

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.201711039



采用叠加图像的浅浮雕 生成算法及实现

朱钰恒^{1,2}, 刘斌^{1,2}, 张凌搏^{1,2}

(1. 华侨大学 数字化测量技术厦门市重点实验室, 福建 厦门 361021;
2. 华侨大学 福建省特种能场制造重点实验室, 福建 厦门 361021)

摘要: 针对图像生成浅浮雕的细节特征问题和特征的空间相对位置问题,提出一种基于叠加的图像浅浮雕生成算法.压缩图像的灰度值,得到浮雕的基础轮廓,而对图像灰度值取补集,压缩补集,得到浮雕的修正轮廓;修正轮廓与基础轮廓叠加得到浮雕的轮廓;对图像进行去雾,增强细节,提取图像的细节特征;压缩细节特征得到细节轮廓,细节轮廓与浮雕轮廓叠加以增强浮雕的细节.实验结果表明:文中算法适应各种场景的图像,所得浮雕细节清晰,具有工程应用价值.

关键词: 浅浮雕;浮雕轮廓;细节增强;图像叠加;数字图像

中图分类号: TP 391 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2018)02-0172-07

Algorithm and Its Implementation of Bas-Relief Generation Using Image Overlay

ZHU Yuheng^{1,2}, LIU Bin^{1,2}, ZHANG Lingbo^{1,2}

(1. Xiamen Key Laboratory of Digital Vision Measurement, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;
2. Fujian Provincial Key Laboratory of Special Manufacturing, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: Aiming at the problem of the detail features of bas-relief generated by image and the relative position of the features in the bas-relief space, an overlay based bas-relief generation algorithm is proposed in this work. Compressing gray value of the input image is used to obtain basal bas-relief outline. Getting complementary set of gray value of the input image and compressing the complementary is set to obtain amending bas-relief outline. Adding overlay with the basal bas-relief is to obtain bas-relief outline. Dealing the input image with dehazing algorithm and enhancing its contrast to get enhanced image's detailed image. Compressing gray value of the detailed image and adding it to bas-relief outline is to enhance the detail of bas-relief. Experimental results show that the algorithm proposed in this work can be applied in images with various scenes, and the obtained bas-relief has distinct detail.

Keywords: bas-relief; relief outline; detail enhancement; image overlay; digital image

在计算机技术领域,对浮雕的研究目前主要分为两个方向:基于 3D 模型或深度图像的浮雕生成方法^[1-2]和基于图像的浮雕生成方法^[3-5].基于 3D 模型^[6-7]或深度图像^[8-9]的浮雕生成方法主要是对 3D 模型和深度图像的压缩,这方面研究成果较多,生成方法相对成熟,但该方法对输入的要求较高,需要用户输入 3D 模型或者深度图像.基于图像的浮雕生成方法以图像作为输入,图像的获取较为简便,有更高

收稿日期: 2017-11-14

通信作者: 刘斌(1972-),男,教授,博士,主要从事数字化设计制造、面向 3D 打印的软件技术的研究. E-mail: mold_bin@hqu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51575196);福建省工业引导性基金资助项目(2016H0020)

的实用价值. Zeng 等^[10]提出基于区域的浮雕生成方法, 先根据图像的特征线把图像分区, 然后, 根据各个分区的像素值特点建立区域层, 用来弥补因像素值引起的高度误差, 取得了较好的浮雕效果, 但该方法对细节特征的描述偏差较大, 需要交互. 本文提出一种用图像补集的高度信息与图像的高度信息叠加的浅浮雕生成方法, 边缘检测算子对特征增强后的图像提取细节信息, 与网格叠加, 得到浮雕.

