

磁共振截断频谱图像边缘检测新技术

骆建华, 庄天戈

(上海交通大学生物医学工程系, 上海 200030)

摘 要: 本文提出了一种适合于含有截断伪影磁共振图像(磁共振截断频谱图像)的边缘检测新算法. 本方法中, 把任何有截断伪影的信号表示为以奇异点为参量的截断奇异函数的加权和, 奇异点和加权系数由该信号决定, 而计算出的奇异点就是图像的边缘, 从而剔除了由截断伪影而引入的虚假边缘. 实际和仿真结果表明这种方法效果高于现有方法.

关键词: 截断奇异函数; 奇异点; 截断频谱

中图分类号: TN911.73 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2000) 05-0071-04

The New Technology of Finding MR Image Edges Using TSF

LUO Jian-hua, ZHUANG Tian-guo

(Department of Biomedical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: In this paper, we propose a new edge finding technology to fit to MR images with truncation artifact. In our method, any truncation artifact digit signal can be expressed as the weighted sum of truncated singularity functions (TSF) relatea to the signal singularity locations, and the singularity locations and weight coefficients can be determined by this signal. Edges of MR images with truncation artifacts can be constructed by these singularity locations. False edges due to truncation artifacts can be removed using this method. Experiment and simulation results show that this method gives much better performance than available method.

Key words: truncation singularity function; singularity points; truncated spectrum

1 引言

磁共振成像(MRI)技术是一种日益令人瞩目的医学图像诊断手段. 但其因成像时间长, 信噪比很难提高, 而导致 MRI 设备十分昂贵, 严重制约着它的广泛应用. 采集信号时间要受到病人的承受能力限制和活性组织运行对信号带来不利影响^[1]. 一幅磁共振(MR)图像的频谱数据采集时间可表示为: $t = n \times m \times t_0$, 其中 n 是叠加次数, t_0 是单行扫描所需的时间, m 是扫描行数且一般等于图像的像素行数 $M^{[2]}$. 当 $m < M$ 时, 重建 M 行像素的图像, 叫截断频谱成像. 当今用于临床的 MR 截断频谱成像方法是采集 $m (m < M)$ 行低频频谱数据, 其余 $M - m$ 行高频频谱数据用零填补, 然后用傅立叶反变换成像(例如深圳安科公司生产的 MRI 设备). 这种 MR 截断频谱成像方法叫补零法, 其缺陷是图像中有伪影. 这伪影由于截断频谱欠缺 MR 高频频谱分量所造成的, 所以国际 MR 医学成像界把这种伪影叫截断伪影. MR 图像中的截断伪影产生虚假的边缘, 给图像的边缘检测带来很大的困难. 这是国际医学成像界的主要研究热点之一, 是一项有重要学术价值, 巨大经济效益的高难度研究项目.

目前消除这种虚假边缘的方法是先消除图像中的截断伪

影, 然后用 Robert 方法提取图像的边缘. 而消除 MR 截断伪影主要有两条途径: 第一条途径是由截断频谱(采集到的 $m (m < M)$ 行低频频谱数据), 外推其它 $(M - m)$ 行高频) 频谱数据 Backpropagation 或 Multilayer 神经网络进行非线性预测. 其主要困难是由于 MR 图像频谱数据量很大, 计算时间长, 外推高频数据有误差^[3,4]. 第二条途径是对含截断伪影的 MR 图像进行处理, 以消除截断伪影. 如对图像进行加窗平均(遗憾的是这将导致图像分辨率降低, 效果差^[5,6])、建立 Markov 随机场, 用 Bayesian 方法判断截断伪影导致的误差, 从而剔除截断伪影(其主要缺点是计算负担重, 图像分辨率下降, 丢失部分细节^[7]).

