

Journal of Image
and Graphics

中国图象图形学报



ISSN1006-8961
CN11-3758/TB

2012 8
Vol.17 No.

中国科学院遥感应用研究所
中国图象图形学学会主办
北京应用物理与计算数学研究所

中国图象图形学报

Zhongguo Tuxiang Tuxing Xuebao

2012年8月 第17卷 第8期(总第196期)

目次

综述

可计算图像美学研究进展 王伟凝, 蚁静斌, 贺前华(893)

图像处理和编码

利用混沌 PSO 或分解的 2 维 Tsallis 灰度熵阈值分割 吴一全, 吴诗嫻, 张晓杰(902)

H. 264 并行编码中负载平衡方法 侯兴松, 刘大齐, 盛凯, 赖玉洁(911)

提升细节捕捉能力的非下采样轮廓波变换 郭洪, 李雪军(919)

SVD 域的图像高斯噪声强度估计 柳薇(923)

图像扩散去噪模型的分析与改进 傅绪加, 刘峰, 王信松(934)

小波域最小嵌入失真函数设计及其在隐写中的应用 李军, 潘峰, 杨晓元, 刘镇(946)

图像分析和识别

抗压缩的照片图像与真实感计算机图形识别 张荣, 王让定(953)

云的自适应阈值检测方法 黄茜, 王少龙, 徐道磊, 廖婷婷(960)

煤矸区分中的间隔灰度压缩扩阶共生矩阵 于国防(966)

离群样本划分的半监督模糊学习策略 宋晓宁, 杨静宇, 杨习贝(971)

多相 Chan-Vese 模型的直接对偶方法 刘存良, 潘振宽, 郑永果, 王国栋, 丁洁玉(979)

利用梯度信息快速提取直线边缘特征 夏军营, 徐小泉, 熊九龙(987)

2 维双树复小波不确定度加权融合的人脸识别 王仕民,叶继华,邓涛,王明文(995)

图像理解和计算机视觉

流形学习与非线性回归结合的头部姿态估计 范进富,陈锻生(1002)

计算机图形学

角点距离矩阵和同心圆划分的曲线描述与匹配 曾接贤,刘秀朋,符祥(1011)

弹性二次曲面模型下的 3 维形状表现与平滑 郝世杰,蒋建国,郭艳蓉,詹曙(1021)

医学图像处理

主动学习的白细胞图像自动分割 崔凤,潘晨,吴向平,徐军(1029)

遥感图像处理

Bregman 交替迭代遥感图像复原方法 徐焕宇,孙权森,罗楠,夏德深(1035)

基于各向异性 Markov 随机场的遥感影像亚像元尺度建筑物提取 李晓冬,凌峰,杜耘(1042)

中国图象图形学报

刊名题字: 宋 健

月刊(1996 年创刊)

第 17 卷 第 8 期

2012 年 8 月 16 日出版

主管单位 中国科学院
主 办 中国科学院遥感应用研究所
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
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
印刷装订 北京北林印刷厂
广告经营许可证 京朝工商广字第 0346 号
总 发 行 北京报刊发行局
订 购 全国各地邮局
国外发行 中国国际图书贸易总公司
(中国国际书店)
(北京 399 信箱 邮编 100044)

Superintended by Chinese Academy of Sciences
Sponsored by Institute of Remote Sensing Application,
CAS China Society of Image and Graphics
Institute of Applied Physics and Computational
Mathematics
Chief editor LI Xiaowen
Editor, Publisher Editorial and Publishing Board
of Journal of Image and Graphics
(P. O. Box 9718, Beijing 100101, China)
E-mail:jig@irsa.ac.cn
Distributed by Beijing Bureau for Distribution of Newspapers
and Journals
Domestic All Local Post Offices in China
Foreign China International Book Trading Corporation
(P. O. Box 399, Beijing 100044, China)
Printed by Beijing Beilin Printing House

ISSN 1006-8961 CN11-3758/TB CODE ZTTFXZ 国内邮发代号: 82-831 国外发行代号: M1406 国内定价: 45.00 元

Journal of Image and Graphics

(Monthly, Started in 1996)

Vol. 17 No. 8 August 2012

Contents

Review

Review for computational image aesthetics Wang Weining, Yi Jingjian, He Qianhua (893)

Image Processing and Coding

Two-dimensional Tsallis gray entropy image thresholding using chaotic particle swarm optimization or decomposition
..... Wu Yiquan, Wu Shihua, Zhang Xiaojie (902)

Load balancing for H. 264 parallel encoding Hou Xingsong, Liu Daqi, Sheng Kai, Dun Yujie (911)

Non-subsampled contourlet transform algorithm to promote detail information capturing ability Guo Hong, Li Xuejun (919)

Gaussian noise level estimation in SVD domain for images Liu Wei (923)

Analysis and improvement of image diffusion denoising models Fu Xujia, Liu Feng, Wang Xinsong (934)

Design of minimizing embedding impact function in DWT domain and its applications in steganography
..... Li Jun, Pan Feng, Yang Xiaoyuan, Liu Zhen (946)

Image Analysis and Recognition

Anti-compression approach to distinguishing photographic images and photorealistic computer graphics
..... Zhang Rong, Wang Rangeding (953)

Adaptive threshold approach for night-sky cloud inspection Huang Qian, Wang Shaolong, Xu Daolei, Liao Tingting (960)

Expanded order co-occurrence matrix to differentiate between coal and gangue based on interval grayscale compression
..... Yu Guofang (966)

Semi-supervised fuzzy learning strategy by using a way of partitioning the outlier instances
..... Song Xiaoning, Yang Jingyu, Yang Xibei (971)

