

学校编码: 10384

分类号_____密级_____

学号: 23320141153236

UDC_____

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

基于全部场反演的单步磁化率

重建方法

Magnetic Susceptibility Reconstruction via
Single-Step Inversion of Total Field

陈 曦

指导老师姓名: 蔡聪波

专业名称: 信号与信息处理

论文提交日期: 2017 年 月

论文答辩日期: 2017 年 月

学位授予日期: 2017 年 月

答辩委员会主席: _____

评 阅 人: _____

2017 年 月

厦门大学博硕士学位论文摘要库

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下，独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果，均在文中以适当方式明确标明，并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范（试行）》。

另外，该学位论文为厦门大学信息科学与技术学院智能数据分析与处理课题（组）的研究成果，获得智能数据分析与处理课题（组）经费或实验室的资助，在智能数据分析与处理实验室完成。

声明人（签名）：

年 月 日

厦门大学博硕士学位论文摘要库

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

厦门大学博硕士学位论文摘要库

摘要

磁化率是物质在强磁场下表现出来被磁化程度的物理量,这一物理量是由物质内部的成分所决定的,是物质的固有属性。近些年来,使用核磁共振设备对人体各部位磁化率进行定量测量与分析,已经成为研究的新方向新热点。定量磁化率成像由于成像机理的不同,能够提供与以往不同的对比度图像。临床上对于阿尔茨海默症、地中海贫血症以及帕金森综合症等脑部和血管疾病能起到很好的辅助诊断作用。

经典的磁化率重建框架主观地将重建划分成相位解缠绕、相位场修正以及磁化率反演三个步骤,各个步骤之间相互独立,但是在此框架下的重建存在重建精度受限,参数敏感,积累误差扩散,以及步骤划分方式不符合问题产生过程等问题。本文提出了两种基于单步重建框架下的新方法:第一,调和函数单步重建法,继承和发展了经典方法,对其进行数学统一,联合优化,减少不必要的积累误差;第二,全部场反演法,在有效地先验引导下进行整体反演,避免了诸多预处理环节的错误,基本消除了伪影的影响,完整的保留了局部结构,取得了更优的效果。不仅如此,由于方法采用了更加贴近实际脑部的新模型,对于以往经典框架下方法无法处理的病变与出血部位也具有独特的成像优势。从算法理论来看,所提出的两种方法之间存在递进关系,是一个彻底改变原有分步重建框架的过程,在端到端的重建新思路中获得更加理想的重建结果。这些方法中还引入了本小组关于 L_0 范数约束快速解法的研究成果,极大提高了算法的收敛速度,进一步降低了应用门槛。各项实验均表明单步重建方法能够有效地减少积累误差,提高重建精度,对于病变脑部的重建具有兼容性,极大地拓展了适用范围,促进了磁化率成像的临床应用。

关键词: 单步重建; 全部场反演; 加权 L_0 范数

厦门大学博硕士学位论文摘要库

Abstract

Magnetic susceptibility is an intrinsic physical quantity which can be used to represent the magnetized degree of organization in the strong magnetic field. In recent years, quantitative analysis of the susceptibility of human body has become a new hot spot of MR imaging. Since its unique relation to the actual physical tissue magnetic properties, quantitative susceptibility mapping (QSM) could provide special contrast which is more efficient than other MR techniques. Especially in some brain diseases and disorders, such as Alzheimer's disease, Thalassemia and Parkinson's disease, it works as a powerful auxiliary tool in the diagnosis.

The QSM methods under the classical frame decompose the main problem into three subproblems, and solve them independently. But this decomposition does not conform to the causes of problems, which causes a negative influence of the reconstruction accuracy, higher parameter sensitivity and more error accumulation. In this paper, two new single-step reconstruction methods are proposed: the first one, based on harmonic function property, inherits and develops classical methods which efficiently reduces accumulated errors; the second one, under a new reconstruction frame, artfully skips the phase pretreatment by inverting total field directly. Benefited from the right prior, it gets a excellent result in just 3~4 iterations. In terms of algorithm theory, there is a progressive relationship between two methods. It's a complete change of the classical frame, which proposes a new end-to-end frame to get better results. Not only that, due to the advantage of the new model, the second method could well reconstruct the brain with trauma and lesion, which other methods are helpless. We also introduce an advanced solution of weighted L_0 norm regularization, aimed at accelerating the convergence of the whole algorithm. All the results of the experiment verify the new method improves the reconstruction accuracy, provides artifact-free results and promotes clinical applications.

