



Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg
Medizinische Fakultät Mannheim
Dissertations-Kurzfassung

Minimizing the Adverse Effects of Electric Fields in Magnetic Resonance Imaging using Optimized Gradient Encoding and Peripheral Nerve Models

Autor: Mathias Davids
Institut / Klinik: Computerunterstützte Klinische Medizin
Doktorvater: Prof. Dr. L. R. Schad

Die Magnetresonanztomographie (MRT) ist eine bedeutende Bildgebungsmodalität in Klinik und Forschung. Die MRT-Forschung strebt zu höheren Feldstärken zur Verbesserung des Signal-Rausch-Verhältnis sowie zu schnellen Anregungs- und Auslesetechniken mittels räumlich selektiver Radiofrequenzpulse (RF), um anatomische Regionen flexibler anzuregen und die Signalakquise zu beschleunigen. Beide Ansätze sind sehr erfolgreich, erfordern jedoch das immer schnellere Schalten immer stärkerer Magnetfelder, namentlich der RF-Felder (Anregung) und der Gradientenfelder (Ortskodierung). Die Technologie zur Erzeugung/Modulation dieser Felder ist soweit fortgeschritten, dass deren Nutzbarkeit durch Interaktionen mit dem menschlichen Körper stark eingeschränkt ist. Das schnelle Schalten der Gradientenfelder induziert elektrische Felder, die periphere Nerven stimulieren können (PNS), was zu leichten Empfindungen bis hin zu Schmerzen und Herzrhythmusstörungen führen kann. Die RF-Felder erzeugen hochfrequente elektrische Felder die das Gewebe stark erwärmen und schädigen können. In dieser Arbeit werden Methoden entwickelt, um die Effekte ungewünschter elektrischer Felder in der MR zu modellieren, vorherzusagen, und zu reduzieren. Die Gewebeerwärmung bei räumlich-selektiven Anregungen kann erheblich verringert werden durch die Optimierung der Ortskodierung sowie der RF-Pulse. Die unerwünschten Effekte der Gradientenfelder können vermindert werden durch optimierte Gradientenverläufe sowie durch ein neuartiges Verfahren das mittels elektromagnetischer Feldsimulationen und neurodynamischer Modelle PNS vorhersagen und charakterisieren kann. Im ersten Teil der Arbeit wird ein Verfahren entwickelt zur Generierung zeit-optimaler Gradientenverläufe, die die Leistungsfähigkeit des Gradientensystems optimal ausnutzen. Die Gradientenverläufe werden derart generiert, dass die resultierenden Trajektorien vordefinierte Stützpunkte im k-Raum in möglichst kurzer Zeit abtasten. Durch die Verwendung semi-analytischer Gradientenverläufe (stückweise linear) ist das Verfahren sehr schnell und numerisch stabil. Die Trajektorien tasten den k-Raum sehr effizient ab, ohne das Gradientensystem zu überlasten. Im Vergleich mit Standard-Verfahren sind die erzeugten Gradientenverläufe im Mittel 9.2% kürzer. Das Berechnungsverfahren ist bis zu 100-fach schneller und nicht anfällig für numerischen Instabilitäten wie Gradientenoszillationen. Im zweiten Teil der Arbeit wird eine Methode vorgestellt, die Gradientenverläufe und RF-Pulse simultan optimiert und dadurch sehr kurze, akkurate, und robuste 3-D selektive Anregungspulse mit minimaler Gewebeerwärmung generiert. Die Optimierung der Gradientenverläufe basiert auf einer effizienten Beschreibung der Trajektorien durch Formparameter die sich numerisch sehr gut optimieren lassen. Während jeder Iteration der Formparameter-Optimierung wird ein Least-Squares RF-Puls berechnet. Mittels optimierter 3-D "Cross" ("Shells") Trajektorien wurden würfelförmige (bzw. hirnformige) Zielvolumen mit lediglich 3.4% (6.2%) NRMSE in < 5 ms mit einem 7 Tesla Scanner, acht Anregungskanälen sowie einem klinischen Gradientensystem angeregt ($G_{\max} = 40 \text{ mT/m}$, $S_{\max} = 150 \text{ T/m/s}$). Das Einbeziehen statischer Feldvariationen in die Pulsoptimierung hatte einen großen Einfluss auf die Trajektorien. Im letzten Teil der Arbeit wird ein Verfahren entwickelt, das PNS Schwellwerte für realistische Spulengeometrien simuliert und damit erstmals eine direkte Einbeziehung von PNS in den Designprozess der Spule ermöglicht. Das Verfahren besteht aus einem detaillierten Körpermodell zur Simulation der induzierten elektrischen Felder, einem Atlas der peripheren Nerven sowie einem neurodynamischen Modell zur Vorhersage der Nervenreaktionen auf die elektrischen Felder. Mit diesem Modell konnten gemessene PNS Schwellwerte von zwei Bein/Arm Solenoidspulen sowie von drei kommerziellen aktiv-geschirmten Ganzkörper MR-Gradientenspulen reproduziert werden. Dieses Simulationsverfahren erlaubt es, mögliche PNS durch MR-Gradientenspulen während der Entwurfsphase zu evaluieren, ohne teure Prototypspulen zu bauen.