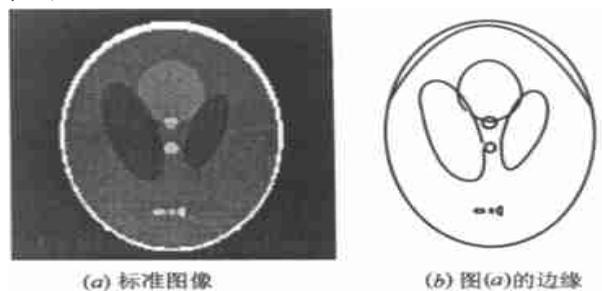


图 1 标准图像及其边缘图像

收稿日期: 1999-03-15; 修订日期: 1999-09-15

基金项目: 国家自然科学基金(No. 39870211, 39970219) 资助课题

本文在已知截断伪影图像及其截断频率条件下,根据含截断伪影离散信号的截断奇异函数分析理论,准确测定图像的边缘.此方法是当前国际 MR 成像领域中是所没有的,先进的,可望在精度和速度方面有重大突破.

2 数学模型

众所周知,在一定条件下,一个函数可表示为三角函数系、小波函数系或幂函数系的线性泛函.即在一定条件下一个函数可用某一函数系的线性加权和表示.对于任一离散频谱函数,能否用一个离散函数序列的线性函数表示?回答是肯定的.为此,给出如下定义:

定义 1:定义离散函数空间 $\{W_k(i), k, i$ 为整数 $\}$ 为奇异空间,如果它满足以下三个条件:

- (1) $W_k(i)$ 是 $W_0(i)$ 的平移或膨胀 k 生成的;
- (2) $W_k(i)$ 只有一个唯一的差分不为零的点 k (奇异点 k);
- (3) $W_k(i)$ 的离散付里叶变换 (DFD) $W_k(u) = F[W_k(i)]$ 存在. ($F[\cdot]$ DFT 算符)

并称 $W_k(i)$ 为奇异函数, $W_k(u)$ 为奇异谱函数,函数集合 $\{W_k(u) | k, u$ 为整数 $\}$ 为奇异谱空间.

定理 1 (信号奇异分解定理):奇异空间 $\{W_k(i), k, i$ 为整数 $\}$ 是完备的,即任何离散信号可表示空间 $\{W_k(i)\}$ 中的线性泛函.

证明:设 $f(j)$ 为任一离散函数,其中 $j=0, 1, \dots, M-1$. 如果 $\forall j \in \{0, 1, \dots, M-1\}$, 能够找到 M 个系数 $a_k, k=0, 1, \dots, M-1$, 使得下式成立:

$$f(j) = \sum_{k=0}^{M-1} a_k W_k(j), j \in \{0, 1, \dots, M-1\} \quad (1)$$

考虑到,定义 1 中条件 (2), 便可以找到满足式 (1) 的各加权系数为:

$$a_k = \begin{cases} f(k), & k=0; \\ f(k) - f(k-1), & k=1, 2, \dots, M-1 \end{cases} \quad (2)$$

即任何离散信号可表示空间 $\{W_k(i)\}$ 中的线性泛函. 证毕.

由定理 1 很容易得到以下推论:

推论 1:若离散信号 $f(j)$ 中仅有 Q 个奇异点(在 $a_k, k=0, 1, \dots, M-1$ 中仅有 Q 个不为 0), 则 $f(j)$ 可由奇异空间 $\{W_k(i), k, i$ 为整数 $\}$ 中对应的 Q 个奇异函数的线性泛函表示. 即

$$f(j) = \sum_{i=1}^Q a_{bi} W_{bi}(j), a_{bi} \neq 0, j=0, 1, \dots, M-1 \quad (3)$$

其中 $W_{bi}(j)$ 是以 bi 位置为奇异点且满足定义 1 的奇异函数, a_{bi} 是 $W_{bi}(j)$ 的权系数.

即,任何信号可以由信号的奇异点及其权系数唯一确定.

定义 2:奇异函数 $W_k(j), j=0, 1, \dots, M-1$ 的截断频谱 $W_k(u), u = -u_0, -u_0+1, \dots, u_0-2, u_0-1$, 用补零法重建的函数为截断奇异函数, 称其为截断频率 u_0 的截断奇异函数, 记为 $\tilde{W}_{k, u_0}(j), j=0, 1, \dots, M-1$. 其中 $u_0 \in \{0, M/2\}$ 是截断频率, k 为奇异点.

