

图像的频域倒数—高斯级联低通滤波去噪方法^{*}

王 杰, 毛玉泉, 李思佳, 吴崇虎
(空军工程大学 信息与导航学院, 西安 710077)

摘 要: 针对图像频域滤波中细节信息丢失的问题, 提出了一种频域倒数—高斯级联低通滤波去噪方法。该方法在频域利用倒数快速收敛的性质并结合高斯低通滤波器, 实现了图像的联合滤波去噪。其在有效滤除高频噪声的同时更最大限度地保留了图像的细节分量, 进而使处理后的图像具有较高的对比度, 对于去除噪声、提高图像质量有显著的效果。仿真结果表明, 在相同的有效滤波面积基础上, 与传统低通滤波器、倒数—理想级联低通滤波器、倒数—巴特沃斯级联低通滤波器相比, 该方法的去噪效果最佳。

关键词: 图像去噪; 频域滤波; 倒数滤波; 有效滤波面积; 高斯低通滤波; 主观评价法; 客观评价法

中图分类号: TP391.4; TP317.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2012)12-4775-04

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.12.098

Frequency domain reciprocal—Gaussian cascade low-pass filtering denoising method of image

WANG Jie, MAO Yu-quan, LI Si-jia, WU Chong-hu

(Information & Navigation Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

Abstract: To reduce the loss of details in the image frequency domain filtering, this paper proposed a new frequency method that reciprocal—Gaussian cascade low-pass filter. The method utilized the nature of reciprocal fast convergence and combined with Gaussian low-pass filter to achieve the joint filter of the image, it had significant impression on improving image quality by keeping a greater measure of image detail component while filtering the high-frequency noise, it processed the after image having higher contrast. Simulation shows that, comparing with traditional low-pass filter, reciprocal—ideal cascade low-pass filter and reciprocal—Butterworth cascade low-pass filter based on the same effective filter area, the proposed method is the best on denoising effect.

Key words: image denoising; frequency domain filtering; reciprocal filter; effective filter area; Gaussian low-pass filter; subjective evaluation method; objective evaluation method

0 引言

噪声的频域特点是在频域均匀分布, 高频的强度和低频的强度相差不大; 图像的频域特点是图像信息大部分集中在低频部分^[1]。在频域进行图像去噪, 是将图像进行某种变换, 如离散傅里叶变换^[2]、离散余弦变换^[3]、沃尔什变换^[4]和小波变换^[5,6]等, 然后在变换域内对图像进行操作, 再进行逆变换得到处理后的图像。在频域的操作主要是利用低通滤波器滤除高频噪声分量以去除图像噪声。

常用的频域低通滤波器有理想低通滤波器、高斯低通滤波器^[1]、巴特沃斯低通滤波器等。理想低通滤波器能在一定程度上除去图像噪声, 但带来的图像边缘和细节的模糊效果也较明显, 另外理想低通滤波器实现比较困难^[7]; 高斯低通滤波器则克服了实现困难的问题, 但对低频分量存在非线性增强, 使处理后的图像对比度不高而存在模糊; 巴特沃斯低通滤波器能较好地滤除高频分量^[8], 但对有用的低频分量仍然是非线性处理的, 不同程度地增强低频信息使处理结果模

糊而不够清晰。

在图像去噪处理中, 希望既能滤除噪声的影响, 同时又能最大限度地保留图像细节信息。本文提出了一种倒数—高斯级联的低通滤波方法, 该方法利用倒数快速收敛的性质构建一级滤波器进行预滤波, 然后调用高斯滤波器进行二次滤波, 实现了在频域对图像的级联滤波去噪。通过与传统滤波方法、倒数—理想级联低通滤波和倒数—巴特沃斯级联低通滤波方法的仿真比较, 说明了本文所提方法的可行性与有效性。

1 频域倒数—高斯级联低通滤波

图像的信息大部分集中在幅度谱的低频和中频段, 而噪声分量则基本上分布在较高频段^[9]。图1(b)(c)是对图像进行离散傅里叶变换(discrete Fourier transform, DFT)后的频谱及经过平移的幅度谱。在图1(b)中, 图像频谱的低频部分对应图像平滑的灰度分量, 高频率部分对应图像的边缘和有灰度级突变改变——噪声部分, 由图1(c)更清晰体现了其分布特点。

收稿日期: 2012-04-22; **修回日期:** 2012-05-28 **基金项目:** 陕西省电子信息系统系统集成重点实验室基金资助项目(201102Y05); 空军工程大学信息与导航学院科研创新基金资助项目(DYCX1040); 空军工程大学研究生创新课题资助项目(20110301)

