



戴文战论文选集（四）

（国家一级学术期刊论文45篇）



二〇一六年五月

戴文战教授简介

戴文战，男，1958年出生，浙江台州人，浙江省首批二级教授（2012-），博士生导师（2003-）。2001年—2011年任浙江工程学院/浙江理工大学副校长、校学术委员会副主任、学位委员会副主任、教学委员会主任，控制科学与控制工程一级学科硕士点负责人，浙江省重点学科控制科学和工程负责人（2006-），国家级实验教示范中心主任（2005-）。现任浙江工商大学副校长（2011-），浙江工商大学学术委员会副主任（2013-），浙江省自动化学会副理事长（2012-），中国自动化学会过程控制专业委员会委员（2003-），中国化工学会化工自动化及仪表专业委员会委员（2005-），中国优选法统筹法研究会灰色系统专业委员会副主任（2006-），中国高等教育学会高等教育管理研究会常务理事（2002-），中国高校后勤协会常务理事（2012-），中国纺织出版社编委会委员（2003-），浙江省高校后勤协会会长（2012—2014），浙江省教育后勤协会会长（2014-），浙江省中韩经济文化交流协会会长（2012-），浙江省国际人才交流协会常务理事（2003-），浙江省高校中青年学科带头人，浙江省“十二五”特色优势专业《电子信息工程》负责人，省级精品课程《自动控制原理》负责人，浙江理工大学首届教学名师。曾担任浙江省第四、五、六届高校专业设置评议委员会成员，第四届亚洲控制大会程序委员会委员，第五届 IEEE 全球智能控制与自动化大会组织委员会副主任，2010年 IEEE 国际计算机应用与系统建模会议组织委员会主席，2011年 IEEE 灰色系统与智能服务国际会议程序委员会副主席，2013年管理工程国际学术会议主席，2013年网络和分布式计算国际会议荣誉主席。2002年9月—2002年12月英国 Sheffield 大学、2006年6月—2006年12月加拿大 Alberta 大学、2007年9月—10月新加坡国立大学高级研究学者。

作为“十年文革”动乱以后恢复高考的首届大学生，自1977年考入浙江大学化工自动化及仪表专业、特别是1987年研究生毕业以来，戴文战长期从事控制理论和控制工程的教学和科研工作。在繁重的行政工作的同时（自2001年始前后担任浙江工程学院、浙江理工大学、浙江工商大学副校长，至今已15周年），历年坚持为本科生主讲《信号与系统》、为硕士生主讲《线性系统理论》、为博士生主讲《非线性系统》课程。已培养博士研究生7名，硕士研究生72名。主持国家高技术研究发展计划项目（863计划）、国家自然科学基金面上项目、教育部博士点基金导师项目、人事部留学回国人员择优项目、浙江省自然科学基金项目、浙江省科技计划重点项目、浙江省新世纪高等教育教学改革招标项目等国家和省部级项目20多项。曾获国家级教学成果二等奖1项，浙江省省级教学成果一等奖3项，省部级科技进步奖1项，浙江省高等学校科研成果二等奖1项、三等奖1项，浙江省优秀自然科学论文二等奖4项。以第一作者/通信作者在《自动化学报》、《电子学报》、《控制理论与应用》、《系统工程理论与实践》、《仪器仪表学报》、《控制与决策》、《中国图象图形学报》、等国内外一级学术期刊和 IEEE 国际会议上累计发表论文200多篇，其中国家一级以上期刊论文60多篇，150多篇论文被 SCI、EI 收录。

值此2016年五一国际劳动节之际，在本人不同时期发表的国家一级学术期刊的论文中筛选出45篇，编辑成为《戴文战论文集4》。借此机会衷心感谢父母对我的培养、亲人们和小朋友的支持，衷心感谢组织及所有关心我的朋友。

2016.5.1

戴文战教授发表在国家一级学术期刊论文节选目录 (共 45 篇)

- [1] 戴文战, 苏永. 基于新信息优先的一类强化缓冲算子[J]. 自动化学报
2012,38(8):1329-1334, (EI: 20124115554354) 1
- [2] 戴文战, 姜晓丽, 李俊峰. 基于人眼视觉特性的 NSCT 医学图像自适应融合[J]. 电子学
报, 2016,44(8):1841-1848..... 7
- [3] Wenzhan Dai, Xiakai. Hybrid Genetic Algorithm based on Chaotic Migration strategy for
solving flow shop scheduling problem with fuzzy delivery time[J] Journal of Advanced
Computational Intelligence and Intelligent Informatics, 2015, 19(3):359-364 (EI:
20152400942042)..... 15
- [4] 庄巧莉, 戴文战*. 基于混合整数规划的死锁检测方法的研究[J]. 控制理论与应用
2015,32(3):374-379, (EI: 20152000855382)..... 21
- [5] Wenzhan Dai, Xiakai. Approach to hybrid flow-shop scheduling problem based on
Self-guided Genetic Algorithm[J]. Journal of Advanced Computational Intelligence and
Intelligent Informatics, 2015, 19(3):365-371, (EI: 20152400942043)..... 27
- [6] 李俊峰, 方建良, 戴文战. 基于色彩感知的无参考图像质量评价[J] 仪器仪表学
报, 2015, 36(2):339-350. (EI: 20151300678519)..... 34
- [7] 戴文战, 李昀. 基于梯形模糊隶属函数的复合语言多目标决策[J]. 控制与决
策, 2015, 30(10):2205-2211 (EI: 20151300678519)..... 46
- [8] 李俊峰, 戴文战*, 潘海鹏. 结合图像相关性和结构信息的无参考图像质量评价研究
[J] 光电子·激光, 2014, 25(12):2408-2416 (EI: 20150300425690) 53
- [9] 戴文战, 李久亮. 灰色多属性偏离靶心度群决策方法[J]. 系统工程理论与实践,
2014, 34(3):787-792, (EI: 20141817659905) 63
- [10] 李俊峰, 姜晓丽, 戴文战*. 基于提升小波变换的医学图像融合[J]. 中国图象图
象学报 2014, 19(11):1639-1648 (EI: 20151300678519)..... 69
- [11] 雷美珍, 戴文战*, 夏永明. 新型动磁式直线振荡电机的设计[J] 振动与冲击, 2014,
33 (16): 85-89 (EI: 20143900077041)..... 79
- [12] 雷美珍, 戴文战*, 夏永明. 直线压缩机用新型动磁式直线振荡电机的建模与分析[J]
电机与控制学报, 2014, 18(11):45-50..... 84
- [13] 雷美珍, 戴文战*, 夏永明. 新型动磁式直线振荡执行器的动子位移自传感器[J]. 传感
技术学报, 2014, 27(6):763-742..... 90
- [14] 戴文战, 苏永. 缓冲算子调节度与光滑度的关系[J]. 控制与决策, 2014, 29(1):158-162
(EI: 20141017430573) 97

- [15] 张益波, 任佳, 潘海鹏, 戴文战. 一类热定型机换热器的动态建模方法[J]. 化工学报, 2011, 62(8):2360-2366(EI:20113214224507).....102.
- [16] 任佳, 张益波, 高金凤, 潘海鹏, 戴文战. 热定型过程能耗建模及 PSO 参数优化 [J]. 化工学报, 2011, 62(8):2206-2211, (EI:20113214224479)109
- [17] 戴文战, 王晓. 一种比例因子自调整的模糊预测函数控制[J]. 化工学报, 2010, 61(8):2132-2137 (EI: 20103413174768)115
- [18] 戴文战, 吴夏来. 一种快速抑制超调量的改进预测控制算法[J]. 化工学报, 2010, 61(8): 2102-2105 (EI: 20103413174762)121
- [19] 戴文战, 熊伟. 灰色 Verhulst 模型的改进及其应用[J]. 化工学报, 2010 年, 61(8):2097-2100 (EI:20103413174761)126
- [20] 戴文战, 熊伟. 基于函数 $\cot(x)$ 变换及背景值优化的灰色建模[J]. 浙江大学学报 (工学版), 2010, 4(7):368-1372 (EI:20103313164607)130
- [21] 戴文战, 姜海川, 杨爱萍. 非线性系统神经网络预测控制研究进展[J]. 控制理论与应用, 2009, 26(5), 521-530, (EI: 20092712164148)135
- [22] 李俊峰, 戴文战*. 一类时滞线性系统执行器故障的鲁棒完整性设计[J]. 纺织学报, 2005, 26(12):1302-1305145
- [23] Dai Wenzhan, THE AMELIORATING GM(1,1) MODEL BASED ON EXPONENT FUNCTION 9 TRANSFORMATION AND ITS APPLICATION [J] Dynamics of continuous Discrete and Impulse System ,Series B:Application & Algorithms 2005,12b, 350-359 (SCI:) ...148
- [24] 李俊峰, 戴文战*. 基于夹角余弦的油浸式变压器故障诊断研究[J]. 仪器仪表学报, 2005, 26 (12), 1302-1304(EI: 2006049664617).....158
- [25] 李俊峰, 戴文战*. GM(1,1)改进模型的研究及在上海市发电量建模中的应用[J]. 系统工程理论与实践, 2005, 25 (3) :140-144, (EI:2005179070250).....162
- [26] 戴文战, 李俊峰. 非等间距 GM(1,1)模型建模研究[J]. 系统工程理论与实践, 2005, 25(9):89-93(EI:2005459463686)167
- [27] 潘海鹏, 柯挺, 戴文战*. 带线性输出的一般非线性系统的观测器设计[J]. 控制理论与应用, 2004, 21(1):22-24, (EI: 2004328306729).....172
- [28] 李俊峰, 戴文战*. 基于插值和 Newton-Cotes 公式的 GM(1,1)模型的背景值构造新方法与应用 [J]. 系统工程理论与实践, 2004, 24(10):122-126175
- [29] 李俊峰, 戴文战*. 基于级比数据处理的多段灰色建模方法及在我国 GDP 建模中的应用, [J]系统工程理论与实践, 2004, 24(9):98-102(EI: 2004478470593)...180
- [30] 戴文战. 多项目多位置优化配置决策方法及应用[J]. 系统工程理论与实践, 2004,