Key word: Single-step Reconstruction; Total Field Inverse; Weighted L_0 Norm.

厦门大学博硕士学位论文摘要库

第一章 绪 论	1
1.1 研究背景和意义	1
1.2 研究现状与未来发展	5
1.3 论文的主要内容及贡献	7
1.4 论文内容安排	8
第二章 定量磁化率成像原理与预处理方法	9
2.1 引 言	9
2.2 相位解缠绕	10
2.3 相位场修正	13
2.3.1 偶极子场投影法	15
2.3.2 复杂调和伪影去除法	16
2.3.3 带边界条件的拉普拉斯方程求解法	17
2.4 本章小结	18
第三章 经典磁化率反演方法	19
3.1 引 言	19
3.2 多方向冗余数据重建方法	20
3.3 逆滤波重建方法	22
3.4 正则化约束重建方法	24
3.4.1 磁化率稀疏特性约束	25
3.4.2 磁化率梯度域稀疏特性约束	26
3.5 本章小结	30
第四章 调和函数单步重建法	31
4.1 引 言	31
4.2 算法理论	32
4.3 实验平台与数据采集	35

4.4 实验结果与数据分析	36
4.4.1 数值模型实验.....	36
4.4.2 真实脑部实验.....	38
4.5 讨论	40
4.6 本章小结	42
第五章 全部场反演单步重建法	43
5.1 引言	43
5.2 算法理论	44
5.3 实验平台与数据采集	49
5.4 实验结果与数据分析	50
5.4.1 健康人脑实验.....	50
5.4.2 病变人脑实验.....	54
5.5 讨论	56
5.6 本章小结	59
第六章 工作总结与研究展望	61
6.1 工作总结	61
6.2 研究展望	62
参考文献.....	65
致谢.....	71
攻读硕士学位期间发表论文情况.....	73

Content

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Background and Significance	1
1.2 State-of-art and Future Development	5
1.3 Main Contents and Contribution	7
1.4 Organization	8
Chapter 2 Basic Theory of Susceptibility and Pretreatment Process	9
2.1 Introduction	9
2.2 Phase Unwrapping	10
2.3 Background Field Correction	13
2.3.1 Background Field Removal using Projection onto Dipole Field	15
2.3.2 Sophisticated Harmonic Artifact Reduction for Phase	16
2.3.3 Solving the Laplacian Boundary Value problem for Phase	17
2.4 Summary	18
Chapter 3 Classical Susceptibility Inversion Methods	19
3.1 Introduction	19
3.2 Calculation of Susceptibility through Multiple Orientation Sampling	20
3.3 Solving by Inverse Filtering	22
3.4 Solving Bayesian Regularization	24
3.4.1 Sparsity of Susceptibility Values	25
3.4.2 Sparsity of Spatial Differences of Susceptibility Values	26
3.5 Summary	30
Chapter 4 Single-step Reconstruction by Harmonic Function	31
4.1 Introduction	31
4.2 Algorithm	32
4.3 Experimental Platform and Data Collection	35
4.4 Results and Data Analysis	36
4.4.1 Numerical Phantom Simulation	36

4.4.2 Vivo Brain Experiment	38
4.5 Consulting	40
4.6 Summary	42
Chapter 5 Single-step Reconstruction by Total Field Inverse	43
5.1 Introduction	43
5.2 Algorithm	44
5.3 Experimental Platform and Data Collection	49
5.4 Results and Data Analysis	50
4.4.1 Healthy Brain Experiment	50
4.4.2 Pathological Brain Experiment	54
5.5 Consulting	56
5.6 Summary	59
Chapter 6 Summary and Outlook	61
6.1 Summary	61
6.2 Outlook	62
Reference	65
Acknowledgement	71
Published Paper during Pursuing Master Degree	73

第一章 绪论

1.1 研究背景和意义

核磁共振成像（Nuclear Magnetic Resonance Imaging 简称 MRI），是一种利用强磁场磁化被探测物体的原子核产生信号来重建其内部结构的一种成像技术。早在 1952 年，瑞士物理学家 Felix Bloch 和美国物理学家 Edward Mills Purcell 就因发现了核磁共振现象而获得了诺贝尔物理学奖。1971 年美国科学家 Paul Lauterbur 和英国科学家 Peter Mansfield 率先将核磁共振技术应用到医学诊断领域，称之为核磁共振成像技术。两位发明人也因为其在核磁共振成像技术方面的贡献获得了 2003 年度的诺贝尔生理学或医学奖。1975 年在前人的工作的基础上，Richard Ernst 等人又提出了相位编码和频率编码，通过快速傅里叶变换来重建 MR 图像，从而大大缩短了成像时间，极大推动了核磁共振成像技术走向临床应用。因其在临床医学领域的巨大贡献，发明者本人也于 1991 年获得了诺贝尔奖。

