



中国图形学象报

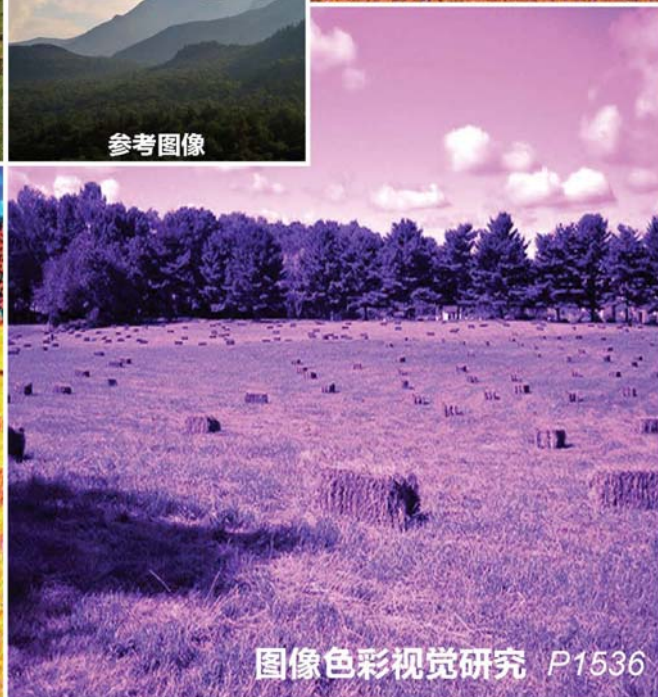
11

ISSN1006-8961
CN11-3758 /TB



原始图像

参考图像



图像色彩视觉研究 P1536

中国图象图形学报

刊名题字：宋健 | 月刊（1996年创刊）



第18卷第11期（总第211期）

2013年11月16日

中国精品科技期刊
中国国际影响力优秀学术期刊
中国科技核心期刊

版权声明

凡向《中国图象图形学报》投稿，均视为同意在本刊网站及CNKI等全文数据库出版，所刊载论文已获得著作权人的授权。本刊所有图片均为非商业目的使用，所有内容，未经许可，不得转载或以其他方式使用。

Copyright

2013 all rights reserved by Journal of Image and Graphics, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS. The content (including but not limited text, photo, etc) published in this journal is for non-commercial use.

主管单位 中国科学院

主办单位 中国科学院遥感与数字地球研究所

中国图象图形学学会

北京应用物理与计算数学研究所

主 编 李小文

编辑出版《中国图象图形学报》编辑出版委员会

邮政信箱 北京9718信箱

邮 编 100101

电子信箱 jig@irsa.ac.cn

电 话 010-64807995 010-82614429

网 址 www.cjig.cn

广告经营许可证 京朝工商广字第0361号

总 发 行 北京报刊发行局

订 购 全国各地邮局

海外发行 中国国际图书贸易集团有限公司

（邮政信箱：北京399信箱 邮编：100048）

印刷装订 北京科信印刷有限公司

Journal of Image and Graphics

Title inscription: Song Jian | Monthly, Started in 1996

Superintended by Chinese Academy of Sciences

Sponsored by Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS

China Society of Image and Graphics

Institute of Applied Physics and Computational Mathematics

Editor-in-Chief LI Xiaowen

Editor, Publisher Editorial and Publishing Board of Journal of
Image and Graphics

P.O.Box 9718, Beijing, P.R.China

Zip code 100101

E-mail jig@irsa.ac.cn

Telephone 010-64807995 010-82614429

Website www.cjig.cn

Distributed by Beijing Bureau for Distribution of Newspapers and Journals

Domestic All Local Post Offices in China

Overseas China International Book Trading Corporation

(P.O.Box 399, Beijing 100048, P.R.China)

Printed by Beijing Kexin Printing Co., Ltd.

CN 11-3758/TB

ISSN 1006-8961

CODEN ZTTXFZ

国外发行代号 M1406

国内邮发代号 82-831

国内定价 50.00元

综述

- 多媒体技术研究: 2012——多媒体数据索引与检索技术研究进展
中国计算机学会多媒体专业委员会 1383

图像处理和编码

- 热扩散和整体变分模型自适应调整的图像放大模型
王相海, 艾新南 1398
- 椒盐图像的方向加权均值滤波算法
李佐勇, 汤可宗, 胡锦涛, 林亚明 1407
- 3维自适应最小误差阈值分割法
刘金, 金炜东 1416
- 结构约束和样本稀疏表示的图像修复
康佳伦, 唐向宏, 任澍 1425
- 结合小波变换和自适应分块的多聚焦图像快速融合
刘羽, 汪增福 1435

图像分析和识别

- 飞行时间3维相机的多视角散乱点云优化配准
张旭东, 吴国松, 胡良梅, 王竹萌, 邱维巍 1445
- 采用独立色素浓度分布分割皮损图像
徐舒畅 1452
- 基于CUDA的并行加速渲染算法
刘镇, 郝冬宁, 梅向东 1457
- 连续最大流图像分割模型及算法
杨晓艺, 王小欢, 宋锦萍 1462
- 词袋特征压缩算法比较研究
杨赛, 赵春霞 1468