- 24(9):79—85 (EI: 2004478470590)185
- [31] 戴文战,李俊峰.基于函数变换的 GM (1, 1) 模型及在我国农村人均住房面积建模中的应用[J]系统工程理论与实践, 2004, 24(11):64-67(EI:2004528745525)191.
- [32] 潘海鹏,柯挺,戴文战.一类不确定性纺织过程的自组织模糊控制[J].纺织学报, 2003, 24(5):17019.....196
- [33] 潘海鹏,柯挺,戴文战.纺织生产过程温控对象自调整模糊控制[J].纺织学报, 2003, 24 (3) :33—35199
- [34] 雷美珍,戴文战*,夏永明,王立强.横向磁通直线振荡执行器[J].传感技术学, 2012,25(10):1376-1381..... 202
- [35] 雷美珍,戴文战*,夏永明,王立强.双定子动磁式直线振荡执行器的力特性分析[J].传感技术学, 2010,23(11):1570—1575..... ..210
- [36] 戴文战.基于表格迭代的仪表故障诊断方法[J].仪器仪表学报, 1998, 19 (4) 403—406 (EI:1998104422440)216
- [37] 戴文战.具有残差校正的 n 次累加灰色模型,系统工程理论与实践[J].系统工程理论与实践, 1997, 17(12):121-124(EI:1998034141647)220
- [38] 戴文战.基于三层 BP 网络的多指标综合评价方法及应用[J].系统工程理论与实践, 1999,19 (5) :29—36, ISSN: 10006788224
- [39] 戴文战.基于熵权法的教育质量评价方法[J].系统工程理论与实践, 1998,18(2)76-79(EI: 1998054218825)231
- [40] 戴文战.一基于种函数型神经网络的传感器静态模型的辨识算法[J].传感技术学报, 1999,12 (2) :15-118.....235
- [41]李翠凤, 戴文战.非等间距 GM(1,1)模型背景值构造方法及应用[J].清华大学学报(自然科学版), 2007,47(s2):1729-1732.....239
- [42] 戴文战, 刘鸿强, 潘日芳.故障检测及状态偏差估计的二级分解算法[J].控制理论与应用, 1989, 6 (3) 101-107243
- [43] 戴文战, 邹立华, 汪建章, 朱金刚, 周融.一种基于奖优罚劣原则的多阶多目标决策模型[J]系统工程理论与应用[J] 2000,20(6),32-36(EI: 2000095317557)250
- [44]Junmin Shen, Wenzhan Dai , A New AC Motor Control Strategy —J-M transformation Control Strategy[J] IEEE Potentials,2011, 30(1):39-44,(EI:20110313586927).....255
- [45] Yang Yong-Sheng, Wang Qing-Guo, Dai Wenzhan, Robust PID design for gain and phase margins [J] Journal of Chemical Engineering of, Japan,2002,35(9), 874-879,(ISSN: 00219592;EI: 2002457193219, SCI:) TOP 期刊.....261

基于新信息优先的强化缓冲算子的构造及应用

戴文战^{1,2} 苏永¹

摘要 现实问题中存在这样一类非负单调递增(或衰减)序列,其早期数据增长(或衰减)缓慢,但从最末一个数据开始,系统由于受到外部强烈的激励,最新数据 $x(n)$ 大幅增大(或减小),且定性分析的结果也表明这种强激励带来的快速增长(或衰减)的态势在未来还会持续.针对这样一类序列的预测建模问题,本文在缓冲算子公理体系下,提出了利用最新信息 $x(n)$ 所反映的序列快速增长(或衰减)的“端倪”构造一类新的强化缓冲算子的方法,给出了相关定理及其详细证明.理论分析和实证表明,基于新信息优先的强化缓冲算子建立的灰色模型能够有效地提高这类序列的预测精度.

关键词 新信息,强化缓冲算子,增长率,预测精度

引用格式 戴文战,苏永.基于新信息优先的强化缓冲算子的构造及应用.自动化学报,2012,38(8):1329-1334

DOI 10.3724/SP.J.1004.2012.01329

New Strengthening Buffer Operators and Their Applications Based on Prior Use of New Information

DAI Wen-Zhan^{1,2} SU Yong¹

Abstract In practice, there is a kind of sequence in which its increase (or decrease) rate of the former part is relatively slow but after that end time, the latest data $x(n)$ presents a fast growth (or decline) trend because the system is greatly subject to outside factors. And it is proved by qualitative analysis that this trend will last. For modeling this kind of sequence, novel strengthening buffer operators are put forward based on the prior use of latest information, and the relevant theorems are proved according to the axiomatic of buffer operators. The theoretical analysis and empirical test show that strengthening buffer operators proposed in this paper can effectively increase the forecast precision of grey model.

Key words New information, strengthening buffer operator, increase rate, forecast precision

Citation Dai Wen-Zhan, Su Yong. New strengthening buffer operators and their applications based on prior use of new information. *Acta Automatica Sinica*, 2012, 38(8): 1329-1334

灰色系统理论认为大部分客观系统尽管表面复杂、数据零乱,但仍蕴涵着一定的内在规律,关键是如何选择恰当的方法,通过对“部分”已知信息的数据挖掘,提取有价值的信息,还原系统内部特征,实现对系统运行行为、演化规律的正确描述与正确决策.现有的缓冲算子对提高模型的精度起到了一定的作用.文献[1-4]提出了冲击缓冲算子的概念,构造了几类应用较为广泛的缓冲算子.文献[5]提出一类新的弱化缓冲算子;文献[6]构造了一类强化缓冲算子,研究了它们的特性及内在联系;文献[7]研究了强化缓冲算子的性质.文献[8]研究了一类基于不动点的强化缓冲算子,推广了缓冲算子的类型;文献[9]提出一类新的强化缓冲算子,拓展了缓冲算子类

型;文献[10]研究了一类基于时间序列的平均发展速度的强化缓冲算子,并研究了它们的内在联系.文献[11]对缓冲算子公理进行了补充,提出单调性不变公理.文献[12]研究了缓冲算子与序列光滑度之间的关系.

在灰色系统预测研究中,常常会存在一类非负单调递增(或减小)序列 $(x(1), x(2), \dots, x(n))$ 的预测问题.这类序列不仅表现为数据少,且其较早数据的增长率(或衰减率) $r(k) = \frac{x(k) - x(k-1)}{x(k-1)} \times 100\%$ ($k = 2, 3, \dots, m-1$) 都较小,反映为系统的行为数据增长(或衰减)缓慢.但从某一较晚时刻 m 开始(本文为叙述方便,设 $m = n$ 时刻开始),系统由于受到外部强烈的激励(例如政策调整,投入大幅度加大等因素),序列最后一个数据 $x(n)$ 大幅增大(或减小),增长率(或衰减率) $r(n)$ 较 $r(k)$ 大幅度提高.如果此时辅之定性分析的结果也表明这种强激励带来的快速增长(或衰减)的态势在未来还会持续较长时间,如何利用已有的慢速增长(或衰减)的历史数据 $(x(1), x(2), \dots, x(n-1))$ 建立这类序列的预测模型是非常有意义的.显然,为了准确地把握系统的

收稿日期 2011-10-24 录用日期 2012-03-01

Manuscript received October 24, 2011; accepted March 1, 2012

国家高技术研究发展计划(863计划)(2009AA04Z139)资助

Supported by National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (2009AA04Z139)

本文责任编辑 刘一军

Recommended by Associate Editor LIU Yi-Jun

1. 浙江理工大学自动化研究所 杭州 310018 2. 浙江工商大学信息与电子工程学院 杭州 310018

1. Institute of Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018 2. School of Information and Electronic Engineering, Zhejiang Gongshang University, Hangzhou 310018

发展趋势,对系统的未来行为做出准确的预测,必须充分利用系统已经表现出的快速增长(或衰减)这一“端倪”的最新信息 $x(n)$,对增长缓慢的历史数据 $(x(1), x(2), \dots, x(n-1))$ 做某种生成处理,使其更符合今后的发展趋势,并在此基础上进行合理的预测.针对这一问题,本文提出了一种基于最新信息的强化缓冲算子构造方法,并将之应用于灰色系统建模中.利用原始数据序列的最新信息 $x(n)$ 先对原始数据序列进行强化处理,使经强化缓冲算子处理后的建模数据序列,其每一点的增长率较处理前的原始数据序列的增长率(或衰减率)大,同时保证处理前后的序列其最新数据值 $x(n)$ 和 $x(n)d$ 保持相同.这样,基于强化缓冲算子处理后的序列所建立的生成模型经还原处理后,不仅能较好地反映原始数据序列最后部分快速增长(或衰减)的趋势,同时又能综合利用原有数据信息,从而有效地提高模型的预测精度.本文的理论分析和实例仿真证明了这一点.

1 基本概念

引理 1^[1]. 设 $X = (x(1), x(2), \dots, x(n))$ 为系统行为数据序列, $XD = (x(1)d, x(2)d, \dots, x(n)d)$ 为缓冲序列, $r(k)$ 和 $r(k)d$ 分别为 X 和 XD 在 k 时刻的增长率.在强化缓冲算子作用下, $r(k) \leq r(k)d$ ($k = 1, 2, \dots, n$), 则:

1) 当 X 为单调增长序列时, D 为强化缓冲算子 $\Leftrightarrow x(k)d \leq x(k)$, $k = 1, 2, \dots, n$;

2) 当 X 为单调衰减序列时, D 为强化缓冲算子 $\Leftrightarrow x(k)d \geq x(k)$, $k = 1, 2, \dots, n$;

3) 当 X 为振荡序列时, D 为强化缓冲算子 $\Leftrightarrow \max_{1 \leq k \leq n} x(k)d \geq \max_{1 \leq k \leq n} x(k)$; $\min_{1 \leq k \leq n} x(k)d \leq \min_{1 \leq k \leq n} x(k)$.