1 图像预处理

图像高度场是根据图像的灰度值确定的, 对图像进行灰度化处理. 这样得到的灰度图像存在一定的噪声, 噪声对图像的高度场存在很大的影响, 映射到浮雕上就是一个个凸(凹)点, 严重影响浅浮雕的局部细节特征. 所以, 在提取高度场前, 需对图像进行滤波处理, 消除噪声等的影响. 采用中值滤波, 去除灰度图像中的噪声, 即

$$\hat{f}(x,y) = \operatorname{median}\{g(s,t)\}_{(s,t) \in S_{x,y}}. \tag{1}$$

式(1)中: (x,y) 为要进行中值滤波的像素点; $S_{x,y}$ 为滤波器的大小. 采用伽马校正^[11-13]对图像的亮度进行调整. 采用文献[11]中的伽马校正方法, 对 0~255 的灰度值进行分段处理. 这样不仅能增加校正曲线暗区的斜率, 还可以保持亮区的校正曲线不变. 修正后的伽马校正公式为

$$V_u = \begin{cases} 245 \times (u/255)^{1/2.4}, & 0 \leq u \leq 90, \\ 255 \times (u/255)^{1/2.2}, & 90 \leq u \leq 255. \end{cases} \tag{2}$$

图像预处理的结果, 如图 1 所示.

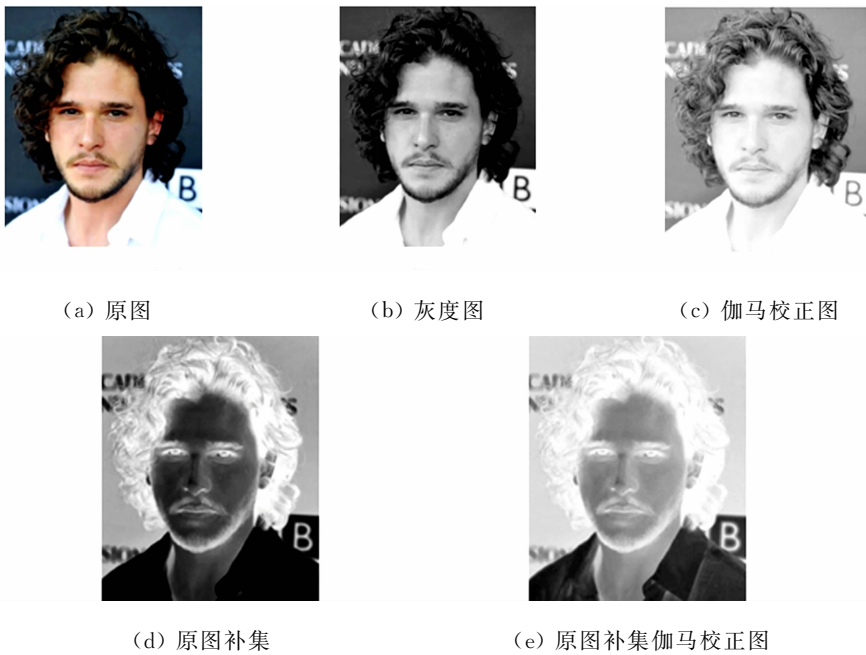


图 1 预处理效果

Fig. 1 Pretreatment renderings

2 高度场提取

用图像上的灰度值作为浮雕上的深度初始信息, $H(x,y)$ 表示图像上每一点的灰度值, 取值范围为 $[0,255]$. 根据光照强度反射定律, 反求出浮雕表面的深度信息. 光照强度反射定律为

$$\left. \begin{aligned} R_s &= |r_s|^2, \\ R_p &= |r_p|^2. \end{aligned} \right\} \tag{3}$$

式(3)中: r_s 和 r_p 分别为 s 方向和 p 方向的反射系数, s 和 p 分别为平行于入射光方向和垂直于入射光方向; R_s 和 R_p 分别为 s 方向和 p 方向的反射率. 文中算法忽略 p 方向的分量, 在 s 方向上用图像的灰度信息代替反射率, 用浮雕的深度信息代替反射系数, 设由反射定律得到的浮雕深度为 $F_R(x,y)$, 则有

$$F_R(x,y) = \sqrt{H(x,y)}. \tag{4}$$

由式(4)可知:这是一个指数压缩的公式. 为了方便调控压缩的程度, 此处引入一个调整因子 $\beta(\beta>0)$, 则式(4)变为

$$F_R(x,y) = \sqrt{H(x,y) + \beta}. \tag{5}$$

为了方便控制压缩后浮雕的厚度, 设置浮雕压缩的范围为 $[\rho_1, \rho_2]$, 此时式(5)变为

$$F_R(x,y) = \frac{(\rho_2 - \rho_1) \sqrt{H(x,y) + \beta}}{\sqrt{255 + \beta}} + \rho_1. \tag{6}$$

原图按式(2)压缩得到的网格, 如图 2 所示. 图 2 中: $\beta_1=500; \rho_1=0; \rho_2=10$.