图像理解和计算机视觉

- 融合对象性和视觉显著度的单目图像2D转3D
袁红星, 吴少群, 朱仁祥, 安鹏 1478

计算机图形学

- 多风格融合的复杂森林场景自适应可视化
董天阳, 夏佳佳, 范菁 1486

遥感图像处理

- 保留结构细节的遥感海表温度图像的采样与重构
崔雪森, 杨胜龙, 伍玉梅, 戴阳, 范秀梅 1497
- 组合四相机拼接影像的颜色平衡
任超锋, 姚娜, 林宗坚 1504
- 复杂背景下多样水体遥感自动解译
夏列钢, 沈占锋, 李均力, 骆剑承 1513

“第十届全国智能CAD与数字娱乐会议”专栏

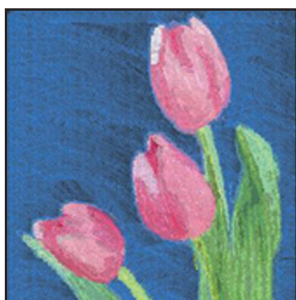
- 3D树木建模技术研究进展
谭云兰, 贾金原, 张晨, 李光耀 1520
- 网格分割的3维网格模型非盲水印算法
杜顺, 詹永照, 王新宇 1529
- 基于放缩系数和均值的多参数颜色迁移
王世亮, 徐岗, 储清林, 胡维华, 汪国昭 1536
- 基于参考图像的色粉画模拟
郑智斌, 张岩, 孙正兴, 杨克微 1542



融合对象性和视觉显著度的单目图像2D转3D(第1478页)



网格分割的3维网格模型非盲水印算法(第1529页)



基于参考图像的色粉画模拟(第1542页)

CONTENTS

JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS



Single-view image 2D-to-3D conversion based on objectness and visual saliency(P1478)



Non-blind watermarking algorithm for 3D mesh models based on mesh segmentation(P1529)



Color transfer with multiple parameters by combining the scaling and mean values(P1542)

Review

- Researches on multimedia technology, 2012
Multimedia data indexing and retrieval technology: a review
CCF Multimedia Technology Committee 1383

Image Processing and Coding

- Image magnification model based on adaptive adjustment of thermal diffusion and TV model
Wang Xianghai, Ai Xinnan 1398
Directional weighted mean filter for image with salt & pepper noise
Li Zuoyong, Tang Kezong, Hu Jinmei, Lin Yaming 1407
Three-dimensional adaptive minimum error thresholding segmentation algorithm
Liu Jin, Jin Weidong 1416
Image inpainting by structural constraints and sample sparse representation
Kang Jialun, Tang Xianghong, Ren Shu 1425
Multi-focus image fusion based on wavelet transform and adaptive block
Liu Yu, Wang Zengfu 1435

Image Analysis and Recognition

- Multi-view scattered point cloud optimization registration using a TOF camera
Zhang Xudong, Wu Guosong, Hu Liangmei, Wang Zhumeng, Di Weiwei 1445
Skin lesion segmentation by using independent pigment concentration distribution
Xu Shuchang 1452
Based on the parallel rendering algorithm in CUDA
Liu Zhen, Hao Dongning, Mei Xiangdong 1457
Image segmentation model and algorithm based on continuous max-flow approach
Yang Xiaoyi, Wang Xiaohuan, Song Jinping 1462
Comparative research on compression algorithms of bag-of-features
Yang Sai, Zhao Chunxia 1468

Image Understanding and Computer Vision

- Single-view image 2D-to-3D conversion based on objectness and visual saliency
Yuan Hongxing, Wu Shaoqun, Zhu Renxiang, An Peng 1478

Computer Graphics

- Adaptive visualization of multi-style composition for complex forest scene
Dong Tianyang, Xia Jiajia, Fan Jing 1486

Remote Sensing Image Processing

- Structural detail-reserving method of sampling and reconstruction of remote sensing SST image
Cui Xuesen, Yang Shenglong, Wu Yumei, Dai Yang, Fan Xiumei 1497
Color balancing of the stitched images of a combined four-head camera
Ren Chaofeng, Yao Na, Lin Zongjian 1504
Automatic interpretation of diverse water bodies from remotely sensed images in complex background
Xia Liegang, Shen Zhanfeng, Li Junli, Luo Jiancheng 1513

Issum of CIDE' 2013

- Survey on Virtual 3D Tree Modeling Technologies
Tan Yunlan, Jia Jinyuan, Zhang Chen, Li Guangyao 1520
Non-blind watermarking algorithm for 3D mesh models based on mesh segmentation
Du Shun, Zhan Yongzhao, Wang Xinyu 1529
Color transfer with multiple parameters by combining the scaling and mean values
Wang Shiliang, Xu Gang, Chu Qinglin, Hu Weihua, Wang Guozhao 1536
Image-based pastel simulation
Zheng Zhibin, Zhang Yan, Sun Zhengxing, Yang Kewei 1542

中图法分类号: TP391.41 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2013)11-1497-07