由上述引理可以看出,单调增长序列在强化缓冲算子作用下,数据萎缩;单调衰减序列在强化缓冲算子作用下,数据膨胀.

2 一类新的强化缓冲算子的构造

定理 1. 设 $x(k) > 0$ ($k = 1, 2, \dots, n$), $X = (x(1), x(2), \dots, x(n))$ 为系统原始行为数据序列,缓冲序列 $X\bar{D}_m = (x(1)\bar{d}_m, x(2)\bar{d}_m, \dots, x(n)\bar{d}_m)$, 其中 $m > 0$, 且

$$x(k)\bar{d}_m = x(k) \left[\frac{x(k)}{\sqrt{x(k)x(n)}} \right]^{\frac{m}{k}}, \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

则无论 X 为单调增长序列、单调衰减序列或振荡序列时, \bar{D}_m 都为强化缓冲算子.

证明. 容易验证, \bar{D}_m 满足缓冲算子的三个公理,故 \bar{D}_m 为缓冲算子.

1) 设 X 为单调递增序列, 则

$$\begin{aligned} x(k)\bar{d}_m - x(k) &= x(k) \left[\frac{x(k)}{\sqrt{x(k)x(n)}} \right]^{\frac{m}{k}} - x(k) = \\ &= x(k) \left[\left(\frac{x(k)}{\sqrt{x(k)x(n)}} \right)^{\frac{m}{k}} - 1 \right] \leq \\ &= x(k) \left[\left(\frac{x(k)}{\sqrt{x(k)x(k)}} \right)^{\frac{m}{k}} - 1 \right] = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

因此, $x(k)\bar{d}_m \leq x(k)$, 由引理 1 可知, 缓冲算子 \bar{D}_m 为强化缓冲算子, 且满足单调性不变公理^[11]. 因为序列单调递增, 所以有

$$\frac{x(k)}{\sqrt{x(k)x(n)}} < 1$$

则

$$\begin{aligned} x(k) \left[\frac{x(k)}{\sqrt{x(k)x(n)}} \right]^{\frac{m}{k}} &< x(k) \left[\frac{x(k)}{\sqrt{x(k)x(n)}} \right]^{\frac{m}{k+1}} \\ x(k) \left[\frac{x(k)}{\sqrt{x(k)x(n)}} \right]^{\frac{m}{k+1}} &< \\ x(k+1) \left[\frac{x(k+1)}{\sqrt{x(k+1)x(n)}} \right]^{\frac{m}{k+1}} \end{aligned} \quad (3)$$

所以

$$\begin{aligned} x(k) \left[\frac{x(k)}{\sqrt{x(k)x(n)}} \right]^{\frac{m}{k}} &< \\ x(k+1) \left[\frac{x(k+1)}{\sqrt{x(k+1)x(n)}} \right]^{\frac{m}{k+1}} \end{aligned} \quad (4)$$

X 经序列算子 \bar{D}_m 作用后所得数据序列单调性与 X 的单调性保持一致.

2) 设 X 为单调衰减序列, 则

$$\begin{aligned} x(k)\bar{d}_m - x(k) &= x(k) \left[\frac{x(k)}{\sqrt{x(k)x(n)}} \right]^{\frac{m}{k}} - x(k) = \\ &= x(k) \left[\left(\frac{x(k)}{\sqrt{x(k)x(n)}} \right)^{\frac{m}{k}} - 1 \right] \geq \\ &= x(k) \left[\left(\frac{x(k)}{\sqrt{x(k)x(k)}} \right)^{\frac{m}{k}} - 1 \right] = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

因此, $x(k)\bar{d}_m \geq x(k)$, 由引理 1 可知, 缓冲算子 \bar{D}_m 为强化缓冲算子, 且满足单调性不变公理.

3) 当 X 为振荡序列时, 设

$$x(a) = \max\{x(k) \mid k = 1, 2, \dots, n\}$$

$$x(b) = \min\{x(k) \mid k = 1, 2, \dots, n\}$$

$$x(a)\bar{d}_m - x(a) = x(a) \left[\frac{x(a)}{\sqrt{x(a)x(n)}} \right]^{\frac{m}{k}} - x(a) \geq$$

$$x(a) \left[\frac{x(a)}{\sqrt{x(a)x(a)}} \right]^{\frac{m}{k}} - x(a) \geq 0$$

$$x(b)\bar{d}_m - x(b) = x(b) \left[\frac{x(b)}{\sqrt{x(b)x(n)}} \right]^{\frac{m}{k}} - x(b) \leq$$

$$x(b) \left[\frac{x(b)}{\sqrt{x(b)x(b)}} \right]^{\frac{m}{k}} - x(b) \leq 0$$

(6)

所以, $x(a)\bar{d}_m \geq x(a)$, $x(b)\bar{d}_m \leq x(b)$ 即 $\max_{1 \leq k \leq n} x(k)d \geq \max_{1 \leq k \leq n} x(k)$, $\min_{1 \leq k \leq n} x(k)d \leq \min_{1 \leq k \leq n} x(k)$.

由引理 1 可知, 缓冲算子 \bar{D}_m 为强化缓冲算子. □

当 $m = 1$ 时, 得缓冲算子 \bar{D}_1 , 其中

$$x(k)\bar{d}_1 = x(k) \left[\frac{x(k)}{\sqrt{x(k)x(n)}} \right]^{\frac{m}{k}}, k = 1, 2, \dots, n$$

(7)

定理 2. 设 $x(k) > 0 (k = 1, 2, \dots, n)$, $X = (x(1), x(2), \dots, x(n))$ 为系统原始行为数据序列, 其缓冲序列 $XD_2 = (x(1)d_2, x(2)d_2, \dots, x(n)d_2)$, 其中

$$x(k)d_2 = \frac{x(k)}{n-k+1} \sum_{i=k}^n \left[\frac{x(i)}{\sqrt{x(i)x(n)}} \right]^{\frac{1}{k}}, k = 1, 2, \dots, n$$

(8)

则无论 X 为单调增长序列、单调衰减序列或振荡序列时, D_2 都为强化缓冲算子.

证明. 容易验证, D_2 满足缓冲算子的三个公理, 所以 D_2 为缓冲算子.

1) 设 X 为单调增长序列, 则

$$x(k)d_2 - x(k) = \frac{x(k)}{n-k+1} \left[\left(\frac{x(k)}{\sqrt{x(k)x(n)}} \right)^{\frac{1}{k}} + \left(\frac{x(k+1)}{\sqrt{x(k+1)x(n)}} \right)^{\frac{1}{k+1}} + \dots + \right.$$

$$\left. \left(\frac{x(n)}{\sqrt{x(n)x(n)}} \right)^{\frac{1}{n}} \right] - x(k) \leq \frac{x(k)}{n-k+1} \underbrace{[1+1+\dots+1]}_{n-k+1} - x(k) = 0$$

(9)

因此, $x(k)d_2 \leq x(k)$, 故 D_2 为强化缓冲算子.

2) 设 X 为单调衰减序列, 则

$$x(k)d_2 - x(k) = \frac{x(k)}{n-k+1} \left[\left(\frac{x(k)}{\sqrt{x(k)x(n)}} \right)^{\frac{1}{k}} + \left(\frac{x(k+1)}{\sqrt{x(k+1)x(n)}} \right)^{\frac{1}{k+1}} + \dots + \left(\frac{x(n)}{\sqrt{x(n)x(n)}} \right)^{\frac{1}{n}} \right] - x(k) \geq \frac{x(k)}{n-k+1} \underbrace{[1+1+\dots+1]}_{n-k+1} - x(k) = 0$$

(10)

因此, $x(k)d_2 \geq x(k)$, 故 D_2 为强化缓冲算子. 同理可证明当 X 为振荡序列时, D_2 为强化缓冲算子, 称 D_2 为算术平均强化缓冲算子. □

定理 3. 设 $x(k) > 0 (k = 1, 2, \dots, n)$, $X = (x(1), x(2), \dots, x(n))$ 为系统原始行为数据序列, 其缓冲序列 $XD_3 = (x(1)d_3, x(2)d_3, \dots, x(n)d_3)$, 当 $k = 1, 2, \dots, n$ 时, 有

$$x(k)d_3 = \frac{2x(k)}{(n-k+1)(n+k)} \left[\sum_{i=k}^n i \left(\frac{x(i)}{\sqrt{x(i)x(n)}} \right)^{\frac{1}{i}} \right]$$

(11)

则无论 X 为单调增长序列、单调衰减序列或振荡序列时, D_3 都为强化缓冲算子.

证明. 容易验证, D_3 满足缓冲算子的三个公理, 所以 D_3 为缓冲算子.