作者简介: 王杰(1987-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为图像增强技术、信道抗干扰技术(xdwj061216@126.com); 毛玉泉(1957-), 男, 教授, 中国通信学会高级会员, 主要研究方向为图像、语音传输技术、数据链抗干扰技术; 李思佳(1987-), 男, 陕西西安人, 博士研究生, 主要研究方向为天线设计及其数值计算; 吴崇虎(1985-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为编译码技术。

因此,构造一个低通滤波器,使低频分量能够顺利通过,而有效地阻止高频分量,就可以滤除噪声的影响^[10,11]。

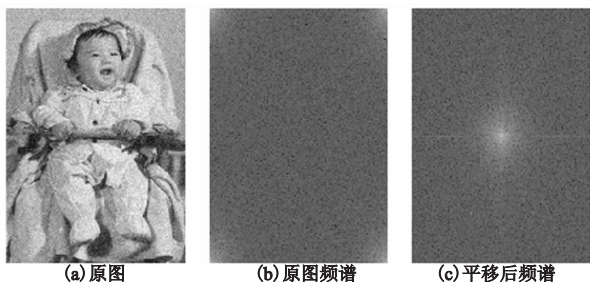


图1 图像傅里叶变换及平移频谱图

由卷积定理,低通滤波的数学表达式为^[7]

$$G(u, v) = F(u, v)H(u, v) \quad (1)$$

其中: $G(u, v)$ 为经低通滤波后输出图像的傅里叶变换; $F(u, v)$ 为含有噪声图像的傅里叶变换; $H(u, v)$ 为传递函数,即滤波函数。

图像噪声分布在频谱图的四个角及边沿,从中得到启发而提出了一种新的倒数低通滤波算法进行预滤波。该算法利用倒数快速收敛的性质,能够有效滤除频谱图中边角高频噪声分量,同时充分保留图像低频细节信息。但是这样滤波后还存在相当一部分噪声,所以紧接着调用高斯滤波的进行二次滤波,进一步减少噪声的影响而改善图像质量。最后经过离散傅里叶逆变换到空域,实现噪声图像的级联滤波去噪处理。级联滤波框图如图2所示。

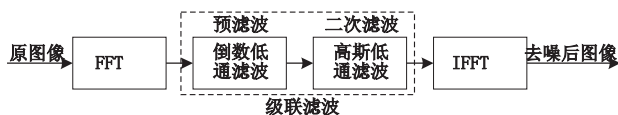


图2 级联滤波框图

1.1 图像时频域转换

傅里叶变换(Fourier transform, FT)^[12]提供了一种在空域和频域相互变换的手段,而且在相互转换的过程中不丢失任何信息。对于数字图像处理则采用离散傅里叶变换(DFT)及其逆变换(inverse discrete fourier transform, IDFT)^[2,8]来实现图像的时域和频域互转,其二维DFT及IDFT公式如式(2)(3)所示。

$$F(u, v) = \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) e^{-j2\pi(ux/M + vy/N)} \quad (2)$$

$$f(x, y) = \frac{1}{MN} \sum_{u=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{N-1} F(u, v) e^{j2\pi(ux/M + vy/N)} \quad (3)$$

其中: $F(u, v)$ 是对图像DFT的频谱; $f(x, y)$ 是像素灰度值; M 和 N 为图像的正向宽度和正向高度。

1.2 倒数—高斯级联低通滤波

离散傅立叶变化把图像从空域变换到频域,所携带的噪声信息被变换到高频部分,此时对图像进行频域低通滤波处理,可以达到去除噪声的目的。根据噪声分量的频域分布特点,设计了一个频域倒数低通滤波器,其原理如式(4)所示。

$$H(u, v) = \begin{cases} 1 & u < \frac{M}{2} + a/\left(v - \frac{N}{2}\right)^2 \text{ 且 } u > \frac{M}{2} - a/\left(v - \frac{N}{2}\right)^2 \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (4)$$

其中: M 和 N 为图像的正向宽度和正向高度; a 为常数,可以通过调节 a 的大小控制滤波器通带范围。

经过倒数低通预滤波后,图像噪声大部分被滤除,剩下少量的次高频噪声夹杂在图像中,此时选择高斯滤波进行二次滤

波可以有效地滤除剩余噪声的影响,使图像去噪效果更佳。高斯低通滤波器的滤波函数^[13]如下:

$$H(u, v) = e^{-[(u-M/2)^2 + (v-N/2)^2]/(2\delta^2)} \quad (5)$$

其中: δ 为高斯曲线的标准差, M 和 N 定义同前。

为了方便比较,在此介绍其他常用的两种低通滤波器(在后面仿真比较中将要用到):