根据光照强度透射定律, 应用反求法, 可以得到关于图像透射部分的深度信息. 光照的透射定律公式为

$$\left. \begin{aligned} T_s &= n_2/n_1 |t_s|^2, \\ T_p &= n_2/n_1 |t_p|^2. \end{aligned} \right\} \tag{7}$$

式(7)中: T_s 和 T_p 分别为 s 方向和 p 方向的透射率; n_1 和 n_2 为两种介质的折射率. 同上, 忽略 p 方向的分量, 用图像的灰度信息的补集代替反射率, 用浮雕的深度信息代替反射系数. 设由折射定律得到的浮雕深度为 $F_T(x,y)$, 可以得到

$$F_T(x,y) = \sqrt{n_1/n_2} \sqrt{(255 - H(x,y))}. \tag{8}$$

式(8)中: T 为投射压缩部分. 调整因子 β , 调整厚度的范围为 $[\rho_1, \rho_2]$, 令 $\sqrt{n_1/n_2} = i$, 可得

$$F_T(x,y) = \frac{(\rho_2 - \rho_1) i \sqrt{(255 - H(x,y)) + \beta}}{\sqrt{255 + \beta}} + \rho_1. \tag{9}$$

用式(9)对补集进行压缩, 可得反面效果图, 如图 3 所示. 图 3 中: $\beta_2=500; \rho_1=0; \rho_2=10$.

将式(9)得到的深度信息进行加权叠加到式(7)得到的深度信息上, 得到浮雕的深度信息, 即

$$F(x,y) = F_R(x,y) + iF_T(x,y). \tag{10}$$

叠加效果图, 如图 4 所示. 图 4 中: $i=0.2$.

3 细节增强

两个深度信息叠加后, 得到更加合适的高度, 但是模型上的细节信息受到一定的影响^[14-15]. 采用文献[14]中图像去雾的方法增强细节, 效果显著. 首先, 引入雾霾图像模型, 根据大气光学理论引入雾霾图像模型为

$$I(x,y) = t(x,y)J(x,y) + (1 - t(x,y))A. \tag{11}$$

式(11)中: $J(x,y) = (J_r(x,y), J_g(x,y), J_b(x,y))^T$ 为原始图像中 (x,y) 处应该有的色彩值; $I(x,y) = (I_r(x,y), I_g(x,y), I_b(x,y))^T$ 为现实场景中观察到的 (x,y) 处的色彩值; $A = (A_r, A_g, A_b)^T$ 为周围环境光在 (x,y) 处的色彩值; $t(x,y) \in [0, 1]$ 为原始图像色彩在 (x,y) 处的权值. 其次, 估计周围环境光. 用垂直线对输入图像进行 4 等分, 用每个区域的平均像素值减去该区域的标准差表示该区域的比较值. 对比较值最高的区域, 继续 4 等分求比较值, 直到最小区域小于预先设定的阈值. 取该区域中使 $\| (I_r(x,y), I_g(x,y), I_b(x,y)) - (255, 255, 255) \|$ 值最小的点, 其值为周围环境光的值.

再次, 用均方差方法恢复对比度, 即

$$C_{MSE} = \sum_{p=1}^N \frac{(J_c(x,y) - \bar{J}_c)}{N}. \tag{12}$$

式(12)中: $c \in \{r, g, b\}$ 为图像的颜色通道; \bar{J}_c 为图像在上述区域内 $J_c(x,y)$ 的平均值. 进一步可得

$$C_{MSE} = \sum_{p=1}^N \frac{(I_c(x,y) - \bar{I}_c)}{t^2 N}. \tag{13}$$



图 2 正面效果图
Fig. 2 Front renderings



图 3 反面效果图
Fig. 3 Back renderings

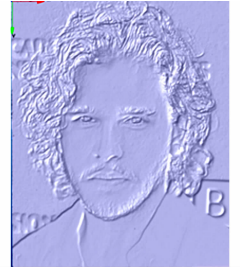


图 4 叠加效果图
Fig. 4 Overlay renderings

式(13)中: \bar{I}_c 为图像在上述区域内 $I_c(x, y)$ 的平均值. 由式(13)可知: t 与图像对比度恢复的程度成反比, 当 t 值过大或过小时, 导致输出图像像素值的溢出. 为了在保证对比度同时减小溢出, 定义成本函数、对比度成本函数、像素值溢出的成本函数分别为