1) 设 X 为单调增长序列, 则

$$x(k)d_3 - x(k) = \frac{2x(k)}{(n-k+1)(n+k)} \left\{ k \left(\frac{x(k)}{\sqrt{x(k)x(n)}} \right)^{\frac{1}{k}} + (k+1) \left(\frac{x(k+1)}{\sqrt{x(k+1)x(n)}} \right)^{\frac{1}{k+1}} + \dots + n \left(\frac{x(n)}{\sqrt{x(n)x(n)}} \right)^{\frac{1}{n}} \right\} - x(k) \leq$$

$$\frac{2x(k)}{(n-k+1)(n+k)} [k+(k+1)+\dots+n] - x(k) = \frac{2x(k)}{(n-k+1)(n+k)} \left[\frac{(n+k)(n-k+1)}{2} \right] - x(k) = 0 \tag{12}$$

因此, $x(k)d_3 \leq x(k)$, 故 D_3 为强化缓冲算子.
 2) 设 X 为单调衰减序列, 则

$$x(k)d_3 - x(k) = \frac{2x(k)}{(n-k+1)(n+k)} \left\{ k \left(\frac{x(k)}{\sqrt{x(k)x(n)}} \right)^{\frac{1}{k}} + (k+1) \left(\frac{x(k+1)}{\sqrt{x(k+1)x(n)}} \right)^{\frac{1}{k+1}} + \dots + n \left(\frac{x(n)}{\sqrt{x(n)x(n)}} \right)^{\frac{1}{n}} \right\} - x(k) \geq \frac{2x(k)}{(n-k+1)(n+k)} [k+(k+1)+\dots+n] - x(k) = \frac{2x(k)}{(n-k+1)(n+k)} \left[\frac{(n+k)(n-k+1)}{2} \right] - x(k) = 0 \tag{13}$$

因此, $x(k)d_3 \geq x(k)$, 故 D_3 为强化缓冲算子. 同理可证明当 X 为振荡序列时, D_3 为强化缓冲算子, 称 D_3 为加权算术平均强化缓冲算子. \square

定理 4. 设 $x(k) > 0 (k = 1, 2, \dots, n)$, $X = (x(1), x(2), \dots, x(n))$ 为系统原始行为数据序列, 其缓冲序列 $XD_4 = (x(1)d_4, x(2)d_4, \dots, x(n)d_4)$, 其中

$$x(k)d_4 = x(k) \left[\prod_{i=k}^n \left(\frac{x(i)}{\sqrt{x(i)x(n)}} \right)^{\frac{1}{i}} \right]^{\frac{1}{n-k+1}}, \quad k = 1, 2, \dots, n \tag{14}$$

则无论 X 为单调增长序列、单调衰减序列或振荡序列时, D_4 都为强化缓冲算子.

证明. 容易验证, D_4 满足缓冲算子的三个公理, 故 D_4 为缓冲算子.

1) 设 X 为单调增长序列, 则

$$x(k)d_4 - x(k) = x(k) \left[\left(\frac{x(k)}{\sqrt{x(k)x(n)}} \right)^{\frac{1}{k}} \left(\frac{x(k+1)}{\sqrt{x(k+1)x(n)}} \right)^{\frac{1}{k+1}} \dots \left(\frac{x(n)}{\sqrt{x(n)x(n)}} \right)^{\frac{1}{n}} \right]^{\frac{1}{n-k+1}} - x(k) \leq x(k) \left[\left(\frac{x(k)}{\sqrt{x(k)x(k)}} \right)^{\frac{1}{k}} \left(\frac{x(k+1)}{\sqrt{x(k+1)x(k+1)}} \right)^{\frac{1}{k+1}} \dots \left(\frac{x(n)}{\sqrt{x(n)x(n)}} \right)^{\frac{1}{n}} \right]^{\frac{1}{n-k+1}} - x(k) = x(k) \cdot 1 - x(k) = 0 \tag{15}$$

因此, $x(k)d_4 \leq x(k)$, 故 D_4 为强化缓冲算子.
 2) 设 X 为单调衰减序列, 则

$$x(k)d_4 - x(k) = x(k) \left[\left(\frac{x(k)}{\sqrt{x(k)x(n)}} \right)^{\frac{1}{k}} \left(\frac{x(k+1)}{\sqrt{x(k+1)x(n)}} \right)^{\frac{1}{k+1}} \dots \left(\frac{x(n)}{\sqrt{x(n)x(n)}} \right)^{\frac{1}{n}} \right]^{\frac{1}{n-k+1}} - x(k) \geq x(k) \left[\left(\frac{x(k)}{\sqrt{x(k)x(k)}} \right)^{\frac{1}{k}} \left(\frac{x(k+1)}{\sqrt{x(k+1)x(k+1)}} \right)^{\frac{1}{k+1}} \dots \left(\frac{x(n)}{\sqrt{x(n)x(n)}} \right)^{\frac{1}{n}} \right]^{\frac{1}{n-k+1}} - x(k) = x(k) \cdot 1 - x(k) = 0 \tag{16}$$

因此, $x(k)d_4 \geq x(k)$, 故 D_4 为强化缓冲算子. 同理可证明当 X 为振荡序列时, D_4 为强化缓冲算子, 称 D_4 为几何平均强化缓冲算子. \square

3 实例分析

以文献 [10] 中人均电力消费量 (千瓦·时) 为例来验证本文构造的强化缓冲算子在预测过程中的效果. 选取 2000 年 ~ 2006 年的中国人均电力消费量作为原始数据, 如表 1 所示.

表 1 中国人均电力消费量 (千瓦·时)

Table 1 Average electricity consumption by per person in China (kW·h)

年份	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
人均电力消费量	132.4	144.6	156.3	173.7	190.2	216.7	249.4

本文以 2000 年~2005 年的中国人均电力消费量 (132.4, 144.6, 156.3, 173.7, 190.2, 216.7) 作为原始建模数据序列, 2006 年数据作为检验数据. 通过计算 2000 年~2006 年人均电力消费量可得出增长率序列为 (9.215%, 8.091%, 11.132%, 9.499%, 13.933%, 15.090%). 可以看出此增长率序列的前四点 (9.215%, 8.091%, 11.132%, 9.499%) 增长速度相对较慢, 后二点 (13.933%, 15.090%) 的增长速度较快, 且有进一步快速增长的趋势. 因此, 如直接利用原始数据序列进行建模并预测, 存在两个方面的问题: 一方面由于前四点 (132.4, 144.6, 156.3, 173.7) 增长速度较慢, 直接应用这些数据所建立的模型的增长速度也会较慢, 这与后一部分数据已经表现出的强劲增长速度的趋势不一致, 反映在模型上其预测值会比真实值小; 另一方面, 若只选取后一部分快速增长的数据序列如 (173.7, 190.2, 216.7) 作为建模数据, 则数据长度不够, 模型精度同样存在问题, 且由于根本没有利用前一部分的数据信息, 模型不能反映前一部分数据的内在关系. 因此, 对于这类前一部分数据的增长率较小、后一部分数据的增长率较大、数据总长度又较短的序列, 可以应用本文提出的强化缓冲算子, 利用建模数据序列的最新信息 $x(n)$ 所反映出来的序列快速增长的“端倪”, 先对原始数据序列进行强化处理, 使经强化缓冲算子处理后的拟建模的数据序列, 其每一点的增长率较处理前的原始数据序列的增长率大, 同时保证处理前后的序列其最新数据值 $x(n)$ 保持不变. 基于强缓冲算子处理后的序列所建立的生成模型经还原处理后得到的原始数据模型, 不仅能较好地反映序列快速增长的趋势, 同时又能综合利用原有数据信息, 具有很高的拟合精度.

以本文构造的强化缓冲算子 \bar{D}_1, D_2, D_3 和 D_4

对原始数据进行二阶强化处理后生成数据序列如图 1 所示, 基于这些强化缓冲算子处理生成的数据可建立灰色生成模型, 经进一步还原处理后可得到还原模型. 为便于比较, 本文同时建立了不经任何强化缓冲算子处理直接建立的灰色模型和应用文献 [10] 方法建立的灰色模型, 各种模型精度的对比如表 2 所示.

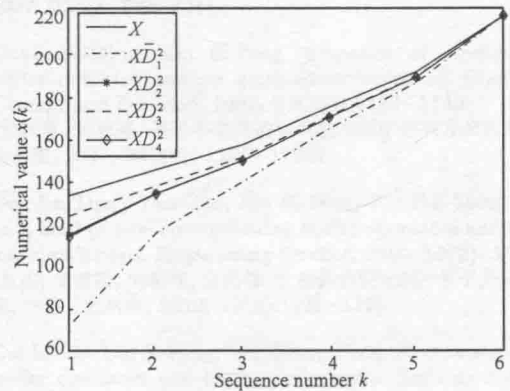


图 1 生成数据序列

Fig. 1 The data sequence generated

从图 1 可以看出, 在强化缓冲算子 \bar{D}_1 和 D_i ($i = 2, 3, 4$) 作用下, 原单调增长序列生成后其数据较原始数据萎缩, 但增长率提高. 其中 \bar{D}_1 作用的序列平均斜率最大, 则还原模型预测值也就越大, D_3 作用的序列平均斜率最小, 预测值也就越小. 从表 2 可以看出, 经强化缓冲算子处理后建立的模型预测精度均比直接用原始数据序列建模的精度高; 原始数据序列经过 \bar{D}_1 的二阶强化后, 预测相对误差最小.