Direct dual method of Chan-Vese model for multiphase segmentation
..... Liu Cunliang, Pan Zhenkuan, Zheng Yongguo, Wang Guodong, Ding Jieyu (979)

Fast line edge feature extraction using image gradients Xia Junying, Xu Xiaoquan, Xiong Jiulong (987)

Two-dimensional dual-tree complex wavelet transform uncertainty weighted fusion in face recognition
..... Wang Shimin, Ye Jihua, Deng Tao, Wang Mingwen (995)

Image Understanding and Computer Vision

Combining manifold learning and nonlinear regression for head pose estimation Fan Jinfu, Chen Duansheng (1002)

Computer Graphics

Representation and matching for planar curve based on corner distance matrix and concentric circles
..... Zeng Jiexian, Liu Xiupeng, Fu Xiang (1011)

Three-dimensional shape representation and smoothing with elastic quadratic patch model
..... Hao Shijie, Jiang Jianguo, Guo Yanrong, Zhan Shu (1021)

Medical Image Processing

White blood cell image segmentation based on active learning Cui Feng, Pan Chen, Wu Xiangping, Xu Jun (1029)

Remote Sensing Image Processing

Bregman alternating iterative method for remote sensing image restoration Xu Huanyu, Sun Quansen, Luo Nan, Xia Deshen (1035)

Building extraction at the sub-pixel scale from remotely sensed images based on anisotropic Markov random field
..... Li Xiaodong, Ling Feng, Du Yun (1042)

中图法分类号: TP391 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2012)08-1021-08

论文引用格式: 郝世杰, 蒋建国, 郭艳蓉, 詹曙. 弹性二次曲面模型下的3维形状表现与平滑[J]. 中国图象图形学报, 2012, 17(8): 1021-1028.

弹性二次曲面模型下的3维形状表现与平滑

郝世杰¹, 蒋建国^{1,2}, 郭艳蓉¹, 詹曙^{1,2}

1. 合肥工业大学计算机与信息学院, 合肥 230009; 2. 安全关键工业测控技术教育部工程研究中心, 合肥 230009

摘要: 本文研究了能够保持几何特征并且对噪声鲁棒的形状表示方法。根据弹性二次曲线(Elastic Quadratic Wire, EQW)的基本思想,对模型加以推广,提出用于曲面表示的弹性二次曲面(Elastic Quadratic Patch, EQP)模型。通过对曲面上每一点构造在参数平面上彼此重叠的二次曲面片,进而建立相邻曲面片之间0阶与1阶不连续势能函数。由于此势能函数是关于该曲面点的二次型,因而容易求得使其最小的二次曲面参数向量。对整个曲面的逐点迭代,进而获得稳定且保持显著几何特征的形状EQP表示。实验部分以3维人脸成像数据为例,验证了本文模型在平滑与细节保持等方面的性能。在不同噪声水平下,分析了参数变化对EQP模型性能影响。与常见样条与小波方法结果进行定量和定性比较,分析了不同噪声水平下(方差 $N=1, 5, 10$)整体与局部区域中各方法优劣。在噪声水平较高时,在信噪比和直观效果等定量与定性方面上,EQP模型与对比方法相比具备一定优势。

关键词: 形状表现;弹性二次曲面;几何特征;形状平滑;特征保持

Three-dimensional shape representation and smoothing with elastic quadratic patch model

Hao Shijie¹, Jiang Jianguo^{1,2}, Guo Yanrong¹, Zhan Shu^{1,2}

1. School of Computer and Information, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

2. Engineering Research Center of Safety Critical Industrial Measurement and Control Technology, Ministry of Education, Hefei 230009, China

Abstract: It is important for shape processing and analysis to have a noise-robust and detail-preserving shape representation. In this paper, we propose an Elastic Quadratic Patch (EQP) model, which is extended from the basic idea of Elastic Quadratic Wire (EQW), for robustly representing three-dimensional shapes. In the model, energy function quantifying 0th and 1st discontinuity is constructed based on overlapping quadratic patches for each point and its neighborhood on the surface. This function is in quadratic form and can be easily minimized through a specific vector of quadratic surface parameters. The EQP representation, which is stable and geometry preserving, can be then obtained through a point-wise iteration. In experiments, we mainly take facial depth image as experimental data to evaluate EQP's performance on smoothing and detail preserving. Model parameters are first analyzed under different noise levels ($N=1, 5, 10$). Global and local comparisons with splines and wavelets are then presented, which demonstrate, under relatively large noise, the superiority of EQP both on quantitative SNR and qualitative visual effects.

Key words: shape representation; elastic quadratic patch; geometric feature; shape smoothing; feature preserving

收稿日期:2011-09-05;修回日期:2012-02-28

基金项目:国家自然科学基金项目(61004103);安徽省自然科学基金项目(11040606Q44);安徽省高校自然科学研究重点项目(KJ2010A193)

第一作者简介:郝世杰(1983—),男,合肥工业大学信号与信息处理专业博士研究生,主要研究方向为图像分析与处理,模式识别。

E-mail:hfut_hsj@gmail.com

0 引言

不同粒度下客观世界物体的几何表象常借助于形状加以表示。在成像技术与计算机技术的推动下,形状分析逐渐成为探索物体本质特征的一种重要手段,在图像理解、医学影像、生物特征识别和多媒体检索等众多领域中有着深入的应用。