$$E = E_{\text{contrast}} + \lambda_L E_{\text{loss}}, \quad (14)$$

$$E_{\text{contrast}} = - \sum_{c \in \{r, g, b\}} \sum_{p \in B} \frac{(J_c(x, y) - \bar{J}_c)^2}{N_B} = - \sum_{c \in \{r, g, b\}} \sum_{p \in B} \frac{(I_c(x, y) - \bar{I}_c)}{t^2 N_B}, \quad (15)$$

$$E_{\text{loss}} = \sum_{c \in \{r, g, b\}} \sum_{p \in B} \{(\min\{0, J_c(x, y)\})^2 + (\max\{0, J_c(x, y) - 255\})^2\} = \sum_{c \in \{r, g, b\}} \left\{ \sum_{i=0}^{\alpha_c} \left(\frac{i - A_c}{t} \right)^2 h_c(i) + \sum_{i=\beta_c}^{255} \left(\frac{i - A_c}{t} + A_c - 255 \right)^2 h_c(i) \right\}. \quad (16)$$

式(14)~(15)中: λ_L 为两者之间的权值; \bar{J}_c 和 \bar{I}_c 分别是 $J_c(x, y)$ 和 $I_c(x, y)$ 在区域 B 上的平均值; N_B 是区域 B 上的像素个数; $h_c(i)$ 是在区域 B 上像素值 i 的直方图统计值; α_c 和 β_c 是输入图像中出现溢出的临界值.

通过上述方法得到细节增强的图像, 用 Sobel 边缘检测算子^[16-18]提取细节信息, 将得到的细节信息叠加到浮雕上, 得到细节增强的浮雕.

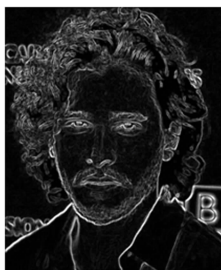
经过 Sobel 边缘检测算子可以得到图像中轮廓特征, 将图像的轮廓特征用式(6)压缩, 设压缩后的高度场为 $F_3(x, y)$, 叠加到浮雕轮廓上得到最终的浮雕, 结合式(10)可得

$$F(x, y) = F_1(x, y) + F_2(x, y) + jF_3(x, y). \quad (17)$$

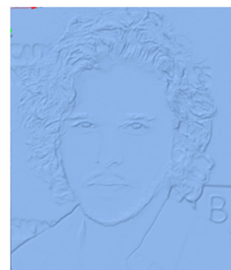
式(17)中: j 为压缩后的高度场为 $F_3(x, y)$ 的加权系数. 结果如图 5 所示. 图 5 中: $i=0.2$; $j=0.05$.



(a) 图的细节增强



(b) Sobel 边缘检测算子结果



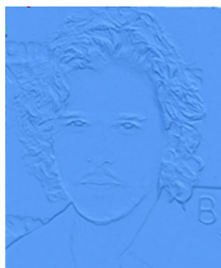
(c) 最终浮雕效果

图 5 细节增强效果图

Fig. 5 Detail enhancement renderings

4 实验结果与分析

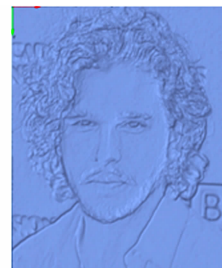
文中方法在 Microsoft Visual Studio 2013 中实现. 不同厚度、不同压缩程度的效果对比, 如图 6 所示. 图 6 中: 中值滤波器的规格为 3×3 ; $i=0.2$; $j=0.05$. 由图 6 可知: 当压缩程度一定时, 厚度越大浅浮雕的特征越明显(横排对比), 主要表现在头发部分, 对眼睛、嘴巴、胡子等的影响较小, 从头发部分可以明显地看出厚度越大, 细节特征越明显, 头发纹理间的沟壑越深; 当厚度一定时, 压缩程度对浅浮雕的影响, 随着 β_1, β_2 的增加, 压缩程度越高, 浅浮雕的细节特征就越瘪(竖排对比), 图 6(c)的细节特征最为明显, 图 6(g)的细节特征被压缩的最严重.