4 结论

针对一类非负单调递增 (或递减) 序列, 其早期数据增长 (或减小) 缓慢, 但从最末一个数据开始, 系统由于受到外部强烈的激励, 最新数据 $x(n)$ 大幅增大 (或减小), 且定性分析的结果也表明这种强激励带来的快速增长 (或衰减) 的态势在未来还会持

表 2 强化缓冲算子作用前后的 GM(1, 1) 模型

Table 2 Model GM(1, 1) produced by different strengthening butter operators

建模序列	GM(1, 1) 还原模型	本文方法的	本文方法的	文献 [10] 方法的	文献 [10] 方法的
		2006 年预测值	预测误差 (%)	2006 年预测值	预测误差 (%)
X	$\hat{x}(2000+k) = 1317.848 e^{0.102k} - 1185.448$	236.831	5.040	236.831	5.040
$X\bar{D}_1^2$	$\hat{x}(2000+k) = 779.422 e^{0.1520k} - 647.022$	252.191	1.110	237.499	4.772
XD_2^2	$\hat{x}(2000+k) = 1043.371 e^{0.1212k} - 910.971$	242.152	2.910	241.210	3.284
XD_3^2	$\hat{x}(2000+k) = 1105.016 e^{0.1159k} - 972.616$	240.252	3.670	240.118	3.722
XD_4^2	$\hat{x}(2000+k) = 1040.637 e^{0.1215k} - 908.237$	242.258	2.860	241.185	3.294

续. 针对如何建立这类序列的预测模型, 在缓冲算子公理体系下, 本文提出了利用建模数据序列最新信息 $x(n)$ 所反映出来的序列快速增长 (或衰减) 的“端倪”构造一类新的强化缓冲算子的方法. 首先对原始数据序列进行强化处理, 使经强化缓冲算子处理后的拟建模的数据序列, 其每一点的增长率较处理前的原始数据序列的增长率 (或衰减率) 大, 同时保证经缓冲算子处理前后的数据序列其最新数据值 $x(n)$ 和 $x(n)d$ 保持相等; 其次, 建立基于强缓冲算子处理后序列的生成模型; 再次, 将生成模型还原为原始数据模型. 本文的理论分析和实例表明, 经缓冲算子处理后建立的模型不仅能较好地反映后期序列快速增长的趋势, 同时又能充分利用原有所有数据信息 (包括前面大部分增长率较慢的数据), 模型具有很高的拟合精度和预测精度. 本文提出的若干个强化缓冲算子在实例分析和其他数值分析中具有较好的预测效果. 本文作者下一步的研究重点是对属于“数据少 (贫信息)、序列开头部分增长率较慢、只有最后小部分数据的增长率已明显呈现较快增长趋势”这一特征的序列, 如何根据其原始行为数据所携带的增长率变化信息选择强化缓冲算子 (即如何选择具有不同调节度的强化缓冲算子).

References

- Liu Si-Feng, Dang Yao-Guo, Fang Zhi-Geng, Xie Nai-Ming. *Grey System Theory and Its Application (Fifth edition)*. Beijing: Science Press, 2010. 38-41
(刘思峰, 党耀国, 方志耕, 谢乃明. 灰色系统理论及其应用 (第5版). 北京: 科学出版社, 2010. 38-41)
- Liu Si-Feng. The trap in the prediction of a shock disturbed system and the buffer operator. *Journal of Huazhong University of Science and Technology*, 1997, 25(1): 25-27
(刘思峰. 冲击扰动系统预测陷阱与缓冲算子. 华中理工大学学报, 1997, 25(1): 25-27)
- Wu Zheng-Peng, Liu Si-Feng, Mi Chuan-Min, Dang Yao-Guo, Cui Li-Zhi. Study on strengthening buffer operator based on fixed point. *Control and Decision*, 2010, 25(9): 1338-1342
(吴正朋, 刘思峰, 米传民, 党耀国, 崔立志. 基于不动点的新强化缓冲算子及其性质研究. 控制与决策, 2010, 25(9): 1338-1342)
- Dang Yao-Guo, Liu Si-Feng, Liu Bin, Tang Xue-Wen. Study on the buffer weakening operator. *Chinese Journal of Management Science*, 2004, 12(2): 108-111
(党耀国, 刘思峰, 刘斌, 唐学文. 关于弱化缓冲算子的研究. 中国管理科学, 2004, 12(2): 108-111)
- Xie Nai-Ming, Liu Si-Feng. A new applicative weakening buffer operator. *Chinese Journal of Management Science*, 2003, 11(S): 46-48
(谢乃明, 刘思峰. 一种新的实用弱化缓冲算子. 中国管理科学, 2003, 11(增刊): 46-48)
- Dang Yao-Guo, Liu Bin, Guan Ye-Qing. On the strengthening buffer operators. *Control and Decision*, 2005, 20(12): 1332-1336
(党耀国, 刘斌, 关叶青. 关于强化缓冲算子的研究. 控制与决策, 2005, 20(12): 1332-1336)
- Dang Yao-Guo, Liu Si-Feng, Mi Chuan-Min. Study on characteristics of the strengthening buffer operators. *Control and Decision*, 2007, 22(7): 730-734
(党耀国, 刘思峰, 米传民. 强化缓冲算子性质的研究. 控制与决策, 2007, 22(7): 730-734)
- Guan Ye-Qing, Liu Si-Feng. Sequence of strengthening buffer operator and its application based on fixed point. *Control and Decision*, 2007, 22(10): 1189-1192
(关叶青, 刘思峰. 基于不动点的强化缓冲算子序列及其应用. 控制与决策, 2007, 22(10): 1189-1192)
- Cui Jie, Dang Yao-Guo, Liu Si-Feng, Xie Nai-Ming. Study on a kind of new strengthening buffer operators and numerical simulations. *Engineering Science*, 2010, 12(2): 108-112
(崔杰, 党耀国, 刘思峰, 谢乃明. 一类新的强化缓冲算子及其数值仿真. 中国工程科学, 2010, 12(2): 108-112)
- Cui Li-Zhi, Liu Si-Feng, Wu Zheng-Peng. New strengthening buffer operators and their applications. *Systems Engineering Theory and Practice*, 2010, 30(3): 484-489
(崔立志, 刘思峰, 吴正朋. 新的强化缓冲算子的构造及其应用. 系统工程理论与实践, 2010, 30(3): 484-489)
- Wang Zheng-Xin, Dang Yao-Guo, Liu Si-Feng. Buffer operators with variable weights and the complement of axioms. *Systems Engineering*, 2009, 27(1): 113-117
(王正新, 党耀国, 刘思峰. 变权缓冲算子及缓冲算子公理的补充. 系统工程, 2009, 27(1): 113-117)
- Wang Zheng-Xin, Dang Yao-Guo, Pei Ling-Ling. The smoothness of buffer operators. *Systems Engineering Theory and Practice*, 2010, 30(9): 1643-1649
(王正新, 党耀国, 裴玲玲. 缓冲算子的光滑性. 系统工程理论与实践, 2010, 30(9): 1643-1649)



戴文战 浙江理工大学、浙江工商大学教授. 主要研究方向为系统建模和智能控制. 本文通信作者.

E-mail: dwz@zjgsu.edu.cn

(DAI Wen-Zhan Professor at Zhejiang Sci-Tech University and Zhejiang Gongshang University. His research interest covers system modeling and intelligent control. Corresponding author of this paper.)



苏永 浙江理工大学硕士研究生. 主要研究方向为灰色系统建模和预测.

E-mail: suyong0125@yahoo.com.cn

(SU Yong Master student in the Department of Automation, Zhejiang Sci-Tech University. His main research interest is grey modeling and prediction.)

基于人眼视觉特性的 NSCT 医学图像自适应融合

戴文战¹, 姜晓丽¹, 李俊峰²

(1. 浙江工商大学信息与电子工程学院, 浙江杭州, 310012; 2. 浙江理工大学自动化研究所, 浙江杭州, 310012)

摘 要: 医学图像融合对于临床诊断具有重要的应用价值. 针对多模态医学图像特性, 本文提出一种基于人类视觉特性的医学图像自适应融合方法. 首先, 对经配准的源图像进行非间隔采样轮廓变换((Nonsubsampled Coutourlet, NSCT)多尺度分解, 得到低频子带和若干高频方向子带; 其次, 根据低频子带集中了大部分源图像能量和决定图像轮廓的特点, 采用区域能量与平均梯度相结合的方法进行融合; 根据人眼对图像对比度及边缘、纹理的高敏感度, 在高频子带系数的选取时提出区域拉普拉斯能量、方向对比度与脉冲耦合神经网络(Pulse Coupled Neural Network, PCNN)相结合的融合策略; 进而, 提出了把与人类视觉高度一致的加权结构相似度(Weighted Structure Similarity, WSSIM)作为图像融合目标函数, 自适应地获取各子带的最优权值; 最后, 对灰度图像和彩色图像进行了大量融合比较实验, 并对不同融合方法进行分析对比. 实验结果表明: 本文算法不仅可以有效保留源图像的信息, 而且可以使融合图像灰度级更分散, 更好地保留了图像边缘信息, 具有更好的视觉效果.

关键词: 医学图像融合; 人类视觉特征; 加权结构相似度; 非间隔采样轮廓变换; 拉普拉斯能量和方向对比度; 脉冲耦合神经网络

中图分类号: TP391.4 文献标识码: A 文章编号: 0372-2112(2015) --

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2015.●.●

Adaptive Medical Image Fusion Based on Human Visual Features

DAI Wen-zhan¹, JIANG Xiao-li¹, LI Jun-feng²

(1. School of Information and Electronic Engineering, Zhejiang Gongshang University, Hangzhou, Zhejiang 310012;

2. Institute of automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou, Zhejiang 310012)

Abstract: Medical image fusion has very important application value for medical image analysis and diseases diagnosis. According to the characteristics of multi modality medical image and human visual features, a new medical image fusion algorithm in NSCT (nonsubsampled coutourlet, NSCT) domain is proposed. Firstly, source images after registration are decomposed into low and high frequency sub-bands using NSCT. According to the low frequency subbands concentrating the majority energy of the source image and determining the image coutour, a fusion rule based on weighted region average energy combined with average gradient is adopted in low frequency subband coefficients. Moreover, according to human visual system which is more sensitive to contrast and edge, texture of image, the fusion strategy based on directive contrast integrated with the improved energy of Laplacian and PCNN (Pulse Coupled Neural Network, PCNN) are used to fuse high-frequency subbands. Furthermore, a closed loop feedback is introduced into the fusion rules of low and high frequency subbands to obtain optimal fused weights adaptively by using WSSIM (Weighted Structure Similarity, WSSIM) which highly consistent with the HVS(human visual features, HVS) as objective function. Finally, a lot of experiments of fusion of images including gray images and color images based on different fusion methods are conducted. The experiment results are analyzed in terms of visual quality and objective evaluation. The experiment results show that the proposed algorithm can effectively preserve information and significantly improve the performance of fusion image in terms of quantity of information, dispersed gray scale, visual quality and objective evaluation index.