形状蕴含了极为重要的视觉信息,精确、鲁棒的形状表现对于其后续的处理与分析具有重要的意义^[1]。数字图像中,2维形状轮廓四邻域或八邻域的逐点存储^[2]是最为常见的形状表示与存储的方式。但其容易混入成像、目标提取等因素带来的噪声,且过多的轮廓点可能给后续分析带来过大的计算开销。近年来,各种形状表示方法与技术被提出,来降低计算的开销和克服噪声的影响。Cootes等人^[3]在Kendall^[4]形状流形理论中的平均形状和切空间概率模型基础上提出了直观意义更为明确的主动形状模型(ASMs)并被广泛应用至目标提取与识别中,其形状是由较为稀疏的有序地标点集(landmarks)表示,本质上是由多边形来近似表示形状。Younes^[5]和Srivastava^[6]等人不再将形状用欧氏空间里的离散点集表示,而是转向将单个形状视为非欧的微分流形上的一点,以Lie群作用和流形切空间分析等数学工具对形状变化加以描述,为确保其流形的连续性,单个形状需满足一定的光滑条件。样条是具有优良性质的数学工具,能有效去除噪声并保持形状的平滑,被广泛用于形状表示^[7]、拟合^[8]与图像目标提取^[9-10]等场合。其中弹性二次样条(EQW)^[7]是近期提出的一种2维形状样条表示方法,其本质上是一种彼此重叠的二次样条来表示形状,通过迭代降低形状的 C^1 不连续程度,在去除噪声的同时尽量保持形状上的显著特征。

基于EQW的形状表示具有较好的去噪、保持特征性质,但其仅限于2维形状轮廓的表示。本文根据EQW模型的基本思想对其加以推广,提出用于表示3维形状的弹性2次曲面(EQP)模型,并以3维人脸成像数据为对象,验证EQP在曲面细节保

持、数据平滑等方面的有效性。

1 弹性二次曲线模型(EQW)

对于离散化形状轮廓上每一个点,其EQW表示为:

$$p_i(t_i) = \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \bar{x}_i \\ \bar{y}_i \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} A_i & B_i \\ C_i & D_i \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t_i^2 \\ t_i \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中, (\bar{x}_i, \bar{y}_i) 是未经处理的形状轮廓上第 i 点的坐标, (A_i, B_i, C_i, D_i) 是二次曲线参数, t_i 的取值范围设为 $-\tau \leq t_i \leq \tau$, 其中 τ 在本文中定义为样条重叠程度因子, 即当前点 p_i 所控制的曲线段分别与其邻居点 p_{i-1} 和 p_{i+1} 控制的曲线段在参数上是重叠的, 其重叠度由 τ 控制。对于形状每一点, 都可以用向量 $f_i^x = [\bar{x}_i, A_i, B_i]^T$ 和 $f_i^y = [\bar{y}_i, C_i, D_i]^T$ 表示; 对于一个 N 点表示的形状, 可以表示为 $S = (S^x | S^y)$, 其中 $S^x = (f_1^x | f_N^x | \dots | f_N^x)$, $S^y = (f_1^y | f_N^y | \dots | f_N^y)$; 根据以上定义, 易得形状上每一点的切向量

$$v_i(t_i) = \frac{dp_i(t_i)}{dt} = \begin{pmatrix} 2A_i t_i + B_i \\ 2C_i t_i + D_i \end{pmatrix} \quad (2)$$

根据式(1)(2), 可以计算当前点与邻居点控制样条段之间0阶与1阶不连续性势能的加权和(权值为 λ , 通常取1), 通过对其的最小化来消除噪声的干扰, 达到理想的形状表现。

2 弹性二次曲面模型

这里我们将表示平面形状的EQW模型拓展为表示3维形状的EQP模型。设曲面 S 的参数平面为 $span(s, t)$, 对于某一点 (s, t) 定义二次曲面片(Quadratic Patch)为

$$Z = z + as^2 + bs + ct^2 + dt + est \quad (3)$$

式中, $s, t \in [-\tau, \tau]$, 该曲面片可由向量 $f = [z, a, b, c, d, e]^T$ 表示。此曲面片关于 s 与 t 的一阶微分为

$$\begin{aligned} \frac{\partial Z}{\partial s} &= 2as + b + et \\ \frac{\partial Z}{\partial t} &= 2ct + d + es \end{aligned} \quad (4)$$

对于嵌入3维空间的形状流形, 其参数平面是

2 维,这就需要在构造 EQP 模型时考虑邻域的选择。本文选择四邻域系统,中心点记作 c ,其四邻域按相对于中心点东西南北的方位分别记为 e 、 w 、 n 、 s 。以参数平面上一点 C_i 为中心的曲面片,考察其在 C_i 、 E_i 、 W_i 、 N_i 、 S_i 处取值(灰色点)。该邻域系统中各重叠曲面片对应其参数平面的重叠情况如图 1 所示。

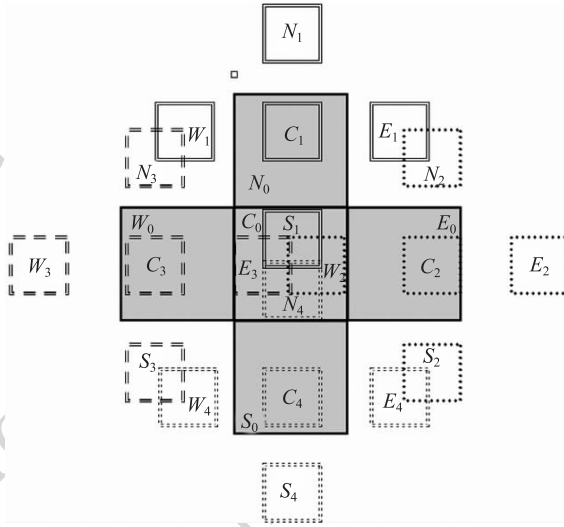


图 1 构造 EQP 时的参数平面

Fig. 1 Parameter plane for constructing EQP

在此约定 C^n 不连续势能为 0 阶至 n 阶不连续势能之和。下面考察 EQP 表示下的邻域系统 C^1 不连续势能。以图 1 中用灰色表示的邻域系统为例,其 C^1 不连续势能由该邻域系统中 5 个点的 C^1 不连续势能之和构成,即