(a) $\beta_1 = \beta_2 = 250, \rho_1 = 0, \rho_2 = 5$



(b) $\beta_1 = \beta_2 = 250, \rho_1 = 0, \rho_2 = 10$



(c) $\beta_1 = \beta_2 = 250, \rho_1 = 0, \rho_2 = 15$

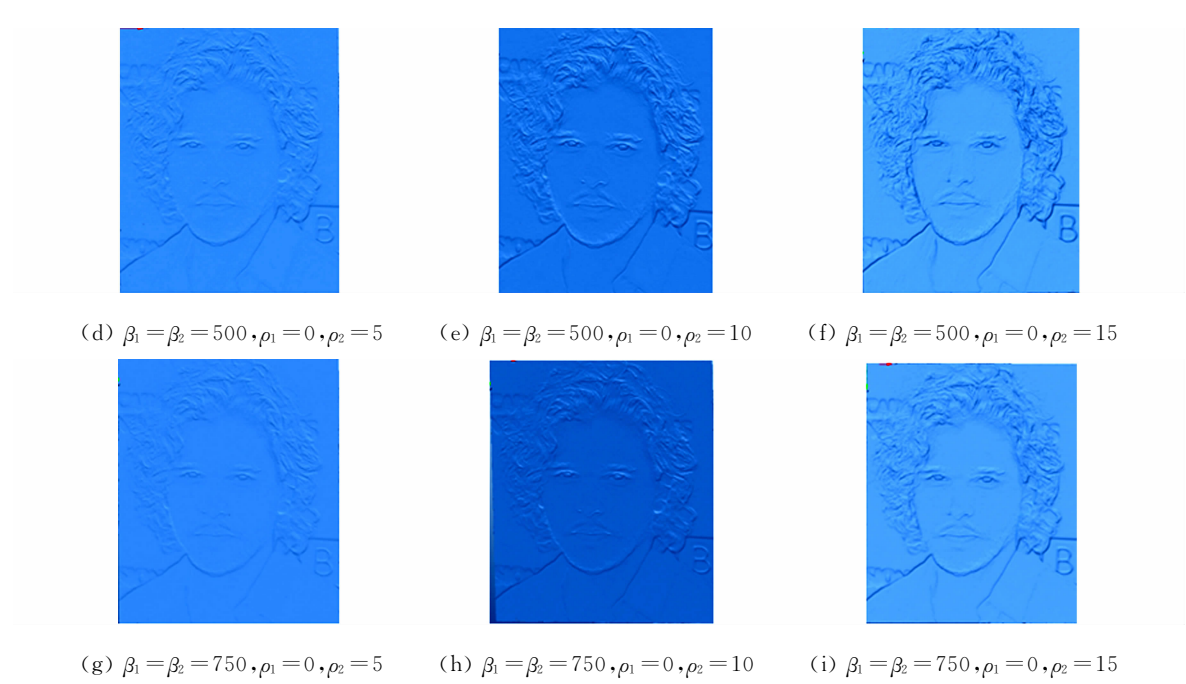


图 6 不同厚度与压缩程度的对比

Fig. 6 Comparison of different thickness and degree of compression

不同叠加权参数时的浮雕效果对比,如图 7 所示. 图 7 中:中值滤波器的规格为 3×3 ; $\rho_1 = 0$; $\rho_2 = 10$; $\beta_1 = \beta_2 = 500$.