Key words: medical image fusion; HVF(Human Visual Features); WSSIM(Weighted Structure Similarity); NSCT(Nonsubsampled Coutourlet); directive contrast integrated with the improved energy of Laplacian; PCNN(Pulse Coupled Neural Network)

1 引言

由于成像原理及人体器官结构的复杂性,现有单一模态的医学图像仅能提供有限的信息,不同模态的医学图像之间既有冗余性又有独立性.就人体大脑而言,CT能清晰呈现高密度的骨骼结构,MRI对正常及病变软组织有较好的成像,SPECT一般能为低空间分辨率的组织血流和代谢功能提供较丰富的信息^[1-3].因此,近年来,医学图像融合技术的研究得到了广泛重视,医学图像融合对于临床诊断具有重要的应用价值,它在病症诊断及治疗时为医生提供更多、更准确的信息.

应用小波变换和非间隔采样轮廓变换,国内外学者对图像融合进行了很多相关研究.如陶观群等人^[4]、Lin等人^[5]将小波变换应用于医学图像融合中.然而小波变换不能有效地表示图像的边缘和纹理信息,对高频子带仅能进行水平、垂直和对角线三个方向分析.针对小波变换的缺陷,Barmas^[6]将Contourlet变换应用到图像融合中,但是由于其存在向下采样过程,出现了频谱混叠现象,容易引起伪吉布斯现象^[7,8].为了弥补这一不足,A L Cunha等人^[9]结合非下采样思想提出了NSCT,由于其具有良好的方向选择性及平移不变性,使得融合图像更符合人眼视觉特性.此外,目前的融合规则一般采用开环形式,阈值及融合系数的选取主要依赖于研究者本身的经验或需要反复试凑.近年来,杨艳春^[7]、郝文超^[10]、江平^[11]等学者尝试对图像进行自适应融合,实现链接强度的自适应变换;Chang Xin等人^[12]采用自适应黄金分割算法对低频子带进行融合;Liu Fan等人^[13]以信噪比为依据自适应选择图像分解层数;杨晓慧等人^[14]以信息熵作为目标函数来指导低频子带融合.

本文在以上研究的基础上,从人类视觉特性(human visual features, HVS)出发,提出一种基于NSCT的医学图像自适应融合算法.NSCT域中,根据低频子带集中了大部分源图像能量和决定图像轮廓的特点,采用区域能量与平均梯度相结合的方法;根据人眼对图像对比度及边缘、纹理的高敏感度,在进行高频子带系数的选取时提出结合区域拉普拉斯能量、方向对比度与PCNN的融合策略;进而,以提出的与人类视觉高度一致的加权结构相似度(WSSIM)为目标函数,自适应获取各子带的最优权值;最后,对灰度图像和彩色图像进行大量融合实验结果表明:本文算法可以有效保留源图像的信息,使融合图像灰度级更分散,更好地保留图像边缘的信息.

2 非间隔采样轮廓变换(NSCT)

Contourlet变换被认为是一种“真正”的图像二维表

示方法,能分别对多尺度和方向进行分析,但由于其变换有向下采样环节,不同频带存在频谱混叠,从而使其冗余性降低^[8].NSCT是在Contourlet变换基础上发展的,其目的在于消除频谱混叠现象,实现平移不变性及更好的方向选择性,使结果图像更符合人眼视觉特性.

NSCT通过满足Bozont恒等式条件的移不变滤波器组来实现多分辨率分解^[8],以非下采样塔形分解(Non-subsampled Pyramid, NSP)来获取多尺度特征,而非下采样方向滤波器组(Nonsubsampled Directional Filter Bank, NSDFB)来进行方向滤波.一般情况下,源图像经NSP分解得到低频子带和高频子带,然后高频子带经过NSDFB分解得到不同的方向子图,其结构框图如图1所示.

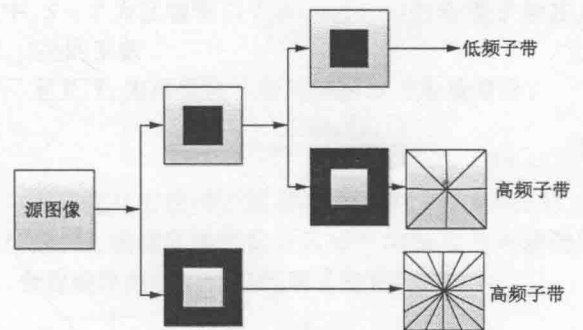


图1 NSCT变换

3 基于结构相似度的医学图像自适应融合

源图像经NSCT变换后得到的各子图与源图像同大小,这样有利于子图之间的比较^[1,8].本文提出的基于人类视觉特性的NSCT医学图像自适应融合方法的结构如图2所示.

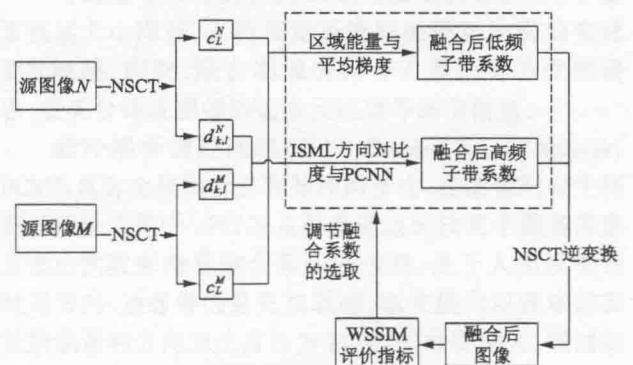


图2 本文医学图像融合方法流程图

首先将已配准的医学图像 M, N 分别进行NSCT分解,得到低频子带 c_L^M, c_L^N 和多个高频子带 $d_{k,l}^M, d_{k,l}^N$;然后根据各子带的特点、人类视觉特性和对目标图像的要求,以区域能量和平均梯度相结合的方法对低频子带进行融合;同时,以区域拉普拉斯能量和方向对比度与

PCNN 相结合进行高频子带的处理;最后以 WSSIM 为目标函数,自适应地获取各子带的最优权值,实现自适应融合。

3.1 加权结构相似度(WSSIM)

融合图像的评价方法包括主观评价和客观评价。由于融合图像以人眼为最终信宿,其质量的好坏主要取决于人的视觉感受。所以,图像的客观评价指标应尽可能符合人类的视觉特性,应与主观评价更一致^[15]。图像具有强结构性、像素之间强相关性的特点,在相关性中包含有结构信息。2002年 Wang 等人^[16]首次提出了结构相似度理论,2008年 Yang^[17]在 Wang 的基础上提出了区域结构相似度加权评价方法,同时证明了此方法在对融合图像的评价中有较好的结果,能够实现与人类视觉感受的高度统一。本文以 WSSIM 作为各子带融合的目标函数,其中 SSIM 包括图像的亮度、对比度、结构比较,其表达式详见文献^[18]。

在 SSIM 基础上,本文对源图像之间、源图像与结果图像之间分别进行区域结构相似度计算,得到 SSIM($M, N | w$), SSIM($M, F | w$), SSIM($N, F | w$),然后根据源图像间结构相似度的大小来进行融合指标的选取,最后对各区域融合指标进行加权求和。具体表达式如下:

$$WSSIM(M, N, F) = \sum_{w \in W} c(w) \cdot SSIM(M, N, F | w) \quad (1)$$

$$SSIM(M, N, F | w) = \begin{cases} \max(SSSIM(M, N | w) < 0.75 \\ SSIM(M, N | w) \geq 0.75 \\ \lambda_M SSIM(M, F | w) + \lambda_N SSIM(N, F | w) \\ SSIM(M, N | w) \geq 0.75 \end{cases} \quad (2)$$

式中, $\lambda_M = \frac{s(M | w)}{s(M | w) + s(N | w)}$, $s(M | w)$, $s(N | w)$ 表示两源图像在窗口 w 处的梯度显著度, $c(w) = \frac{s(M | w) + s(N | w)}{\sum_{w \in W} (s(M | w) + s(N | w))}$ 为两源图像 M, N 对应单个窗口显著性之和占空比。

3.2 低频子带融合准则

图像经 NSCT 变换后,低频子带集中了源图像的大部分能量,子带相邻系数间存在区域相关性。同时,低频子带作为源图像的平滑逼近,决定了图像的轮廓。平均梯度可以有效地反映图像信号的强度,反映其边缘化程度及其微小细节变化强度。由于图像的清晰度与梯度密切相关,本文采用区域能量和平均梯度相结合的方法来获取融合图像的低频子带。

低频子带系数矩阵中以 (i, j) 为中心的窗口能量表达式如式(3)所示,其中为了突出中心位置,应用窗口

函数 w 。

$$AA(i, j) = \sum_{m \in S} \sum_{n \in T} w(m, n) \cdot [c_L(i + m, j + n)]^2 \quad (3)$$

$$\text{其中, } w = \frac{1}{16} \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & 4 & 2 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}.$$

平均梯度定义如下式:

$$G(i, j) = \frac{1}{S \times T} \sum_{m \in S} \sum_{n \in T} \sqrt{[c_L(i + m, j + n) - c_L(i + m + 1, j + n)]^2 + [c_L(i + m, j + n) - c_L(i + m + 1, j + n + 1)]^2} \quad (4)$$