$$E = E^0 + \lambda E^1 = E_c + E_e + E_w + E_n + E_s \quad (5)$$

式中, λ 为 0 阶不连续势能与 1 阶不连续势能之间的权重因子。对于式(5)中的各子项进一步展开,有

$$E_c = E(C_0, S_1) + E(C_0, W_2) + E(C_0, E_3) + E(C_0, N_4) \quad (6)$$

$$E_e = E(E_0, C_2) \quad (7)$$

$$E_w = E(W_0, C_3) \quad (8)$$

$$E_n = E(N_0, C_1) \quad (9)$$

$$E_s = E(S_0, C_4) \quad (10)$$

以计算 $E(C_0, S_1)$ 为例,可将其展开为

$$E(C_0, S_1) = E^0(C_0, S_1) + \lambda E^1(C_0, S_1) \quad (11)$$

$$E^0(C_0, S_1) = E_p^0(0, 0, 0, \tau) + E_p^0(0, -\tau, 0, 0) \quad (12)$$

$$E^1(C_0, S_1) = E_p^1(0, 0, 0, \tau) + E_p^1(0, -\tau, 0, 0) \quad (13)$$

结合式(3)(4)的二次曲面表达式,有

$$E_p^0(s_1, t_1, s_2, t_2) = \|Z_1(s_1, t_1) - Z_2(s_2, t_2)\|^2 \quad (14)$$

$$E_p^1(s_1, t_1, s_2, t_2) = \left\| \frac{\partial Z_1(s_1, t_1)}{\partial s_1} - \frac{\partial Z_2(s_2, t_2)}{\partial s_2} \right\|^2 + \left\| \frac{\partial Z_1(s_1, t_1)}{\partial t_1} - \frac{\partial Z_2(s_2, t_2)}{\partial t_2} \right\|^2 \quad (15)$$

式(6)一(10)中其余项可类似推导。

根据上述各式,经过整理可得

$$E = f_c^T c G f_c + 2f_c^T e G f_e + 2f_c^T w G f_w + 2f_c^T n G f_n + 2f_c^T s G f_s + f_e^T e G f_e + f_w^T w G f_w + f_n^T n G f_n + f_s^T s G f_s \quad (16)$$

式(16)中各系数矩阵为

$$G_c = \begin{pmatrix} 16 & 4\tau^2 & 0 & 4\tau^2 & 0 & 0 \\ 4\tau^2 & 4\tau^2 + 16\lambda\tau & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 4\tau^2 + 16\lambda & 0 & 0 & 0 \\ 4\tau^2 & 0 & 0 & 4\tau^4 + 16\lambda\tau & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 4\tau^2 + 16\lambda & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 8\lambda\tau \end{pmatrix} \quad (17)$$

$$G_w = \begin{pmatrix} -4 & -2\tau^2 & -2\tau & 0 & 0 & 0 \\ -2\tau^2 & 0 & 4\lambda\tau & 0 & 0 & 0 \\ 2\tau & -4\lambda\tau & -4\lambda & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -4\lambda & -2\lambda\tau \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2\lambda\tau & 0 \end{pmatrix} \quad (18)$$

$$G_n = \begin{pmatrix} -4 & 0 & 0 & -2\tau^2 & -2\tau & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -4\lambda & 0 & 0 & -2\lambda\tau \\ -2\tau^2 & 0 & 0 & 0 & 4\lambda\tau & 0 \\ 2\tau & 0 & 0 & -4\lambda\tau & -4\lambda & 0 \\ 0 & 0 & 2\lambda\tau & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (19)$$

$$G_e = \begin{pmatrix} -4 & -2\tau^2 & 2\tau & 0 & 0 & 0 \\ -2\tau^2 & 0 & -4\lambda\tau & 0 & 0 & 0 \\ -2\tau & 4\lambda\tau & -4\lambda & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -4\lambda & 2\lambda\tau \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -2\lambda\tau & 0 \end{pmatrix} \quad (20)$$

$$G_s = \begin{pmatrix} -4 & 0 & 0 & -2\tau^2 & 2\tau & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -4\lambda & 0 & 0 & 2\lambda\tau \\ -2\tau^2 & 0 & 0 & 0 & -4\lambda\tau & 0 \\ -2\tau & 0 & 0 & 4\lambda\tau & -4\lambda & 0 \\ 0 & 0 & -2\lambda\tau & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (21)$$

由图 1 中灰色表示邻域的 C^1 不连续势能(式(16))易见, E 是关于 f_c 的二次型, 且当 τ 和 λ 均大于零时, G_e 为正定矩阵。对于曲面上一点 i , 当 f_{ci} 取式(22)时, E_i 具有全局唯一的极小值, 即取 \hat{f}_{ci} 会使得 i 点与其四邻域所构成的 C^1 不连续势能最小。

$$\hat{f}_{ci} = -G_c^{-1} \cdot (G_n \cdot f_{ni} + G_s \cdot f_{si} + G_e \cdot f_{ei} + G_w \cdot f_{wi}) \quad (22)$$