定理 2 设信号 $\tilde{f}(k), k \in \{0, 1, \dots, M-1\}$ 由信号 $f(k), k \in \{0, 1, \dots, M-1\}$ 取截断频率为 $u_0 \in \{0, M/2\}$ 的截断频谱

用补零法重建的信号, 则它可以表示为 $\tilde{W}_{k, u_0}(j), j=0, 1, \dots, M-1$ 的加权和.

证明:对式 (3) 两边取付里叶变换得:

$$f(u) = \sum_{k=0}^{M-1} a_k W_k(u), u \in \{-M/2, -M/2+1, \dots, M/2-1\}$$

则取截断频率为 u_0 的截断频谱用补零法重建的信号为:

$$\begin{aligned} \tilde{f}(k) &= \sum_{u=-u_0}^{u_0} F(u) \exp(j2\pi uk/M) \\ &= \sum_{u=-u_0}^{u_0} \left[\sum_{i=1}^Q a_{bi} W_{bi}(u) \right] \exp(j2\pi uk/M) \\ &= \sum_{i=1}^Q a_{bi} \sum_{u=-u_0}^{u_0} W_{bi}(u) \exp(j2\pi uk/M) \\ &= \sum_{i=1}^Q a_{bi} W_{bi, u_0}(k) \end{aligned} \quad (4)$$

式 (4) 表明截断频谱用补零法重建的信号 (有伪迹的信号) 可以用相应截断频谱的截断奇异函数的加权和表示. 证毕.

所谓截断奇异函数 $\tilde{W}_{k, u_0}(j), j=0, 1, \dots, M-1$ 是奇异函数 $W_k(j), j=0, 1, \dots, M-1$ 被剔除部分频率分量 ($u \geq u_0$) 后的用补零法重建的信号函数. 它已经不再满足只有唯一一个奇异点的奇异函数条件, 但它们构成截断频率为 $0 < u_0 < M/2$ 的所有含截断伪迹信号的一组函数基.

3 含截断伪影 MR 图像的边缘测定

对于图像信号来说, 奇异点就是图像的边缘. 由于图像中含有大量伪影, 必将导致大量伪奇异点. 如何识别伪奇异点是正确检测图像的关键问题. 这里的思路是先选用恰当的正交小波函数, 对已有的截断频谱求小波变换系数, 再通过调整尺度参数, 测定小波系数 (变换值) 的极点, 即信号的可能奇异点^[5, 6]; 最后用截断奇异函数分析理论中的推论 1 确定信号的真实奇异点.

3.1 奇异点粗估计

设在实直线 \mathbb{R} 上的平方可测函数的空间记为 $L^2(\mathbb{R})$, $L^2(\mathbb{R})$ 是二进正交小波, 则 $f \in L^2(\mathbb{R})$ 的小波系数 $c_{j, k}$ 由

$$c_{j, k} = \langle f, \psi_{j, k} \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \overline{\psi_{j, k}(x)} dx \quad (5)$$

其中 $\psi_{j, k}(x) = 2^{j/2} \psi(2^j x - k)$. 它可以是由 B-样条函数经过正交化, 得正交尺度函数, 再由正交尺度构成正交二进小波. 当信号在某点为奇异点时, 则该点将是小波变换系数的模的极值, 且这模的极值将随着尺度的增加而增加. 而噪声引起的小波变换系数的模极值, 将随着尺度的增加而减小^[8]. 据此就可确定奇异点, 且受噪声影响少. 但是这种求模极值方法遇到紧接着的序列奇异点群必将出现奇异点漏检. 必须在检测到奇异点附近加一些附加奇异点.

3.2 虚假奇异点剔除

由于图像中含有截断伪影, 会出现奇异点漏检和误检. 所以, 需要用截断奇异函数分析理论进行检验. 对于截断频率 u_0 的含截断伪迹信号 $\tilde{f} = [\tilde{f}(0), \tilde{f}(1), \tilde{f}(M-1)]^T$, 可以按测得的奇异点构造一组截断频率 u_0 的截断奇异函数, 并据式