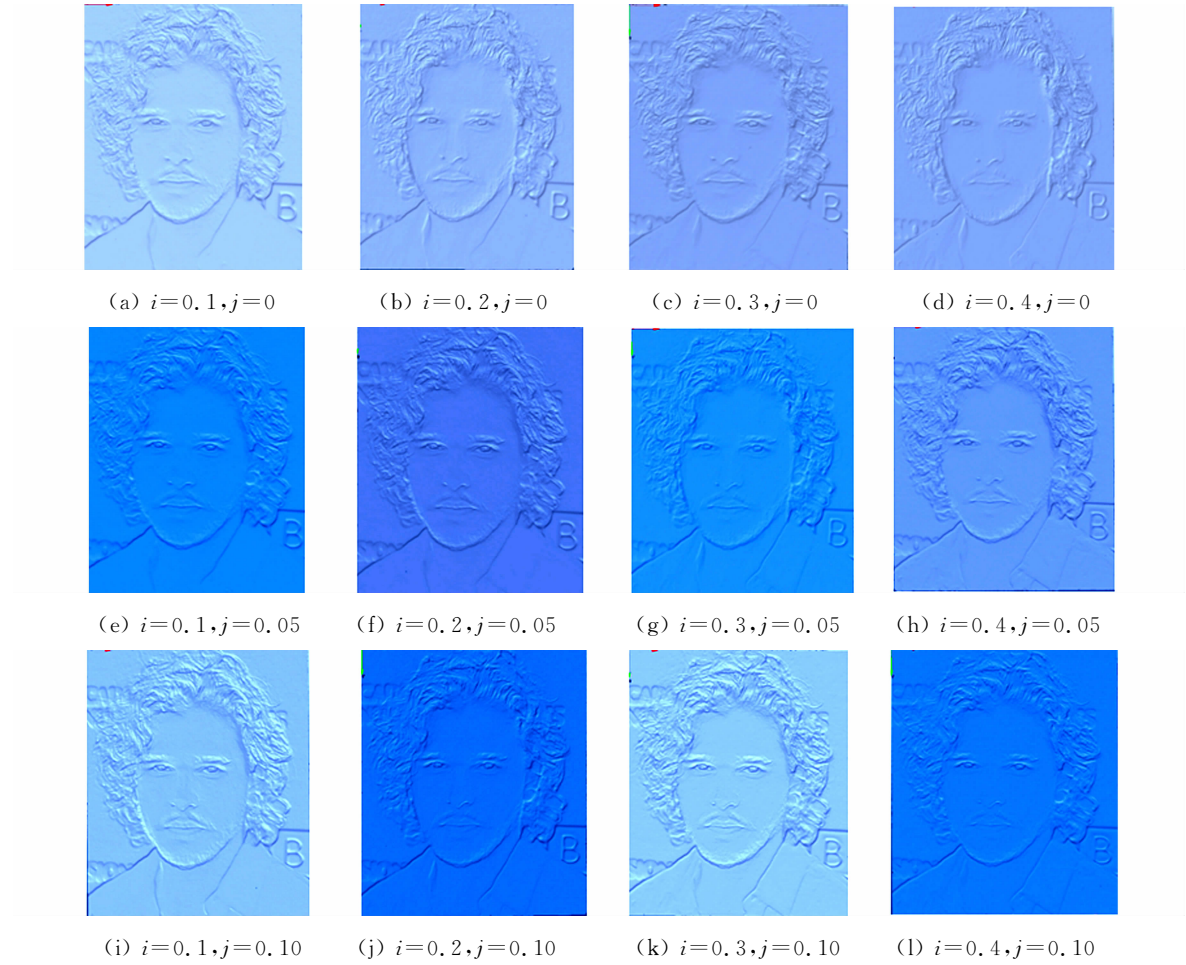
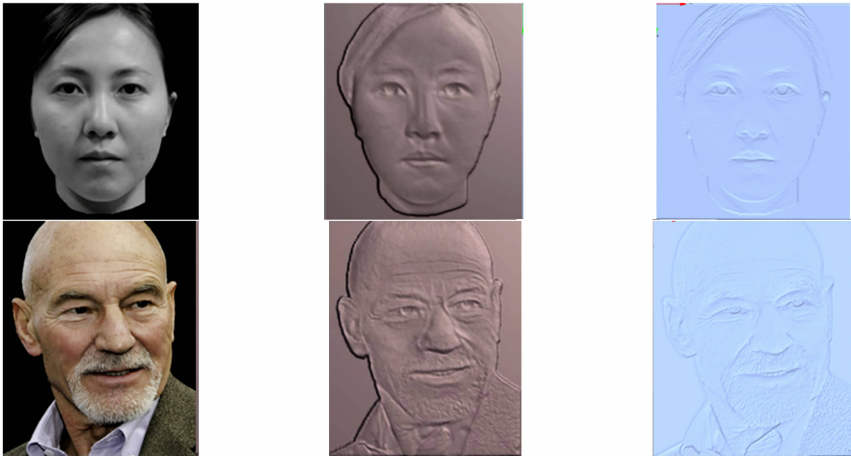