论文引用格式: 崔雪森, 杨胜龙, 伍玉梅, 戴阳, 范秀梅. 保留结构细节的遥感海表温度图像的采样与重构[J]. 中国图象图形学报, 2013, 18(11): 1497-1503. [DOI:10.11834/jig.20131114]

保留结构细节的遥感海表温度图像的采样与重构

崔雪森, 杨胜龙, 伍玉梅, 戴阳, 范秀梅

农业部东海与远洋渔业资源开发利用重点实验室, 上海 200090

摘要: 为了用较小的数据量重构出保留细节结构的高分辨率海表温度(SST)图像, 对海表温度脊线和谷线、温度梯度脊线以及残差图像脊线进行采样, 与陆地边界以及矩形域的边缘一起作为边界条件, 利用 Laplace 方程的 9 点差分形式, 对海域中所有的节点迭代计算, 重构出海表温度场。选取了 2012 年 5 月份东海以及西太平洋海域的 MODIS 3 级产品的月平均海表温度进行采样与重构实验, 结果表明, 复原图像与原图像误差最大绝对值为 0.3960°C , 回放等值线与原等值线叠合吻合较好, 说明用该方法进行海表温度场重构具有可行性。

关键词: 结构细节; 海表温度(SST); 采样与重构; 有限差分格式

Structural detail-reserving method of sampling and reconstruction of remote sensing SST image

Cui Xuesen, Yang Shenglong, Wu Yumei, Dai Yang, Fan Xiumei

Key Laboratory of East China Sea & Oceanic Fishery Resources Exploitation
and Utilization, Ministry of Agriculture, Shanghai 200090, China

Abstract: In order to reconstruct high-resolution images of sea surface temperature (SST) preserving the structural details using less amount of data, ridge and valley lines of SST, ridge lines of SST gradient and ridge lines of residual image were sampled. Combined with the land boundary and rectangle domain edges, the sampled points were set as boundary conditions. By the 9-point difference scheme of the Laplace equation, all nodes were calculated using finite-difference iterative method and the SST field was reconstructed. As a test, the SST image of level 3 MODIS product covering East China Sea and West Pacific in May 2012 was resampled and reconstructed. The result showed that the maximum absolute error between the retrieved image and the original one is less than 0.3960°C . The reconstructed contours fit well with the original ones in the overlapped picture. It showed that the method for SST field reconstruction is feasible.

Key words: structural detail; sea surface temperature (SST); sampling and reconstruction; finite difference scheme

0 引言

海表温度场是海洋与大气相互热力学交换、海洋本身动力学等综合作用的结果, 随着遥感与信息技术的发展, 使得快速、大面积、高分辨率地

获取海表温度场成为现实, 遥感图像数据量也随之不断增大。虽然当前互联网传输速率和电子存储能力也有飞跃般地发展, 但在应用海洋环境的某些领域(如在大洋公海上通过海事卫星传输海表温度遥感图像), 必须要将遥感图像进行重采样以减小遥感图像数据的体积、降低传输成

收稿日期: 2012-12-27; 修回日期: 2013-04-19

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)基金项目(2007AA092202)

第一作者简介: 崔雪森(1973—), 男, 副研究员, 1997 年于厦门大学获海洋生物专业学士学位, 主要从事渔业遥感应用方面的研究。

E-mail: cuixuesen@eastfishery.ac.cn

本。在允许一定的精度损失范围内,保留温度场的涡旋、锋面等某些细节特征,以利于分析和预测渔场。

在图像重采样方法方面,过去的研究多基于空间域的均匀采样和量化^[1-2],但如果按最高局部频率所需采样孔径,则所得图像会有很高的数据冗余;如果扩大采样孔径,则会造成遥感图像的细节结构的损失。另外基于小波变换的方法从频率域编码的角度采样也可以达到减小遥感图像体积的目的^[3-4],但只适合于大面积的图像,而随着小波分解所用基础面积的减少,重构后的图像质量会大大降低^[5]。

在曲面重构技术方面,多通过大量的测量数据点来重现实物的曲面模型,一般分为两类^[6]:一是矩形域网格曲面的重构,其中以基于 NURBS 的拓扑矩形域的构造方案为代表,并已经成为产品外形几何定义的工业标准;二是针对散乱点的 Bézier 三角域为基础的曲面重构方案^[7-8]。由于海表温度分布反映了高温与低温水的交错变化,直接影响了渔场的形成和变化方向;海表温度梯度强度的高低是大洋中上升流、大洋环流的一个重要指标,两者是进行渔场分析的最重要参考^[9-10]。因此,将海洋表温场的脊谷线和温度锋面作为采样数据点,将其作为边界条件,利用 Laplace 方程的差分方法进行迭代插值,对海表温度进行初步重构。得到图像残差的特征点后,与原采样点合并,共同作为边界条件,达到在能保留海表温度细节特征的前提下,减小数据量的目的。

1 特征点集合 P 的采样方法

特征点集合 P 分为两部分:一是原始海表温度图像的特征点,包括温度谷脊线、梯度谷脊线以及陆地和整个有界区域的边界,由这部分特征点构成的边界条件可初步重构出图像;二是原始海表温度图与初步重构出的图像的残差特征点。

