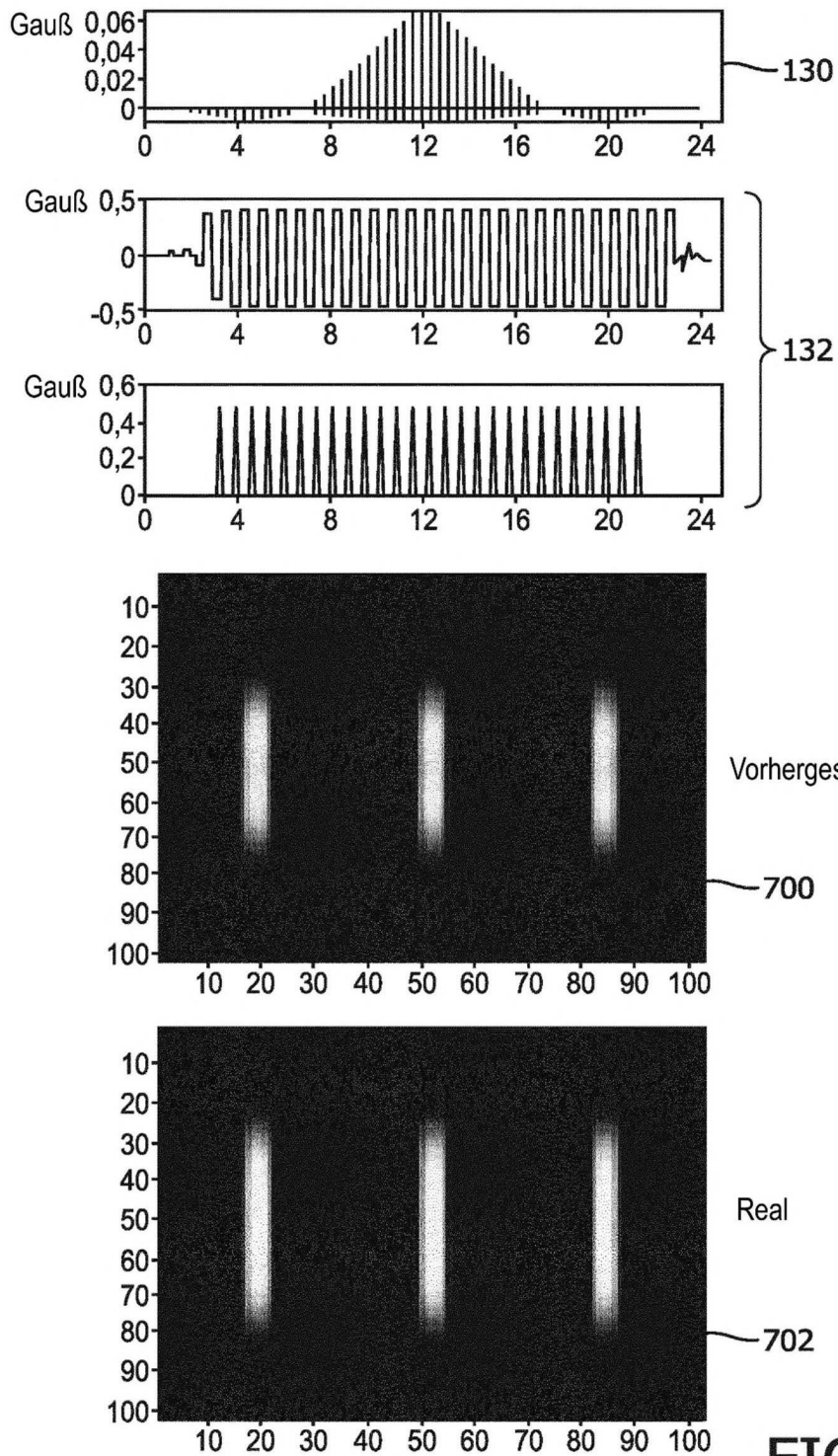


FIG. 7

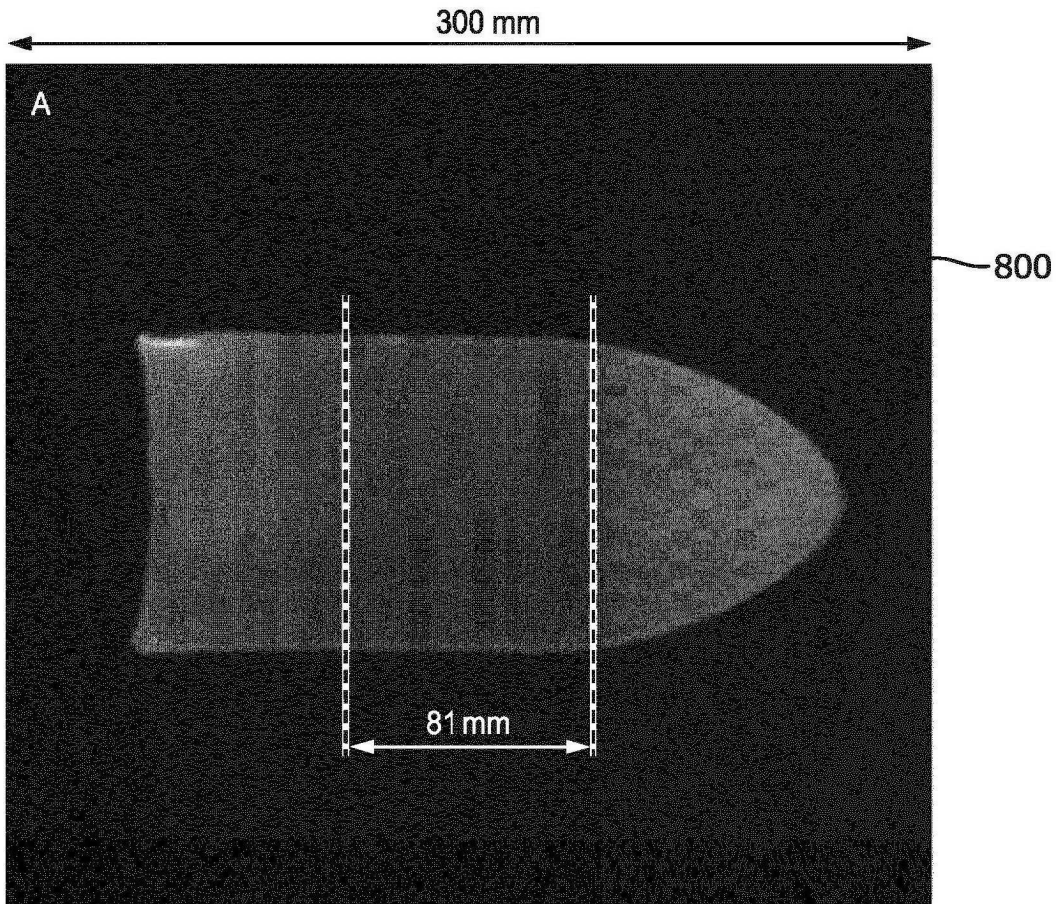