式中, $S \times T$ 为区域窗口大小, $c_L(i, j)$ 为低频子带在点 (i, j) 处的系数。

定义 T_1 为两低频子带对应区域的能量差异:

$$T_1(i, j) = \frac{AA_N(i, j)}{AA_M(i, j)} \quad (5)$$

采用优化方法选定适当的阈值 T ($T \in (0, 0.5)$)。如式(6)所示,根据区域能量及区域平均梯度与阈值的关系,合理确定结果图像的低频子带系数。

$$c_L^F(i, j) = \begin{cases} c_L^N(i, T_1(i, j)) \geq \frac{1}{T} \text{ 或 } T \leq T_1(i, j) \\ < \frac{1}{T} \text{ 且 } \overline{G^M}(i, j) \leq \overline{G^N}(i, j) \\ c_L^M(i, T_1(i, j)) < T \text{ 或 } T \leq T_1(i, j) \\ < \frac{1}{T} \text{ 且 } \overline{G^M}(i, j) > \overline{G^N}(i, j) \end{cases} \quad (6)$$

3.3 高频子带融合规则

对比度可以有效反映图像的显著特性,相对于像素强度大小而言,人类视觉系统对图像对比度的变化更加敏感。因此,融合图像应符合人类视觉特性的要求,要充分体现图像的边缘及纹理等细节信息。

脉冲耦合神经网络(Pulse Coupled Neural Network, PCNN)具有全局耦合性和脉冲同步性,在图像融合中得到了广泛应用^[19]。PCNN 主要是通过比较两子图各像素点激活次数来指导融合系数的选择。由于人类视觉系统对方向、边缘等信息更加敏感,本文提出以区域拉普拉斯能量和方向对比度作为 PCNN 的外部输入,同时结合对迭代累加激活幅度的软限幅方式进行 NSCT 域高频子带的系数融合。

3.3.1 脉冲耦合神经网络(PCNN)

PCNN 是由一定数量的神经元组成的反馈网络,每个神经元均由三部分组成:接收域、调制域及脉冲产生部分^[20]。本文结合文献^[21]提出的简化 PCNN 模型和文献^[22]提出的软限幅方法,通过对激活输出幅度的迭代

累加来指导子带系数的选取.其 PCNN 模型如图 3,数学表达式详见文献[22].

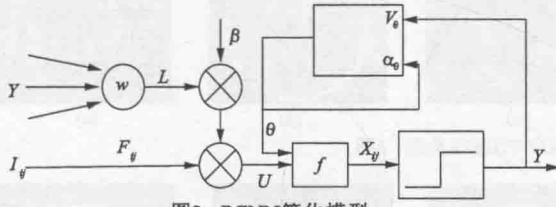


图3 PCNN简化模型

3.3.2 NSCT域拉普拉斯能量和方向对比度

对视觉系统的研究表明:对比度敏感阈值与背景强度之间呈非线性.采用式(7)所示的区域拉普拉斯能量方向对比度可以从高频子带中提取更多的特征,而且改进后的拉普拉斯能量和IEOL^[23]可以有效表示图像边缘、方向等细节信息,将方向对比度与拉普拉斯能量相结合可以获得更多更准确的显著特征.

$$dc(i, j) = \begin{cases} \frac{IEOL_{k,l}(i, j)}{\frac{1}{M \times N} \sum_{m \in M} \sum_{n \in N} (c_k(i + m, j + n))} \\ (\sum_{m \in M} \sum_{n \in N} (c_k(i + m, j + n))) / \alpha, \text{其他} \\ IEOL_{k,l}(i, j), \sum_{m \in M} \sum_{n \in N} (c_k(i + m, j + n)) = 0 \end{cases} \quad (7)$$

式中, α 为视觉常数,经生理视觉实验确定,其取值范围为(0.6, 0.7); $c_k(i, j)$ 为与第 k 层低频子带系数.

改进的拉普拉斯能量和定义如式(8),为了突出中心与邻域的特点,应用前节所示的窗口函数.

$$IEOL_{k,l}(i, j) = \sum_M \sum_N w(m, n) [ML_{k,l}(i + m, j + n)]^2 \quad (8)$$

$$ML_{k,l}(i, j) = [12d_{k,l}(i + m, j + n) - d_{k,l}(i + m - 1, j + n) - d_{k,l}(i + m + 1, j + n) + 12d_{k,l}(i + m, j + n) - d_{k,l}(i + m, j + n - 1) - d_{k,l}(i + m, j + n + 1)] \quad (9)$$

则区域拉普拉斯能量和方向对比度数学表达式为:

$$DC_{k,l}(i, j) = \sum_M \sum_N w(m, n) \cdot dc_{k,l}(i + m, j + n) \quad (10)$$

3.3.3 高频方向子带融合准则

定义 $K1, K2$ 为两子图激活幅度输出的比重:

$$K1(i, j) = \frac{R_{k,l}^M(i, j)}{R_{k,l}^M(i, j) + R_{k,l}^N(i, j)} \quad (11)$$

$$K2(i, j) = \frac{R_{k,l}^N(i, j)}{R_{k,l}^M(i, j) + R_{k,l}^N(i, j)}$$

高频子带系数融合数学表达式:

$$d_{k,l}^F(i, j) = \begin{cases} d_{k,l}^M(i, j) & K1 - K2 > \beta \\ d_{k,l}^N(i, j) & K2 - K1 > \beta \\ K1 \cdot d_{k,l}^M(i, j) + K2 \cdot d_{k,l}^N(i, j) & |K1 - K2| \leq \beta \end{cases} \quad (12)$$

式中: $d_{k,l}^M(i, j), d_{k,l}^N(i, j)$ 分别为高频子带 M, N 在第 k 层第 l 个方向的系数, $R_{k,l}^M(i, j), R_{k,l}^N(i, j)$ 分别为高频子带 M, N 经 PCNN 后激活幅度输出, β 为给定阈值.融合过程中,根据对应区域两高频子带激活幅度占空比之差与 β 之间的关系进行.这样既可以实现对细节特征的保留,同时又能保证结果图像的真实性和一致性.

4 融合图像评价指标

为了定量比较,本文采用信息熵^[24](Information Entropy, IE)、均方根交叉熵^[24](Root mean square Cross Entropy, RCE)、标准差^[24](Standard Deviation, SD)、边缘信息评价因子^[25](Edge information evaluation factor, QABF)和 WSSIM 对融合图像进行定量分析,详细介绍见文献[24, 25]

5 实验结果及分析

为了验证本算法的有效性,本文进行了大量的比较实验.现选用三种类型的五组经配准后的人脑组织作为源图像:① CT/MRI 图像融合;② MR-T1/MR-T2 图像融合;③ MRI/SPECT 图像融合.其中,图 4(a)、5(a)为两个不同人体组织的 CT 源图像;图 4(b)、5(b)相应两个组织的 MRI 源图像;图 6(a)为某一组织 MR-T1 源图像,图 6(b)为相应组织的 MR-T2 源图像,两者根据组织的含水量不同呈现不同灰度.

5.1 灰度图像融合

本文以 WSSIM 为性能指标,首先采用粒子群算法优化三个阈值 T, α 及 β . T, α 及 β 作为三维种群,初始种群采用规模为 20,根据各阈值的区间随机数进行 30 次进化来获得全局最优.有关粒子群算法详见文献[14].

图 4 中的 c 、图 5 中的 c 、图 6 中的 c 分别为应用文献[26]提出的低频方差比加权与高频能量比加权相结合的融合图像;图 4 中的 d 、图 5 中的 d 、图 6 中的 d 分别为应用文献[27]提出的用平均梯度和方差指导低频融合、高频基于梯度能量比加权的融合图像;图 4 中的 e 、图 5 中的 e 、图 6 中的 e 分别为应用文献[28]提出的低频基于局部能量和局部方差策略,高频基于均方差策略的 NSCT 域融合图像;图 4 中的 f 、图 5 中的 f 、图 6 中的 f 分别为应用本文提出的方法得到的图像.

采用上述不同的融合方法得到的融合图像的质量如表 1 ~ 表 3 所示.