1.1 原始海表温度图像特征点 P_T

1.1.1 温度谷脊线的采集

地形经、纬度断面上的高程极大值是脊线上的点,而极小值是谷线上的点。设当前点的温度值为 $T_{i,j}$ (i, j 为图像中的行列数),利用文献[11]提供的方法,如果 $(T_{i,j} - T_{i-1,j})(T_{i,j} - T_{i+1,j}) > 0$ 或 $(T_{i,j} - T_{i,j-1})(T_{i,j} - T_{i,j+1}) > 0$,则可确定当前点为脊线或

谷线上的点。在此基础上,如果 $T_{i,j} - T_{i-1,j} > 0$ 或 $T_{i,j} - T_{i,j-1} > 0$,则可确定当前点在脊线上;如果 $T_{i,j} - T_{i-1,j} < 0$ 或 $T_{i,j} - T_{i,j-1} < 0$,则当前点在谷线上。将满足上述条件的所有点合并成为海表温度图的脊谷线点的集合。

1.1.2 梯度谷脊线的采集

温度梯度可应用求温度梯度幅值(GM)的方法来确定^[12]。设当前点的温度为 $T_{i,j}$,则点 (i, j) 的表温梯度强度为

$$g_{i,j} = \sqrt{(T_{i+1,j} - T_{i-1,j})^2 + (T_{i,j+1} - T_{i,j-1})^2} / (2k) \quad (1)$$

式中, k 为表温图像中相邻格点的最小距离。计算得到整幅图像的温度梯度强度图后,利用求温度脊谷线的方法,计算得到温度梯度的脊线集合。

1.2 残差图像特征点 P_R 的采样

利用原始海表温度图像特征点作为边界条件,可初步重构出图像。初步重构出的图像与原始图像中对应的各个点相减,得到残差图像。利用 1.1.1 节中对原始图像脊线的采集方法,得到残差图像中特征点集合 P_R 。为了减少最终采样数据文件的体积,只保留 P_R 中残差值大于某个误差阈值的特征点。

将上述两种边界点合并成集合 $P = \{P_T, P_R\}$,存储集合中所有点的行列索引号、温度值和经纬度方向的梯度值。如果矩形区域边界的点位于陆地,则温度值设为 -1,否则取当前点的海水温度。陆地和矩形边界上的温度梯度不能确定,均设为 0。

2 图像的重构方法

2.1 Laplace 方程的建立与边界条件的确定

Poisson 方程描述的是稳定的现象,即与时间无关的现象。Reynolds^[13]利用 Poisson 方程通过有限差分方法对海表温度进行了数值求解,式中 ΔT (Δ 为 Laplace 微分算子, T 为海表温度)的值由卫星及现场数据计算得到,但在数据不足时对 ΔT 进行了赋 0 处理,即 Poisson 方程的 Laplace 形式。从物理意义上讲, ΔT 表示温度梯度的散度,将其设为常数 0,表示温度梯度场(矢量场)为一个无散场。为了减小存储空间,本研究中的 ΔT 值也统一设为常数 0,即

$$\begin{cases} \Delta T = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0 & (x, y) \in D \\ T = f(x, y) & (x, y) \in \partial D \\ \frac{\partial T}{\partial n} = g(x, y) & (x, y) \in \partial D \end{cases} \quad (2)$$

式中, D 为 x - y 平面的一有界区域, 边界用 ∂D 表示。 $\partial T/\partial n$ 为 T 的外法向导数。

但由于海表温度(SST)的图像数据采用了栅格形式, 要计算外法向导数需要将边界转化为矢量格式, 实现比较困难, 并且因与采样点不能一一对应, 不方便数据的存储, 因此这里将式(2)中的求外法向导数更换为求 x, y 方向的导数, 即将 $\partial T/\partial n = g(x, y)$ 转换为

$$\begin{cases} \partial T/\partial x = g_x(x, y) \\ \partial T/\partial y = g_y(x, y) \end{cases} \quad (3)$$

式中, $\partial T/\partial x$ 和 $\partial T/\partial y$ 分别为经、纬度方向导数。

2.2 9点有限差分格式及边界条件的处理

Laplace 方程的有限差分格式有多种形式, 为了能够利用经、纬度方向导数这一边界条件, 故采用式(4)的9点格式, 其截断误差为 $O(k^4)$ [14]。

$$T_{i,j} = \frac{1}{60} (16T_{i,j-1} + 16T_{i,j+1} + 16T_{i-1,j} + 16T_{i+1,j} - T_{i,j-2} - T_{i,j+2} - T_{i-2,j} - T_{i+2,j}) \quad (4)$$

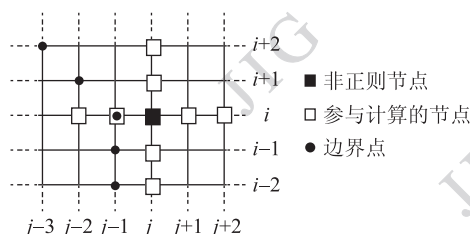
边界条件的差分格式为

$$\begin{cases} T_{i,j} = f(x_j, y_i) \\ \frac{T_{i,j+1} - T_{i,j-1}}{2k} = g_x(x_j, y_i) \\ \frac{T_{i+1,j} - T_{i-1,j}}{2k} = g_y(x_j, y_i) \end{cases} \quad (5)$$