FIG. 8

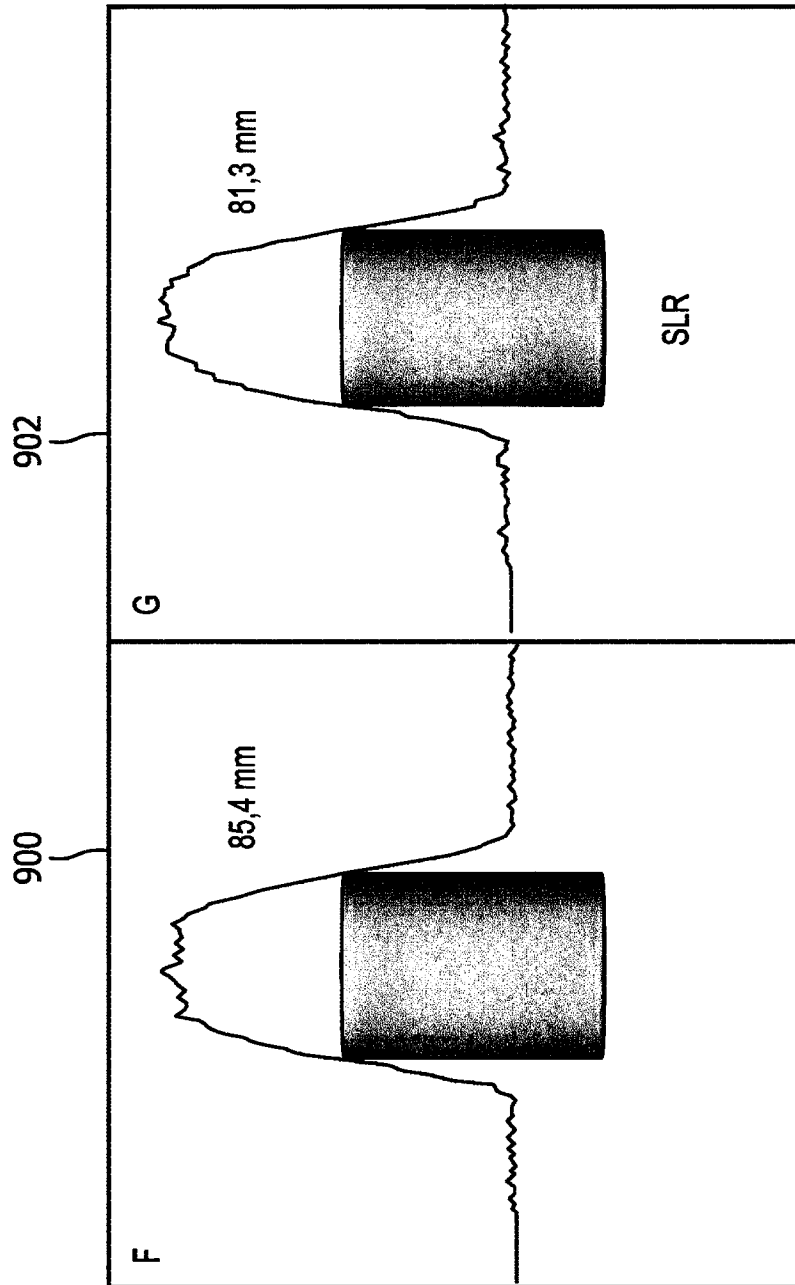


FIG. 9