(4) 建立以下方程组:

$$\begin{cases} a_{b1}\tilde{W}_{b1}(0) + a_{b2}\tilde{W}_{b2}(0) + \dots + a_{bQ}\tilde{W}_{bQ}(0) = \tilde{f}(0) \\ a_{b1}\tilde{W}_{b1}(1) + a_{b2}\tilde{W}_{b2}(1) + \dots + a_{bQ}\tilde{W}_{bQ}(1) = \tilde{f}(1) \\ \dots \\ a_{b1}\tilde{W}_{b1}(M-1) + a_{b2}\tilde{W}_{b2}(M-1) + \dots + a_{bQ}\tilde{W}_{bQ}(M-1) = \tilde{f}(M-1) \end{cases}$$

记 $y = [a_{b1}, a_{b2}, \dots, a_{bQ}]^T$ 为 Q 维权矢量, 式 (8) 的矩阵形式为:

$$\bar{W} \cdot y = \bar{f} \quad (6)$$

其中

$$\bar{W} = \begin{bmatrix} \tilde{W}_{b1}(0) & \tilde{W}_{b2}(0) & \dots & \tilde{W}_{bQ}(0) \\ \tilde{W}_{b1}(1) & \tilde{W}_{b2}(1) & \dots & \tilde{W}_{bQ}(1) \\ \dots & \dots & \ddots & \dots \\ \tilde{W}_{b1}(M-1) & \tilde{W}_{b2}(M-1) & \dots & \tilde{W}_{bQ}(M-1) \end{bmatrix}$$

设信号 $f(j)$ 真实奇异集合是 S , 而用小波分析法测到的奇异点集合是 \hat{S} , 其中元素个数为 Q . 如果 $\hat{S} \subseteq S$, 则方程组 (6) 是相容的, 并且

(1) 当 $2u_0 \geq Q$ 时, \bar{W} 的秩为 Q , 按线性方程组解的性质可得唯一解.

(2) 当 $2u_0 < Q$ 时, 可以证明 \bar{W} 的秩为 $2u_0$, 按线性方程组解的性质可得唯一伪逆解.

3.3 算法

第一、对含截断伪影的 MR 图像计算尺度伸缩的各近似小波变换系数, 检测奇异点. 第二、建立诸奇异点对应的截断奇异函数的线性方程组 (6), 并确定加权系数. 第三、用权重系数不为零的点构成图像的边界.

4 算法实现及讨论

这种检测算法的测试是在一台 586/133 的微机上进行的. 为了充分认识截断奇异函数分析边缘检测技术的效果, 我们对计算机仿真的有噪声、无噪声和实际含截断伪影的磁共振图像进行算法试验, 并把它与 Robert 算子边缘检测技术比较.

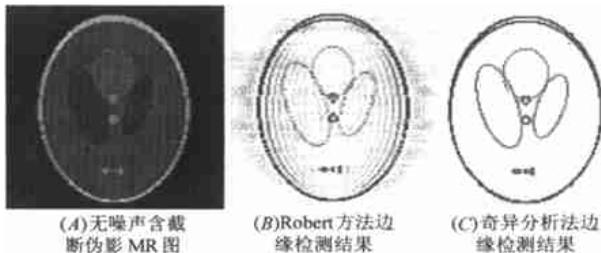


图 2 计算机仿真无噪声磁共振图像边缘检测算法比较

图 2 中, 图 (a) 的尺寸是 128×128 个像素, 是计算机仿真磁共振截断频谱数据补零法成像的图像, 其截断频谱数据为频谱低频 64 列. 图 (a) 中有较多的截断伪影. 图 (b) 是用 Robert 方法对图 (a) 检测到的边缘图像. 由于截断伪影的存在, 图 (b) 中含有许多的伪边缘. 图 (c) 是用截断奇异函数分析法对图 (a) 检测到的边缘图像. 容易看出图 (c) 中无虚假边缘存在, 与图 1 中的图 (b) 几乎一样.

图 3 中, 图 (a) 的尺寸也是 128×128 个像素, 是计算机仿

真的含 5% 高斯白噪声的磁共振截断频谱数据补零法成像的图像, 其截断频谱数据为频谱低频 64 列. 图 (a) 中有较多的截断伪影. 图 (b) 是用 Robert 方法对图 (a) 检测到的边缘图像. 由于截断伪影的存在, 图 (b) 中含有许多的伪边缘. 图 (c) 是用截断奇异函数分析法对图 (a) 检测到的边缘图像. 容易看出图 (c) 中无虚假边缘存在. 与无噪声的情况有类似的结果.