式中, i, j 分别为差分节点的行列数, $(x_j, y_i) \in P$ 。由于式(4)中包含了 $T_{i,j\pm 2}$ 和 $T_{i\pm 2,j}$, 这就意味着计算有些内点(非正则节点)要使用边界以外的值(可能该点也是内点, 但有边界间隔, 不宜直接使用)。可用离散的边界条件来消除这一问题: 假定当前要计算的点 (i, j) 的温度为 $T_{i,j}$, 其中点 $(i, j-2)$ 与当前点之间有边界存在(如图1), 则通过边界条件式(5)计算得到 $T_{i,j-2} = T_{i,j} - 2g_x(x_{j-1}, y_i)k$, 代入式(4), 可得

$$T_{i,j} = \frac{1}{61} (16T_{i,j-1} + 16T_{i,j+1} + 16T_{i-1,j} + 16T_{i+1,j} + 2g_x(x_{j-1}, y_i)k - T_{i,j+2} - T_{i-2,j} - T_{i+2,j}) \quad (6)$$

其他非正则节点也作同样处理。



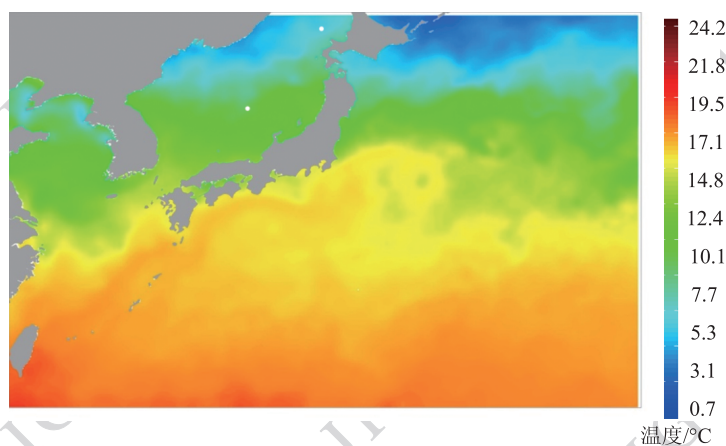


图2 2012年5月东海及西太平洋原始海表温度场

Fig. 2 The original SST field of East China Sea and West Pacific in May 2012

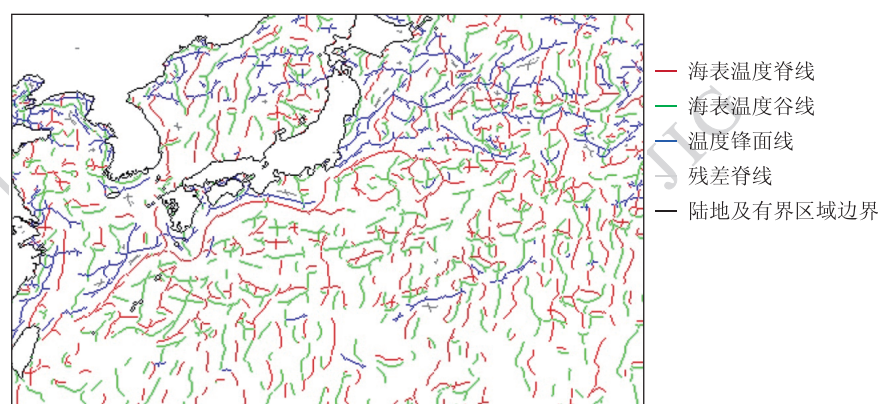


图3 由海表温度和温度梯度提取出的边界节点

Fig. 3 Boundary points extracted from SST and gradient

先将与上面数据相同形状的一个矩阵初始化为 -1 , 设迭代终止误差 $\varepsilon = 0.01$, 对各个待定点进行迭代计算。当迭代次数达到1433次时, 迭代累积误差减小至0.00999(如图4), 终止迭代过程, 得到最终的重构结果(如图5)。

3.2 重构效果评价

将重构的SST图像与原始SST图像相减, 得到两者的较差图(图6)。两者最大误差的绝对值为 0.3960°C , 误差带的出现频率如图7所示, 其分布为单峰, 平均值为 -0.0035 , 偏斜度 g_1 为 -0.00697 , 非常接近0, 所以整个误差大致以 $x=0$ 为轴对称分布, 误差分布较合理。峭度(kurtosis)值 g_2 为1.98, 为正峭度, 说明接近于0误差的点比例较高。