图 7 不同叠加参数的对比

Fig. 7 Comparison of different overlaid parameters

由图 7 可知：补集的高度场对浮雕高度场的修正作用，加权系数越大，补集高度场对浮雕高度场的修正作用越大，图 7(a)~(d) 没有细节增强部分的高度场，直接表现补集高度场对浮雕高度场的影响（横排对比）；细节增强对浅浮雕效果的影响，在补集高度场的权值系数一定时，细节增强部分的高度场对浅浮雕的细节有明显的改善（竖排对比）。

不同的人物图像的浮雕效果，如图 8 所示。图 8 中：中值滤波器的规格为 3×3 ； $\beta_1 = \beta_2 = 500$ ； $\rho_1 = 0$ ； $\rho_2 = 10$ ； $i = 0.2$ ； $j = 0.05$ 。图像来源于文献[10]，文中算法和文献[10]初衷相似，都是致力于寻找合理的特征位次关系。文献[10]通过划分不同区域，并对不同区域赋予一定的厚度，修正图像位次关系；文中通过图像补集修正图像位次关系。由图 8 可知：算法的结果对细节特征的处理优于文献[10]的方法。



(a) 原图像 (b) 文献[10]浮雕效果 (c) 文中浮雕效果

图 8 不同人物图像的浮雕效果

Fig. 8 Bas-relief renderings of different figures

浮雕灰度图的浮雕效果，如图 9 所示。图 9 中：中值滤波器的规格为 3×3 ； $\beta_1 = \beta_2 = 500$ ； $\rho_1 = 0$ ； $\rho_2 = 10$ ； $i = 0.2$ ； $j = 0.05$ 。浮雕灰度图来源于网络，浮雕灰度图的灰度值有正确的图像高度信息，经文中算法压缩后得到的浅浮雕，符合实际场景中浅浮雕的圆润、自然等特点。

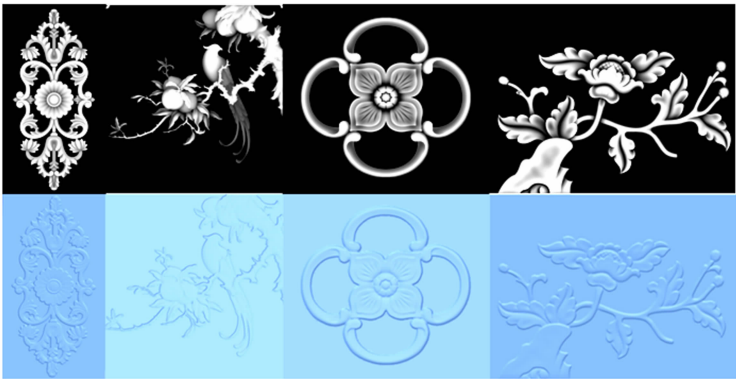


图 9 浮雕灰度图的浮雕效果

Fig. 9 Bas-relief renderings of relief grayscale

5 结论

提出一种用图像补集的高度信息与图像的高度信息叠加的浅浮雕生成方法。算法主要分为图像处理和高度场压缩两个部分：第 1 部分图像处理为了让高度场不出现离群点和提取图像的细节信息，为下一步压缩做准备；第 2 部分是对得到的 3 种高度场进行指数压缩。融合压缩结果，得到经过细节增强的浅浮雕模型。

文中提出的方法以二维图像作为输入，相较于基于 3D 模型的浮雕生成方法，对输入的要求较低；算法将去噪和细节增强分开处理，尽可能利用图像提供的信息增强生成浮雕的效果，用图像补集修正图

像的高度场,操作简单.文中所提出的算法简单易于实现,能够通过灰度图生成细节增强的浅浮雕,具有实际应用价值.