基于曲面的 EQP 表示及其 C^1 不连续势能具有的性质, 可对有噪曲面进行平滑。对于所有二次曲面片参数的初始化, 可设 $f = [z_0, 0, 0, 0, 0, 0]^T$ (也可设后 5 个系数为任意值, 本文中全部设为 0), 其中 z_0 为原曲面上的坐标值。对于不能构成四邻域系统的边界点, 其缺失的邻域点 f 可简单用前边界点 f 代替。然后即可利用式(22)进行逐点平滑, 对整个曲面的一次作用称为一个 epoch, 记为 n_e 。

图 2 是 x - y 平面 3×3 均匀参数栅格上 9 个 3 维随机点的 EQP 平滑拟合过程(图中坐标间隔为“单位 1”), 图中不同颜色的曲面片即是以各

点为中心的二次曲面片, 图 2(a) 为初始状态。由图 2(b)~(f) 可以看到, 通过不断地迭代, 各二次曲面片在 3 维空间中逐渐彼此重叠且整体呈现为光滑曲面。本质上看, 这一迭代过程实际是通过调整各二次曲面片的参数使彼此重叠的样条间 0 阶和 1 阶不连续能量不断下降的一个过程。

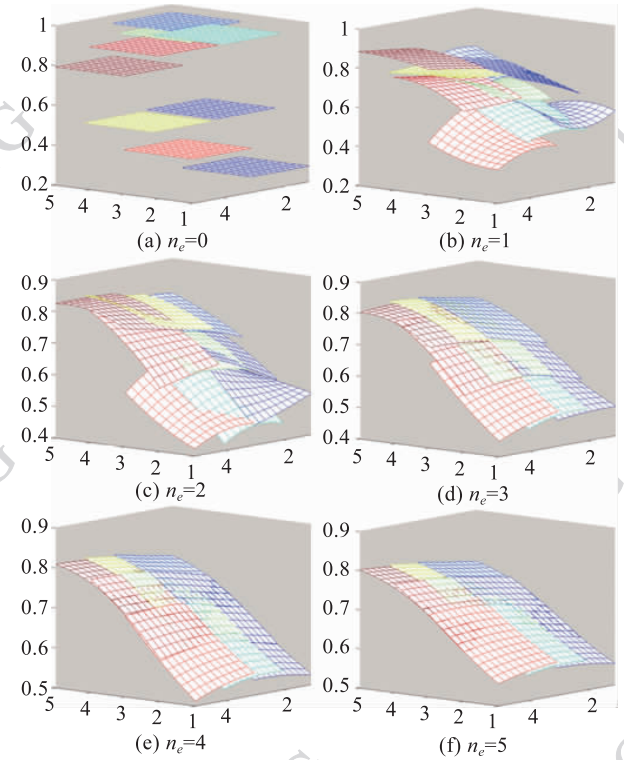


图 2 EQP 对 3 维空间中 3×3 随机点的拟合表示
Fig. 2 EQP representation by fitting three-dimensional points of 3×3 size

3 实验结果与分析

实验中, 首先分析 EQP 算法参数 τ 、 λ 以及迭代次数 n_e 对算法性能的影响。进而以 3 维人脸深度等数据为实验对象, 并与常见样条、小波等方法对比, 考察 EQP 模型对整体以及局部人脸区域平滑去噪的有效性。本文及对比方法均在 Matlab 环境中实现, 测试硬件环境为 2 G 主频 CPU, 2 G 内存的台式电脑。

3.1 参数对算法性能的影响

由第 2 节算法模型可知, 算法共有重叠因子 τ , 权重参数 λ 以及迭代次数 n_e 3 个参数。由于 EQP 定义在 2 维离散参数平面上, 重叠程度取 1 个栅格即 $\tau = 1$ (图 1)。下面以相关型传感器 (CIS)^[10] 生

成的 3 维人脸数据^[11]为实验对象(图 3),研究 λ 与 n_e 对算法性能的影响。

由 CIS 生成的 3 维人脸数据是以某参考平面为参数空间、人脸曲面相对于参考平面的距离为深度数据的曲面,非常适合于本文 EQP 算法。数据维数为 64×64 。为数据添加均值为 0,方差为 N 的高斯噪声。以信号噪声比(SNR)为考察平滑效果的量化指标(式(23)), z 是原深度, \hat{z} 是平滑后的值)。为考察算法对人脸局部关键部位形状的表现与平滑去噪能力,特别选取了眼部、鼻、嘴 3 种区域(图 3(a)),专门考察矩形框区域内的 SNR 值。

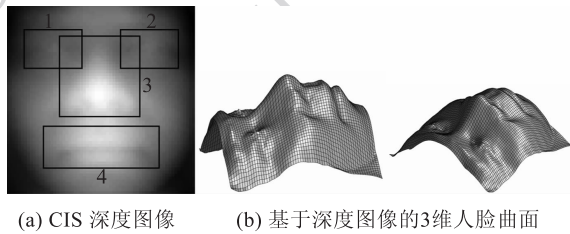


图 3 基于 CIS 深度成像生成的人脸曲面
Fig. 3 Facial surface produced by CIS

$$SNR = 20 \lg \left(\frac{\sum_i \sum_j (z(i,j))^2}{\sum_i \sum_j (z(i,j) - \hat{z}(i,j))^2} \right) \quad (23)$$

选取 $N = 1, 5, 10$ 作为低、中、高 3 种叠加噪声(处理数据值域为 $[0, 255]$)。图 4(a) 显示的是 $n_e = 5$ 时,在不同噪声程度下 λ 由 0.1 增加到 5 时整