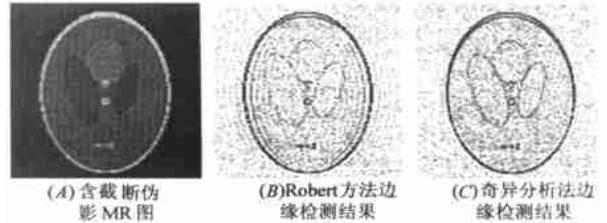


图 3 计算机仿真含 5% 高斯白噪声磁共振图像边缘检测算法比较

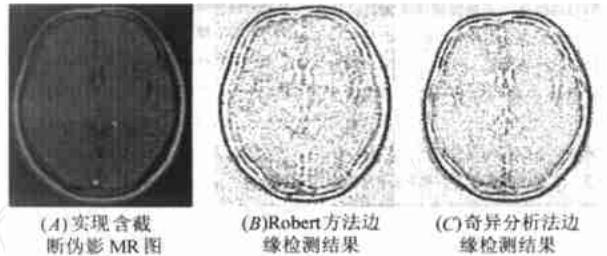


图 4 实际含噪声磁共振图像边缘检测算法比较

图 4 中, 图 (a) 的尺寸是 256×256 个像素, 是实际磁共振截断频谱数据用补零法重建的图像, 截断频谱数据为低频 128 列 (由深圳安科公司提供). 图 (b) 为用 Robert 方法由图 (a) 检测到的边缘图像, 其中存在虚假边缘. 图 (c) 为用截断奇异函数分析法由图 (a) 检测到的边缘图像. 图 (c) 中无虚假边缘存在.

以图 1 中的图 (b) 为标准边缘图像, 对计算机仿真情况下的边缘检测算法测试进行误差分析. 由表 1 知截断奇异函数分析边缘检测法的保真指标^[9]比 Robert 法高出四个数量级. 由表 2 知截断奇异函数分析边缘检测法的保真指标比补零法高出 2 个数量级. 由表 1、表 2 比较可见算法对噪声敏感, 这是因为由于噪声的引入使得奇异点数量 Q 急剧上升, 频谱数据量 m 小于奇异点数量 Q 或方程 (6) 成为不相容, 使方程 (6) 只能得一伪逆解.

表 1 计算机仿真无噪声图像边缘检测算法误差比较表^[9]

算法	归一化均方误差	归一化绝对误差
Robert 法	0.3908782	0.5407924
截断奇异函数法	0.0000373	0.0000647

表 2 计算机仿真含 5% 高斯白噪声图像边缘检测算法误差比较表

算法	归一化均方误差	归一化绝对误差
Robert 法	0.3433662	0.6584027
截断奇异函数法	0.0067634	0.0078211

5 结论

截断奇异函数分析边缘检测法对含有截断伪影的磁共振图像有较好的效果。因为截断奇异函数分析边缘检测方法根据截断伪影成因,基本上消除虚假边缘。尤其在奇异点个数较少的情况下,检测的误差仅由计算工具精度决定,即理论上讲可以准确检测边缘。截断奇异函数分析成像,不论含噪声的还是无噪声的、对实际的还是对计算机仿真的含截断伪影的磁共振图像边缘检测的实验结果,都表明了截断奇异函数分析边缘检测技术是一种适合于含有截断伪影的磁共振图像的高精度边缘检测方法,保证能消除有截断伪影图像的虚假边缘,质量大大优于用传统方法的图像。