参考文献:

- [1] JI Zhongping, MA Weiyin, SUN Xianfang. Bas-relief modeling from normal images with intuitive styles[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2014, 20(5): 675-685. DOI:10.1109/TVCG.2013.267.
- [2] SUN Xianfang, ROSIN P L, MARTIN R R, *et al.* Bas-relief generation using adaptive histogram equalization[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2009, 15(4): 642-653. DOI:10.1109/TVCG.2009.21.
- [3] LI Zhuwen, WANG Song, YU Jinhui, *et al.* Restoration of brick and stone relief from single rubbing images[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2012, 18(2): 177-187. DOI:10.1109/TVCG.2011.26.
- [4] WU Jing, MARTIN R R, ROSIN P L, *et al.* Making bas-reliefs from photographs of human faces[J]. Computer-Aided Design, 2013, 45(3): 671-682. DOI:10.1016/j.cad.2012.11.002.
- [5] ALEXA M, MATUSIK W. Reliefs as images[J]. Acm Transactions on Graphics, 2012, 29(4): 60. DOI:10.1145/1778765.1778797.
- [6] WEYRICH T, DENG J, BARNES C, *et al.* Digital bas-relief from 3D scenes[C]//ACM Transactions on Graphics (TOG). New York: ACM, 2007, 26(3): 32. DOI:10.1145/1276377.1276417.
- [7] KERBER J, TEVS A, BELYAEV A, *et al.* Feature sensitive bas relief generation[C]//Conference on Shape Modeling and Applications. Piscataway: IEEE Press, 2009: 148-154. DOI:10.1109/SMI.2009.5170176.
- [8] KERBER J, BELYAEV A, SEIDEL H P. Feature preserving depth compression of range images[C]//Spring Conference on Computer Graphics. New York: ACM, 2007: 101-105. DOI:10.1145/2614348.2614363.
- [9] 陆巧, 王璐, 孟祥旭, 等. 结合深度图像和强度图像的人脸浅浮雕生成算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2015(7): 1172-1181. DOI:10.3969/j.issn.1003-9775.2015.07.004.
- [10] ZENG Qiong, MARTIN R R, WANG Lu, *et al.* Region-based bas-relief generation from a single image[J]. Graphical Models, 2014, 76(3): 140-151. DOI:10.1016/j.gmod.2013.10.001.
- [11] 刘明宇. 视频图像处理关键算法与智能视频监控系统研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
- [12] GUO Hongwei, HE Haitao, CHEN Mingyi. Gamma correction for digital fringe projection profilometry[J]. Applied Optics, 2004, 43(14): 2906-2914. DOI:10.1364/AO.43.002906.
- [13] HUANG S C, CHENG F C, CHIU Y S. Efficient contrast enhancement using adaptive gamma correction with weighting distribution[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2013, 22(3): 1032-1041. DOI:10.1109/TIP.2012.2226047.
- [14] KIM J H, JANG W D, SIM J Y, *et al.* Optimized contrast enhancement for real-time image and video dehazing[J]. Journal of Visual Communication and Image Representation, 2013, 24(3): 410-425. DOI:10.1016/j.jvcir.2013.02.004.
- [15] 王伟鹏, 戴声奎. 引导滤波在雾天图像清晰化中的应用[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2015, 36(3): 263-268. DOI:10.11830/ISSN.1000-5013.2015.03.0263
- [16] GONZALEZ R C, WOODS R E. Digital image processing[M]. 3th ed. New York: Pearson Education, 2010: 729-736.
- [17] KANOPOULOS N, VASANTHAVADA N, BAKER R L. Design of an image edge detection filter using the Sobel operator[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2002, 23(2): 358-367. DOI:10.1109/4.996.
- [18] QU Yingdong, CUI Chengsong, CHEN Sanben, *et al.* A fast subpixel edge detection method using sobel-zernike moments operator[J]. Image and Vision Computing, 2005, 23(1): 11-17. DOI:10.1016/j.imavis.2004.07.003.

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 崔长彩)