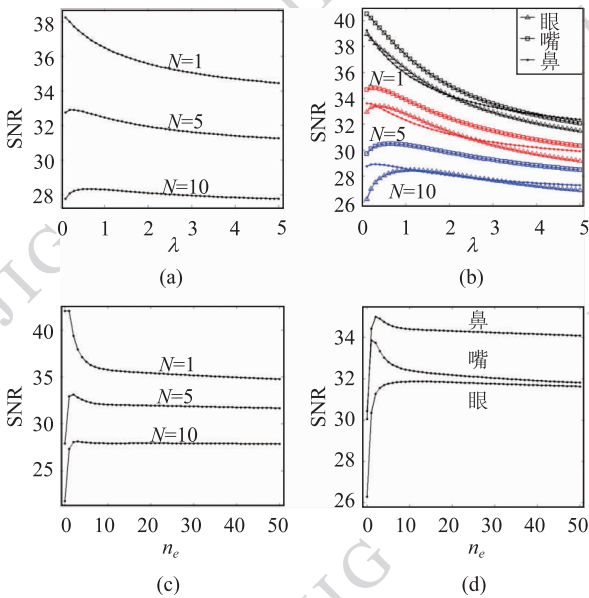


图 4 不同 λ 与 n_e 下算法整体与局部区域信噪比
Fig. 4 Global and local SNR under different λ and n_e

个算法结果的信噪比。可以看到随着 λ 增加,信噪比呈下降趋势。其原因为 λ 增大意味着在迭代过程中趋向降低更多的一阶不连续势能,原信号中的一些细节信息被平滑,因而造成了信噪比下降。图 4(b)3 种颜色分别代表了在不同噪声程度下眼、鼻、嘴 3 个局部区域的信噪比变化。它们的变化趋势基本与整体区域变化趋势一致,其中鼻部在各噪声强度下的信噪比基本高于其他两局部区域,这与算法平滑的直观效果是一致的(图 5 第 2 列)。从 λ 的选择来看,当估计曲面噪声很小时(如 $N = 1$),可选择很小的值;当估计噪声较大时(如 $N = 5, 10$),可选择稍大的值。但这只是大致的策略,实际应用中可根据对噪声程度的估计而选择位于适当范围内的参数。

图 4(c) 显示分别是 $\lambda = 1$ 时,在不同噪声程度下迭代次数由 0 增加至 50 时的整体曲面信噪比变化。图 4(d) 是 $N = 5$ 时各局部区域随着迭代次数增加的信噪比变化,其趋势与整体曲面在 $N = 5$ 时基本一致,并且鼻部信噪比,明显高于其他两局部区域。算法大致在 $n_e = 5$ 至 10 时就趋于收敛。注意到图 4(c) 中 $N = 1$ 时信噪比呈现下降趋势,这是由于此时噪声很小,并且以 EQP 的曲面表示一定程度上还是改变了原数据的局部结构,后者带来的信噪比下降幅度超过了去噪带来的信噪比提升,因而造成了信噪比先向下跳变进而区域稳定收敛的变化。

3.2 算法去噪性能比较

分别应用 EQP、薄板样条(TPS)和三次 B 样条(CBS)这 3 种样条以及小波方法(Wavelets)对有噪声人脸曲面进行平滑处理。噪声方差 N 为 1, 2, ..., 10, EQP 参数统一设定为 $\tau = 1, \lambda = 1, n_e = 5$ 。

图 5 和图 6 分别是在各级噪声强度下各平滑方法结果的定性定量的比较。图 5 的第一列分别是被方差为 2、4、6、8 的高斯噪声污染的人脸曲面;第二列到第五列分别是 EQP、三次 B 样条、小波、薄板样条的平滑效果。从这些直观效果可以看到,随着噪声强度的提高,除薄板样条平滑结果外的各方法平滑效果在下降,但薄板样条平滑结果损失了非常多的细节特征。EQP 方法在噪声较低时,基本能在去除噪声的同时保持大多数人脸曲面特征(如与三次 B 样条相比, EQP 对嘴部分的细节保持更好);而当噪声很强时, EQP 结果中的面颊处的噪声干扰并没完全得到消除。

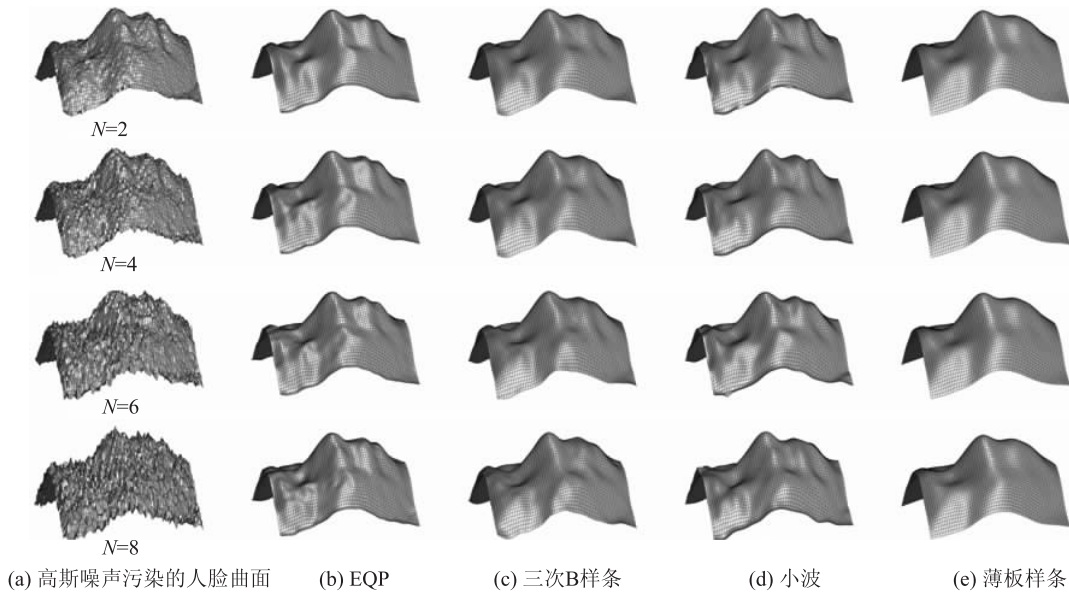


图 5 各噪声强度下的平滑算法直观比较

Fig. 5 Visual comparison of different smoothing methods under various noise intensities