另外, 再生等高线与原等高线叠合检查是一种有效的DEM(数字高程模型)精度分析方法, 可以全面

评价DEM精度总体状况和DEM与实际地形吻合情况^[19]。有鉴于此, 将原图像和重构数据分别生成 1°C 间隔等值线(如图8), 两者叠加可以发现,

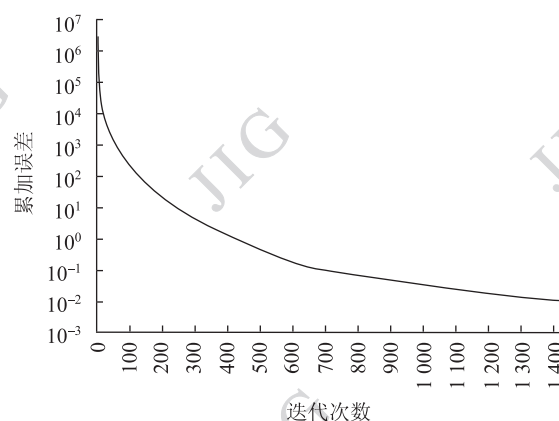


图4 累积误差随迭代次数的变化情况

Fig. 4 The variation of accumulative error with iteration times

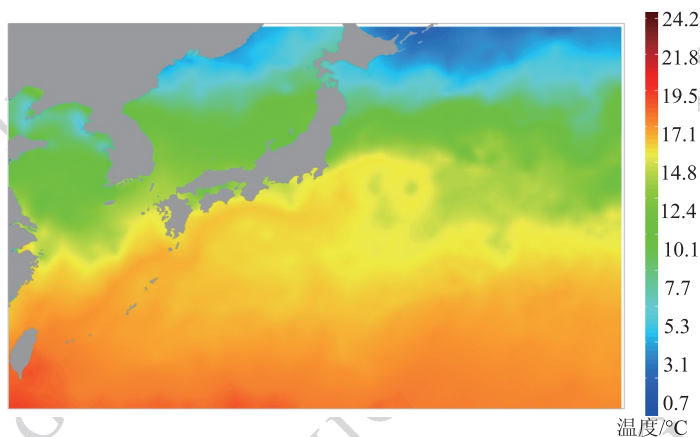


图5 重构出的海表温度场

Fig. 5 The reconstructed SST field

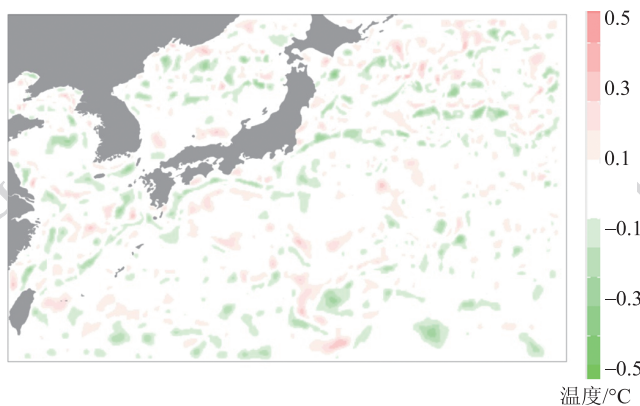


图6 重构的海表温度与原始海表温度的误差分布

Fig. 6 The error distribution between reconstructed SST and original one

等值线虽有小的偏离,但总体上比较吻合,黑潮走向、不同尺度涡旋位置等海洋细节结构都得到了较好的重现。

为了定量地分析重构效果,本研究采用层次等高线差异栅格分析法进行了检验^[20]。设海表温度曲面函数 $T=f(x,y)$, 温度为 c 的等高线是平面 $T=c$ 横截海表温度曲面的截线,则 $T=f(x,y)>c$ 在平面上的投影为数据区域边界围成的封闭区域。设原始等高线图中高程为 c 的等高线和由重构绘制的高程为 c 的等高线构成的区域分别为集合 A 、 B , 则两组等高线的位置差异面积可通过求两个封闭区域的异或 $(A \oplus B)$ 得到。分级统计等高线 c_k ($k=1, 2, \dots, M$, 其中 M 为等高线最大值的索引号) 的变形量为 $E_k = \text{差异面积} / \text{高程带(原始等高线 } c_k \text{ 与 } c_{k+1} \text{ 之间) 面积}$ 。

经计算,图8中各级等高线变形量均小于0.1

(如图9),平均值为0.062,同样说明重构与的SST图像与原图像非常接近。

3.3 压缩比率

在保障数据精度的前提下,也要考虑数据压缩效果。设原始图像中各点的数据类型为浮点型(float),行列值分别为 M 和 N ,则原始数据的存储空间 $S_o = s_{\text{float}} \times M \times N = 4 \times M \times N$ 。

设提取出的边界点个数为 K ,其C语言描述的边界点的数据结构如下:

```
struct CEdgePoint
{
    //边界点在原始矩阵中的行、列索引值
    short RowIndex, ColIndex;
    //所在点的温度值
    float SST;
    //所在点的经向和纬向的梯度强度值
    float xGrad, yGrad;
}
```