参考文献

- [1] Stack ,D. D. et al. Magnetic resonance and compute tomography of the normal and diseased pancreas :A comparative study. Radiology ,1984 : 153 ~ 162
- [2] Jones ,J. P. et al. Principles of Magnetic resonance. In magnetic resonance annual ,1985 ,Ed. by Herbert Y. K. Swizerland Raven Press ,71 ~ 111
- [3] Hui ,Y. ,Smith ,M. R. MRI reconstruction from truncated data using a complex domain backpropagation neural network. IEEE Pacific RIM Conference on Communications ,Computers ,and Signal Processing Proceedings 1995. IEEE ,Piscataway ,NJ ,USA ,95CH35765 ,513 ~ 516
- [4] Yan ,Hong ; Mao ,Jintong. Data truncation artifact reduction in MR imaging using a multilayer neural network. IEEE Transactions on Medical Imaging ,1993 ,3 ,12(1) :73 ~ 77
- [5] Mallat ,S. and S. Zhong. Wavelet trasform maxim and multiscale edges , in Wavelet and Their Applications ,MA ,1991
- [6] Mallat ,S. and S. Zhong. Reconstruction of ffunctions from the wavelet transform local maxim ,1990 ,preprint
- [7] G. Sebastiani and P. Barone. Turncation Artifact Reduction in Magnetic Resonance Imaging by Markov Random Field Methods. IEEE Transactions on Medical Imaging ,1995 ,9 ,14(3) :434 ~ 441
- [8] S. G. Mallat ,and Wen Liang Hwang. Singularity detection and processing with wavelet. IEEE Trans. On Information Theory ,Mar ,1992 ,38 (2)
- [9] 骆建华、吕维雪,模糊多准则图像重建技术,计算机学报,1996 ,8 ,19(8) :609 ~ 615



骆建华 1995年毕业于浙江大学生物医学工程系。现为上海交通大学生物医学工程系副教授。主要从事医学图像重建和处理的教学及科研工作。



庄天戈 1957年毕业于上海交通大学电器材料制造系,现为上海交通大学生物医学工程系教授,博士生导师,中国生物医学工程学会生物信息与控制分会副主任,中国电子学生物医学电子学专业学会委员,中国计算机学会CT理论与应用研究会理事。著有《CT原理与算法》、《计算机在生物医学中的应用》等,译著有《放射成像》。目前研究兴趣为医学成像、直接三维重建、计算机辅助外科手术、PACS等。

(上接第83页)

- [20] R. Degraeve J. L. Ogier ,R. bellens ,P. J. Roussel ,and G. Groeseneken and H. E. Maes. IEEE Trans. Electron Devices. ,1998 ,45 :472
- [21] D. R. Wolters and J. F. Verwey. Instabilities in Silicon Devices. 1986 : 332 ~ 335
- [22] Pushkarn P. Apte. IEEE Trans. Electron Devices. ,1994 ,41 (9) :1595
- [23] M. M. Moshleh and K. C. Saraswat. IEDM Tech Dig. ,1984 :157 ~ 160
- [24] Hisayo Sasaki Momose , Mizuki Ono , Takashi Yoshitomi , Tatsuya Ohguo , Shir Ichi Nakamura , Masanobu Saito and Hiroshi Iwai. IEEE Trans. Electron Devices. ,1998 ,45 :691 ~ 699
- [25] Chinyang Chen , Ming-Jer Jeng and Jenr Gwo Hwu. IEEE Trans. Electron Devices. ,1998 ,45 :247 ~ 253
- [26] Tan Fu Lei , Juing-Yi Cheng , Shyh Yin Shiau , Tien Sheng Chao and Chao Sung Lai. IEEE Electron Device Lett. ,1997 ,18 :270 ~ 271
- [27] Kevin Cox , Mark Chonko , Chris Honcik and Shelly VanDyke. IEEE Electron Device Lett. ,1996 ,17 :50 ~ 52
- [28] Yukiharu Uraoka , Koji Eriguchi , Tokuhiko Tamaki and Kazuhiko Tsuji. IEEE Trans. Semiconduct Manufact. ,1994 ,7 :293 ~ 297
- [29] Yoshio Okada , Philip J. Tobin , Peter Rushbrook and William L. Dehart. IEEE Trans. Electron Devices. ,1994 ,41 :191 ~ 197
- [30] M. Bhat , J. Kim , J. Yan , G. W. Yoon , L. K. Han and D. L. Kwong. IEEE Electron Device Lett. ,1994 ,15 :421 ~ 423
- [31] G. Q. Lo , S. Ito , Dinn-Lee Kwong , V. K. Mathews and Pierre C. Fazan. IEEE Electron Device Lett. ,1992 ,13 :372 ~ 374