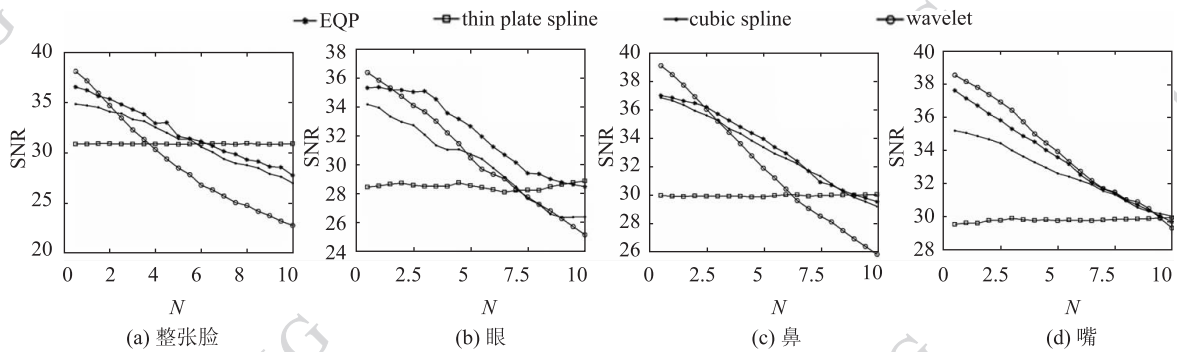


图 6 整体与局部人脸曲面平滑量化效果比较

Fig. 6 Global and local quantitative comparison of facial surface smoothing

图 6(a) 是 4 种方法平滑人脸曲面整体效果的量化比较。可以看到, 薄板样条方法几乎对噪声不敏感, 但它在噪声较小时的信噪比(SNR)比其他 3 种方法要低很多。小波方法在噪声强度较低时具有最高的信噪比, 但随着噪声强度的提高信噪比下降更陡。三次 B 样条方法与 EQP 方法在噪声强度提高过程中的信噪比走势类似, 但 EQP 的信噪比大体上稍高于三次 B 样条。总地来看, 本文 EQP 方法在参数曲面的去噪平滑方面是与几种常见样条或小波方法可比拟的。图 6(b) — (d) 是局部区域平滑结果的量化比较。它们大体与整体曲面 SNR 变化趋势相似。不同之处在于, 各局部区域中 TPS 信噪比均低于整体曲面, 这说明它在面颊区域的信噪比更高; EQP 对于中等和较高噪声下的眼鼻嘴部平滑效果更好。

表 1 是应用文献[12]中全部 56 例人脸数据, 在 3 种典型噪声水平下应用 4 种方法的整体信噪比均值及方差。除了在 $N = 10$ 时三次 B 样条 SNR 均值略高于 EQP 之外, 各方法 SNR 均值基本符合图 6(a) 中所示趋势; 除 TPS 外 SNR 方差随着噪声水平增高而变大。

表 1 各方法应用于 56 例人脸曲面的 SNR 均值与方差
Table 1 Mean and variance of SNR of 56 facial surface with 4 methods

	/dB			
	EQP	TPS	cubic-spline	wavelet
$N = 1$	37.0 ± 0.25	32.5 ± 0.32	35.3 ± 0.56	38.5 ± 0.44
$N = 5$	32.3 ± 0.56	32.3 ± 0.47	31.9 ± 0.55	29.3 ± 0.67
$N = 10$	27.7 ± 0.88	32.3 ± 0.41	27.9 ± 0.73	22.8 ± 1.12

在时间开销方面,当 τ 与 λ 为定值时,且 G_c^{-1} 、 G_e 、 G_w 、 G_n 和 G_s 也为常数矩阵,可事先计算,因此 EQP 处理曲面的复杂度为 CN_p ,其中 C 为常数, N_p 为数据点数。在本工作的软硬件环境下,每个 n_p 中对曲面上单点的处理时间平均约为 $15 \mu\text{s}$,当迭代次数为 5 时处理一例实验人脸数据平均需 0.34 s 。使用 matlab 自带的 TPS 与三次 B 样条函数对每幅数据平均处理时间为 134.2 s 和 0.058 s ,使用文献[13]中提供小波去噪方法,每例数据耗时仅 0.017 s 。EQP 相对较慢的原因是每次执行式(12)时均要执行 5 次矩阵乘法运算,在今后的硬件实现中可通过并行运算实现加速。

总体来看,对整体曲面或某些局部区域进行平滑时,EQP 与其他方法结果相比较,在不同噪声水平下各有所长;其中在噪声水平较大时,EQP 具有一定优势。

3.3 几何显著特征保持实验

人脸曲面上具有一些显著的几何特征点,如鼻尖点、鼻梁点和内外眼角点,它们都是人脸曲面上高斯曲率的全局或局部极值点,也往往是人脸识别中有用的信息^[14]。本实验中考察 EQP 表示下的人脸曲面几何特征保持能力。