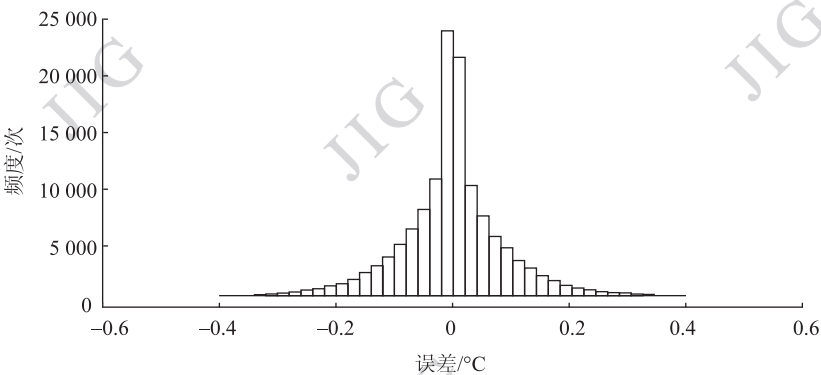


图7 重构误差分布直方图

Fig. 7 The histogram of reconstruction error distribution

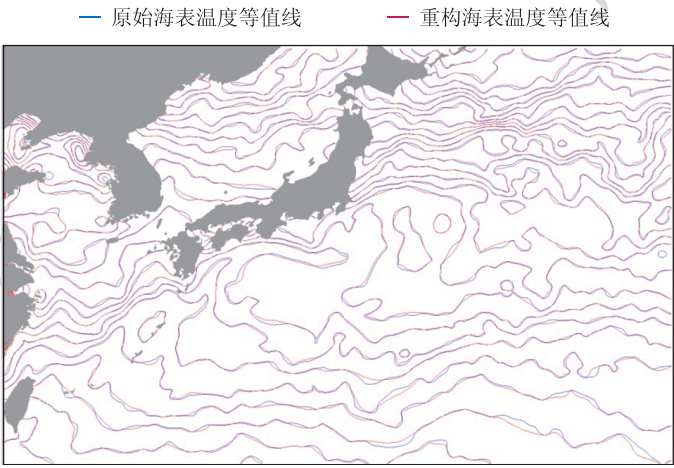


图8 原始海表温度等值线与回放等值线的叠加与比较

Fig. 8 The overlay and comparison between original SST contours and reconstructed ones

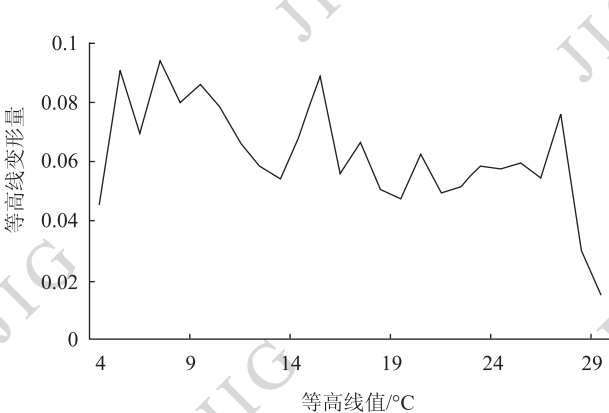


图9 不同高程值等高线的变形量

Fig. 9 Contour distortions of different elevation value

则提取出的全部边界点所占存储空间 $S_r = [\text{sizeof}(\text{short}) \times 2 + \text{sizeof}(\text{float}) \times 3] \times K = 16 \times K$ 。两者的数据压缩比 $R = S_o : S_r = (M \times N) : (4 \times K)$ 。代入本例的矩阵行列数和边界点个数,可得原始数据所占存储空间 563 KB,采样点所占存储空间为

266 KB,数据压缩比为 2.12:1。

4 结 论

重构技术是逆向工程技术中的关键技术之一。通过对海表温度场的特征纹理结构与残差图像采样的方法获得边界条件,再使用 Laplace 方程的九点有限差分形式迭代计算,重构海表温度场。从重构得到的温度场等高线看,与原图中的温度分布结构较一致,海流、涡旋以及温峰都与原图较为符合,保留了原图遥感温度场的细节部分,通过与原图的较差比较,也说明两者差别较小。

在压缩效果与重构速度上,本文方法也存在其他的一些局限与不足。比如该方法适用范围只限于平缓变化的图像,而对于含有大量噪声或纹理过于复杂的图像来说,会得到过多的温度脊线和谷线,从而使记录边界条件的数据文件过大。由于参与差分运算

的节点较多,本文迭代方法速度较慢,所以今后需要采用收敛速度较快的迭代法(如逐次超松弛迭代法(SOR))^[21]和运用并行计算技术来缩短计算时间。

参考文献 (References)