原子由电子和原子核组成。原子核带正电，其自旋运动决定了它自身的固有磁矩。如果此时在外部添加一个恒定的强磁场，这些原子核将依照强磁场方向定向排列。原子核旋转的频率和方向则完全由磁场的强度和频率决定。此时运用梯度线圈产生的 RF 脉冲激发原子核，使其吸收频率与旋转频率相同的电磁波，原子核的能量增加，转为激发态。当 RF 脉冲停止，原子核就会把多余的能量以电磁波的形式释放出来以恢复平稳态。做一个形象的比喻，可以把静态磁场中的原子核看作一条拉紧的琴弦。原子核具共振频率称之为“Larmor”频率。琴弦在外部张力（对应频率的 RF 脉冲）以“Larmor”频率影响原子核而产生使其震动，这一现象与物理学中一个常见的现象‘共振’相类似，因而被称为核磁共振。原子核释放出的电磁波被相应的接收线圈接收并处理，就可以确定原子核的位置和密度，从而实现断层成像。目前医学成像领域主要使用氢原子核（仅含有一个质子）作为检测对象，核磁共振成像的最终探测目标是人体内氢原子的分布情况。

在实际应用过程中，核磁共振成像仪采集频域数据，经过傅里叶反变换后 MRI 信号是一个复数信号，可以分成两个部分，幅值信息和相位信息。两者均能

够独立成像。但由于相位信息中包含了复杂分布的噪声和严重的缠绕现象，早期的 MR 成像技术大多只利用信噪比较好的幅值信息。随着成像质量的不断提升和相位信息处理技术的不断发展，相位成像也越来越受到关注。Duyn^[1]等人发现在高达 7T 的磁场下相对于幅值图像，相位图像有着更好的对比度噪声比（contrast-to-noise ratio, CNR），并且能够在某些特定的区域（铁、钙离子富集区域）提供以往幅值成像不能提供的高对比度和潜在微结构信息^[2,3]。另外一方面，相位信息与弛豫时间 T1、T2 没有直接的联系，不受其影响。虽然有关研究指出了相位成像的独特优势，但是在实际处理过程中还是存在以下几个难点：一是相位图像伴随有严重的相位缠绕现象，如果不加处理无法产生清晰图像且将对后续的组织定量分析造成较大困难；二是组织结构的不同与成像角度的差异都会影响成像结果；三是相位变化具有全局特性，在成像过程往往叠加有一个缓变的背景相位场，对后续的反演重建产生严重干扰。

近年来研究人员又在相位基础上提出物质的磁化率作为成像依据，认为不同的物质具有不同的磁化率属性，能够定量的反映物体内部情况。在恒定强磁场中顺磁性物质由于被磁化会产生一个有别于主磁场的本地磁场，该磁场的存在会影响采集时的相位图像，通过测量相位图像由确定的数学关系^[4]可以定量地逆推物质的磁化率分布，这项技术被称为定量磁化率成像（Quantitative Susceptibility Map, QSM）。其实，在核磁共振成像技术发展的初期，研究人员就已经对定量磁化率成像表现出浓厚的兴趣^[5-7]，但由于受限于当时的技术条件，相关研究没有深入的进行下去。经过近十年的发展，如今研究定量磁化率成像的条件已逐步成熟，研究也取得了诸多实质性进展，将来或成为诊断和治疗相关疾病不可或缺的有力工具。下面列举若干定量磁化率成像的临床应用实例：

◆ 脑部恶性胶质瘤钙化检测^[8]

根据医学和解剖学知识可知，通常恶性胶质瘤很少出现钙化现象，而一旦胶质瘤内部出现钙化现象则预示着少突神经细胞坏死，及早地判断这一现象的出现有利于提高病人的存活率并及时采取相应的治疗手段。但是通过传统的 MRI 显影手段很难区分钙化现象和血液沉积，不能够准确定量的判断钙化区域。但在定量磁化率成像中，由于血液中的铁离子是顺磁性物质，而钙离子是抗磁性物质，

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库