以文献[14]中提取鼻尖点、鼻梁点和内外眼角点共 6 个点的算法为特征点提取方法(以未加噪人脸曲面的提取结果为基准),考察不同强度噪声下经 EQP 平滑后的特征点提取准确率(敏感性)。实验选取 5 位测试者的 10 例人脸曲面数据(每人两种姿态)。

从表 2 中可以看到,当噪声方差 N 较小时,检测方法基本能检测出所有的人脸曲面特征点。而当噪声进一步加大时,眼角点检测率急剧下降,这是因为人脸眼角仅是局部高斯曲率极小值,EQP 已经较

表 2 不同噪声下经 EQP 平滑后的人脸曲面特征点检测准确率

	EQP-smoothed facial surface						/%
	$N=1$	$N=2$	$N=3$	$N=4$	$N=5$	$N=10$	$N=15$
鼻尖	100	100	100	100	100	90	50
鼻梁	100	100	100	100	100	90	30
内眼角 1	100	100	100	100	90	60	20
内眼角 2	100	100	100	100	90	50	30
外眼角 1	100	100	100	90	90	40	10
外眼角 2	100	100	100	80	80	50	10

难从很大噪声中完整恢复出这一几何特征;对于鼻尖和鼻梁更为显著的几何特征,经 EQP 平滑过的曲面还能较好地保持。这实际可以前面实验结果中鼻部的信噪比总是高于眼部来解释。总的来看,基于 EQP 的形状表示与平滑还是能较好地保持住人脸曲面的一些显著几何特征的。

4 结 论

客观世界物体形状常蕴含反映物体本质属性的特征,因此需要研究适合的形状表示方法与技术来保持这些特征。本文将表示 2 维形状轮廓的弹性二次曲线模型 EQW 推广至表示 3 维形状的弹性二次曲面模型 EQP,并以 3 维人脸成像数据为实验对象,验证 EQP 在曲面细节保持、数据平滑等方面的有效性。

需要注意到,本文 EQP 算法中要求 3 维形状点均匀逆映射至规则且统一的 2 维参数平面上,即形状流形上每一点都可用统一的坐标架表示(本文的 3 维人脸数据恰好满足这一要求),而如散乱点云、三角面片组成的形状却不满足这一要求。因此将 EQP 算法进一步推广至其他数据结构下的 3 维形状是下一步研究的内容。

志谢:感谢 Susquehanna 大学 Kubota 教授在算法实现过程中的帮助与建议。

参考文献 (References)

- [1] Marr D. Vision [M]. San Francisco: Freeman. 1982.
- [2] Freeman H. Computer processing of line drawing images [J]. Computing Surveys. 1974, 6(1):57-97.
- [3] Cootes T F, Taylor C J, Cooper D H. Active shape models, their training and applications [J]. Computer Vision and Image Understanding, 1995, 61(1): 38-59.
- [4] Kendall D G. Shape manifolds, Procrutean metrics and complex projective spaces [J]. Bulletin of London Mathematical Society, 1984, 16(2): 81-121.
- [5] Younes L, Michor P W, Shah J, et al. A metric on shape space with explicit geodesics [J]. Rendiconti Lincei-Matematica e Applicazioni, 2008, 16(9): 25-57.
- [6] Srivastava A, Klassen E, Joshi S H, et al. Shape analysis of elastic curves in Euclidean spaces [J]. IEEE Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2011, 33(7): 1415-1428.
- [7] Kubota T. A Shape representation with elastic quadratic polynomials-preservation of high curvature points under noisy conditions [J]. International Journal of Computer Vision, 2009, 82(2):

- 133-155.
- [8] Lu F, Milios E E. Optimal spline fitting to planar shape [J]. *Signal Processing*. 1994, 37(1): 129-140.
- [9] Precioso F, Barlaud M, Blu T, et al. Robust realtime segmentation of images and videos using a smooth-spline snake-based algorithm [J]. *IEEE Transaction on Image Processing*, 2005, 14(7): 910-924.
- [10] Zhang R G, Liu X J, Liu K, et al. B-spline active contour boundary extraction based on conjugate gradient vector [J]. *Journal of Image and Graphics*. 2010, 15(1): 103-108. [张荣国, 刘小君, 刘焜, 等. 基于共轭梯度的B样条主动轮廓边缘提取 [J]. *中国图象图形学报*. 2010, 15(1): 103-108.]
- [11] Kimachi A, Ando S. Real-time phase-stamp range finder using correlation image sensor [J]. *IEEE Sensor Journal*. 2009, 9(12): 1784-1792.
- [12] Zhan S, Chang H, Jiang J G, et al. Improved 3D AAMs for facial recognition based on CIS 3D facial imaging [J]. *Journal of Image and Graphics*. 2008, 13(10): 2059-2063. [詹曙, 常虹, 蒋建国, 等. 基于相关型图像传感器三维人脸成像的三维AAMs人脸识别方法的研究 [J]. *中国图象图形学报*, 2008, 13(10): 2059-2063.]
- [13] Peyre G. Image denoising with wavelets [CP/OL]. (2009-08-08) [2011-08-25] http://www.ceremade.dauphine.fr/~peyre/numerical-tour/tours/denoisingwav_2_wavelet_2d/.
- [14] Jiang J G, Chang H, Zhan S, et al. Improved 3D AAMs for automatic location of facial feature based on CIS 3D facial imaging [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrument*. 2009, 23(5): 74-78. [蒋建国, 常虹, 詹曙, 等. 基于相关型图像传感器的3D AAMs人脸特征自动定位 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2009, 23(5): 74-78.]