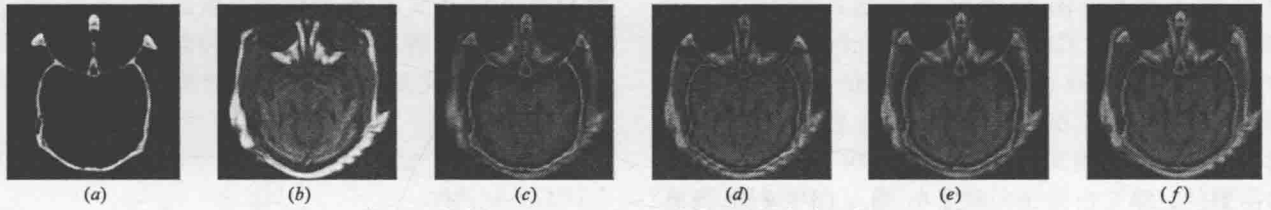


图4 正常脑部CT/MRI及不同方法的医学图像融合结果

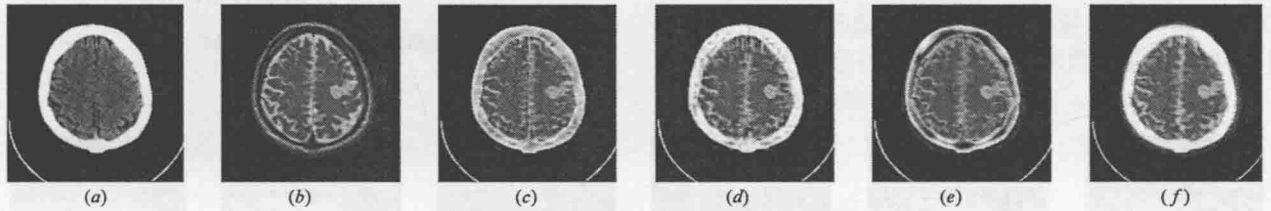


图5 急性脑卒中CT/MRI及不同方法的医学图像融合结果

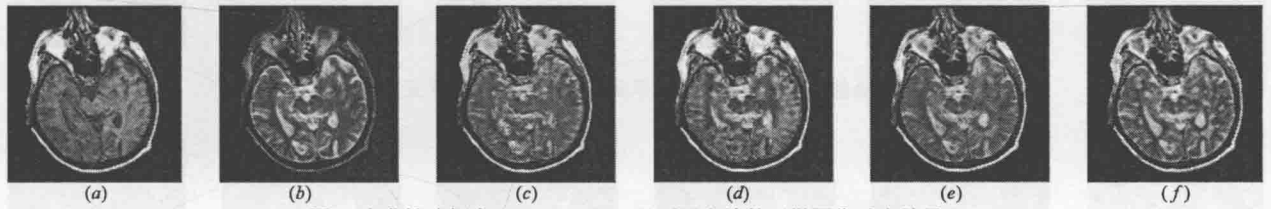


图6 多发性脑梗塞MR-T1/MR-T2及不同方法的医学图像融合结果

图6 多发性脑梗塞 MR-T1/MR-T2 及不同方法的医学图像融合结果

由表 1~表 3 可以看出,较之三组参考文献结果,综合各项评价指标,应用本文提出的算法具有良好的特性,图像质量也得到了明显地提升.观察图 5 和图 6,可以发现本算法可提取更清晰病灶边缘,且能更突出表现病灶.从图 4~图 6 可以看到,应用本算法的得到的 *f* 系列融合图像能更有效地保留 CT 图像的骨骼组织信息和 MRI 图像的软组织信息,提高了图像的清晰度.

表 1 图 4 中采用不同融合方法的医学图像融合评价

评价指标 融合方法	IE	RCE	SD	QABF	WSSIM
[26]方法	5.8735	2.4414	28.8439	0.4693	0.7841
[27]方法	5.9377	2.4704	31.7085	0.5299	0.8094
[28]方法	5.9138	2.4078	29.9047	0.7376	0.8963
本文方法	5.9455	2.7386	32.0185	0.6870	0.9072

表 2 图 5 中采用不同融合方法的医学图像融合评价

评价指标 融合方法	IE	RCE	SD	QABF	WSSIM
[26]方法	5.1603	1.0124	76.7863	0.4182	0.7802
[27]方法	4.4970	0.9441	86.2657	0.4175	0.8233
[28]方法	5.2941	1.5893	69.1304	0.5299	0.7915
本文方法	5.5269	1.2601	85.3026	0.4342	0.8513

表 3 图 6 中采用不同融合方法的医学图像融合评价

评价指标 融合方法	IE	RCE	SD	QABF	WSSIM
[26]方法	5.1506	0.1386	66.5978	0.4866	0.8223
[27]方法	5.0208	0.1355	72.3637	0.5059	0.8330
[28]方法	5.2148	0.1341	67.6703	0.5764	0.8926
本文方法	5.3940	0.1267	68.1032	0.5487	0.8769

为了更清楚地说明这一点,本文将图 4 中融合图像的右半部分(如图 4(c)所示矩形区域)取出,如图 7 所示.比较图 7 中各图可清晰地看到:应用本方法能从源图像中提取更多的信息,可以更好地保留源图像的纹理信息,目标边缘更加清晰.

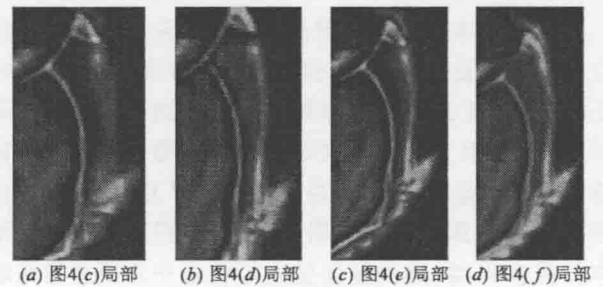


图7 图4中融合图像局部区域比较

5.2 彩色图像融合

本文提出的算法不仅适用于灰度图像融合,还可

进行彩色与灰色图像之间的融合. 本文以 24 位彩色图像与 8 位灰度图像的融合为例, 其流程图如图 8 所示, 其中 HIS 与 RGB 的转换算法具体详见文献[29].

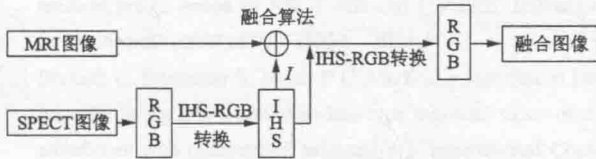


图8 MRI/SPECT图像融合流程图

实验结果如图 9、图 10 所示. 图 9 中的 *a*、图 10 中的 *a* 分别为两个不同组织的 SPECT 源图像; 图 9 中的 *b*、图 10 中的 *b* 分别为相应组织的 MRI 源图像. 图 9 中的 *a*、图 10 中的 *c* 分别由文献[26]提出的算法得到; 图 9 中的 *d*、图 10 中的 *d* 分别由文献[27]提出的算法得到; 图 9 中的 *e*、图 10 中的 *e* 分别由文献[28]提出的算法得到; 图 9 中的 *f*、图 10 中的 *f* 分别为应用本文提出的方法得到的图像. 对于彩色图像的评价, 根据 RGB 颜色通道分别进行评价, 然后取均值作为最终的性能指标, 分析结果如表 4, 表 5 所示.

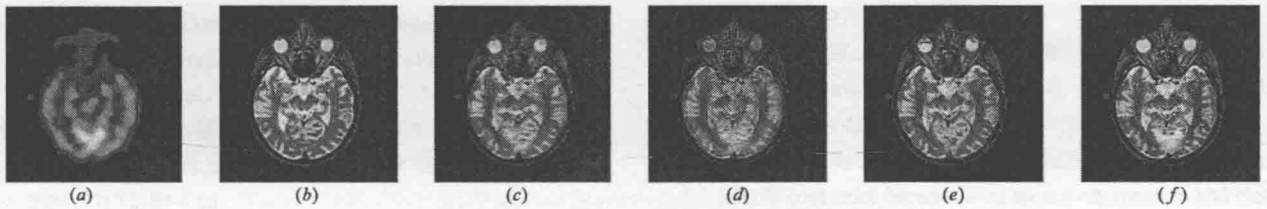


图9 正常脑部SPECT/MRI及不同方法的医学图像融合结果

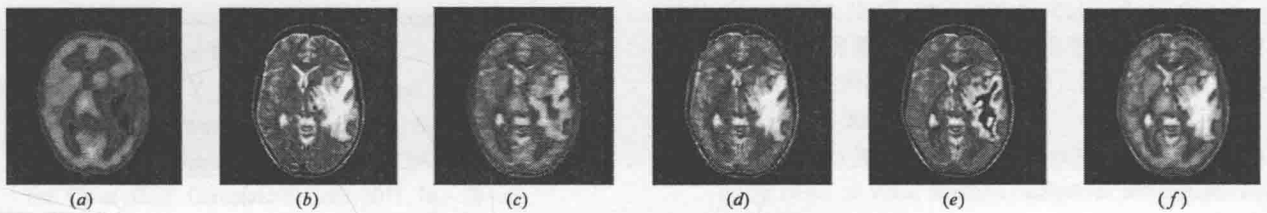


图10 转移性肺癌SPECT/MRI及不同方法的医学图像融合结果

表 4 图 9 中采用不同融合方法的医学图像融合评价

评价指标	IE	RCE	SD	QABF	WSSIM
[26]方法	4.2575	0.1920	60.9176	0.2553	0.6729
[27]方法	4.0685	0.1899	56.5751	0.4281	0.7702
[28]方法	3.9660	0.1775	62.1340	0.6052	0.8427
本文方法	4.2922	0.1885	65.5887	0.4722	0.8304

表 4 图 10 中采用不同融合方法的医学图像融合评价

评价指标	IE	RCE	SD	QABF	WSSIM
[26]方法	4.4816	0.3549	63.5597	0.2942	0.7392
[27]方法	4.4780	0.4202	70.4040	0.4363	0.8059
[28]方法	4.3094	0.3762	64.0612	0.4987	0.8093
本文方法	4.5712	0.4040	72.6199	0.4247	0.8364

综合以上实验结果可以得出如下结论: 与已有的其它 3 种融合方法相比, 本文算法所得图像在信息熵 IE、标准差 SD 及结构相似度 WSSIM 等方面具有较好的特性, 表明融合图像从源图像中提取的信息更多, 与源图像的差异更小; 图像包含了更丰富的信息量和较大

的对比度. 同时由图 10 可以发现: 本文算法对病灶(图像右侧白色部分)提取更加完整、突出, 图像边缘信息更丰富, 更符合人类视觉特性; 虽然文献[28]分别利用均方差和局部方差作为高、低频融合规则, 其融合图像的对比较好, 但病灶不突出, 使用价值不如本文算法.

6 结论

医学图像融合一方面要求融合后的图像尽可能准确、丰富地体现输入图像所含有信息; 另一方面要求融合图像应适应人类视觉系统. 基于此, 本文提出了一种 NSCT 域的医学图像自适应融合算法, 低频子带融合采用基于区域能量和平均梯度相结合的策略, 高频子带融合提出拉普拉斯能量和方向对比度与 PCNN 相结合的方法, 并以 WSSIM 作为目标函数, 自适应地获取各子带的最优权值. 本文将所提出的融合策略在灰度图像及彩色图像中进行了大量实验仿真, 结果均表明本文提出的融合方法在主、客观评价指标上均明显优于其它融合方法, 得到的图像视觉效果更好, 能更完整地表达病灶区域信息. 这一评价结果也得到了临床医生的充分肯定和认同.