- [1] Guo D F. Computer Processing and Pattern Recognition of Remote Sensing Image[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 1987. [郭德方. 遥感图像的计算机处理和模式识别[M]. 北京: 电子工业出版社, 1987.]
- [2] Huang J W, Shi Y Q, Dai X H. A segmentation-based Image-coding algorithm using the features of human vision system [J]. Journal of Image and Graphics, 1999, 4(5): 400-404. [黄继武, Shi Y Q, 戴宪华. 基于视觉特性的图像分割编码算法[J]. 中国图象图形学报, 1999, 4(5): 400-404.]
- [3] Li B, Jiao R H, Li Y C. Fast adaptive wavelet for remote sensing image compression[J]. Journal of Computer Science and Technology, 2007, 22(5): 770-778.
- [4] Li B, Yang R, Jiang H. Remote-sensing image compression using two-dimensional oriented wavelet transform[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2011, 49(1): 236-250.
- [5] Zhou X K, Jiang H X, Cheng Z J. Remote sensing image compression based on space domain resampling[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2001, 27(5): 611-614. [周孝宽, 姜宏旭, 程子敬. 基于空间重采样的遥感图像压缩[J]. 北京航空航天大学学报, 2001, 27(5): 611-614.]
- [6] Wang H M. On nurbs surface reconstruction in CAD modeling for reverse engineering[J]. Computer Applications and Software, 2009, 26(10): 81-83, 238. [王慧敏. 反向工程中NURBS曲面CAD重构技术研究[J]. 计算机应用与软件, 2009, 26(10): 81-83, 238.]
- [7] Zhu X X. Free Curves and Surfaces Modeling Technology[M]. Beijing: Science Press, 2000. [朱心雄. 自由曲线曲面造型技术[M]. 北京: 科学出版社, 2000.]
- [8] Shi F Z. CAGD & NURBS[M]. Beijing: Higher Education Press, 2001. [施法中. 计算机辅助几何设计与非均匀有理B样条[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001.]
- [9] Zhang X M, Shang S P, Zhang C Y, et al. Potential influence of sea surface temperature on the interannual fluctuation of the catch and the distribution of chub mackerel and round scad in the minnan-taiwan bank fishing ground, China[J]. Marine Science Bulletin, 2005, 24(4): 92-96. [张学敏, 商少平, 张彩云, 等. 闽南—台湾浅滩渔场海表温度对鲈鲷鱼类群聚资源年际变动的影响初探[J]. 海洋通报, 2005, 24(4): 92-96.]
- [10] Herron R C, Leming T D, Li J L. Satellite-detected fronts and butterfly aggregations in the northeastern gulf of mexico [J]. Continental Shelf Research, 1989, 9(6): 569-588.
- [11] Liu Z H, Huang P Z. Derivation of skeleton line from topographic map with DEM data [J]. Science of Surveying and Mapping, 2003, 28(4): 33-36. [刘泽慧, 黄培之. DEM数据辅助的山脊线和山谷线提取方法的研究[J]. 测绘科学, 2003, 28(4): 33-36.]
- [12] Pi Q L, Hu J Y. Analysis of sea surface temperature fronts in the taiwan strait and its adjacent area using an advanced edge detection method[J]. Science China Earth Science, 2010, 53(7): 1008-1016.
- [13] Reynolds W R. A real-time global sea surface temperature analysis[J]. Journal of Climate, 1988, 1: 75-86.
- [14] Leon L, George F P. Numerical Solution of Partial Differential Equations in Science and Engineering [M]. New York: Wiley-Interscience, 2011.
- [15] Kartushinsky A V. Time-space structure and variability of surface temperature frontal zones in the ocean (based on AVHRR satellite data)[J]. Advances in Space Research, 2000, 25(5): 1107-1110.
- [16] Shen X Q, Fan W, Cui X S. Study on the bartrami relationship of fishing ground distribution of ommastrephes and water temperature in the northwest pacific ocean[J]. Marine Fisheries Research, 2004, 25(3): 10-14. [沈新强, 樊伟, 崔雪森. 西北太平洋柔鱼渔场分布与水温关系的研究[J]. 海洋水产研究, 2004, 25(3): 10-14.]
- [17] Sun F Q, Zhang C Y, Shang S P, et al. Primary validation of AVHRR/MODIS/ TMI SST for part of the northwest pacific[J]. Journal of Xiamen University: Natural Science, 2007, 46(1): 1-5. [孙凤琴, 张彩云, 商少平, 等. 西北太平洋部分海域AVHRR/TMI与MODIS遥感海表层温度的初步验证. 厦门大学学报: 自然科学版, 2007, 46(1): 1-5.]
- [18] Marcello J, Eugenio F, Hern ández A. Validation of MODIS and AVHRR/3 sea surface temperature retrieval algorithms[C]//Geo science and Remote Sensing Symposium. 2004, 2: 839-842.
- [19] Hu P, Wu Y L, Hu H. Research on fundamental theory of assessing the accuracy of DEMs[J]. Geo-Information Science, 2003, 6(3): 64-70. [胡鹏, 吴艳兰, 胡海. 数字高程模型精度评定的基本理论[J]. 地球信息科学, 2003, 6(3): 64-70.]
- [20] Fan Q S, Tang C L, Hu P. A quantitive approach for accuracy assessment of DEMs by comparing derived contour maps with original ones[J]. Science of Surveying and Mapping, 2008, 33(3): 118-120. [范青松, 汤翠莲, 胡鹏. DEM精度检查中等高线回放的量化方法[J]. 测绘科学, 2008, 33(3): 118-120.]
- [21] Li R H, Feng G C. Numerical Solution of Differential Equations [M]. Beijing: Higher Education Press, 1996. [李荣华, 冯果忱. 微分方程数值解法[M]. 北京: 高等教育出版社, 1996.]