a) 理想低通滤波器^[7]:

$$H(u, v) = \begin{cases} 1 & D(u, v) \leq D_0 \\ 0 & D(u, v) \geq D_0 \end{cases} \quad (6)$$

b) 巴特沃斯低通滤波器^[7,8]:

$$H(u, v) = \frac{1}{1 + (\sqrt{2} - 1)[D(u, v)/D_0]^{2n}} \quad (7)$$

其中: $D(u, v) = \sqrt{(u-M/2)^2 + (v-N/2)^2}$ 及 D_0 表示点 (u, v) 和截止频率点到中心点 $(M/2, N/2)$ 的距离; δ 为高斯曲线的标准差; n 是巴特沃斯低通滤波器的阶; M 和 N 定义同前。

2 仿真与比较

2.1 有效滤波面积

为了比较不同滤波器的去噪性能,在此定义一个比较基准指标——有效滤波面积,具体如下:

a) 定义理想低通滤波器的有效滤波面积如图3(a)所示,即

$$S_l = \pi D_0^2 \quad (8)$$

b) 定义高斯低通滤波器的有效滤波面积为其幅度衰减到峰值 $1/\sqrt{2}$ 时对应在 u, v 平面的投影面积,如图3(b)所示。令式(5)等于 $1/\sqrt{2}$,即

$$H(u, v) = e^{-[(u-M/2)^2 + (v-N/2)^2]/(2\delta^2)} = 1/\sqrt{2} \quad (9)$$

设投影面积半径为 $d_g = \sqrt{(u-M/2)^2 + (v-N/2)^2}$,有

$$d_g^2 = 2\delta^2 \ln \sqrt{2} \quad (10)$$

所以高斯低通滤波器的有效滤波面积为

$$S_g = \pi d_g^2 = 2\pi\delta^2 \ln \sqrt{2} \quad (11)$$

c) 定义巴特沃斯低通滤波器的有效滤波面积同高斯低通滤波器,如图3(c)所示。令式(7)等于 $1/\sqrt{2}$,有

$$H(u, v) = \frac{1}{1 + (\sqrt{2} - 1)[D(u, v)/D_0]^{2n}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \quad (12)$$

即 $D(u, v) = D_0$,所以巴特沃斯低通滤波器的有效滤波面积为

$$S_b = \pi D_0^2(u, v) = \pi D_0^2 \quad (13)$$

d) 定义倒数低通滤波器的有效滤波面积为在频域与滤波器边沿相切圆的面积,如图3(d)所示。设该圆半径为 $d_d = \sqrt{(u-M/2)^2 + (v-N/2)^2}$,其中 d_d 是倒数低通滤波器边沿离中心点 $(M/2, N/2)$ 最近的距离,有

$$\begin{cases} d_d = d_{\min} = \sqrt{(u-M/2)^2 + (v-N/2)^2} \\ u-M/2 = a/(v-N/2)^2 \end{cases} \quad (14)$$

令 $f(v) = d_{\min}^2$,得到

$$f(v) = a^2/(v-N/2)^4 + (v-N/2)^2 \quad (15)$$

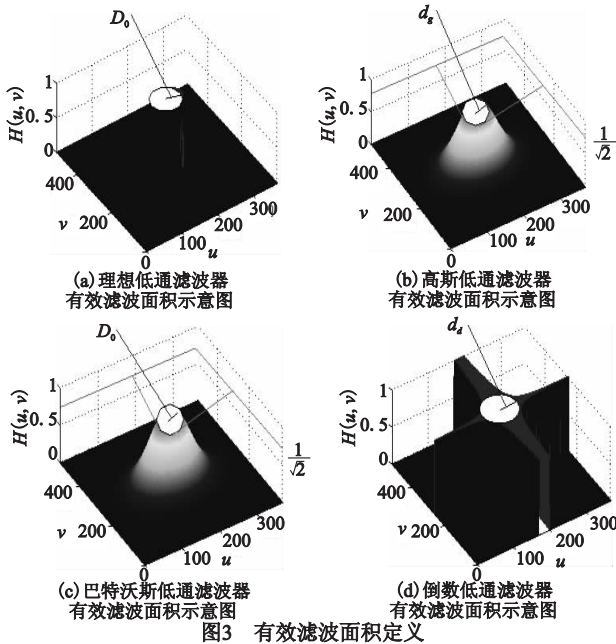
对式(15)求导得

$$f'(v) = -4a^2/(v-N/2)^5 + 2(v-N/2) \quad (16)$$

令 $f'(v) = 0$,则 $v = \sqrt[6]{2a^2} + N/2$,此时 $f(v)$ 取得最小值,即

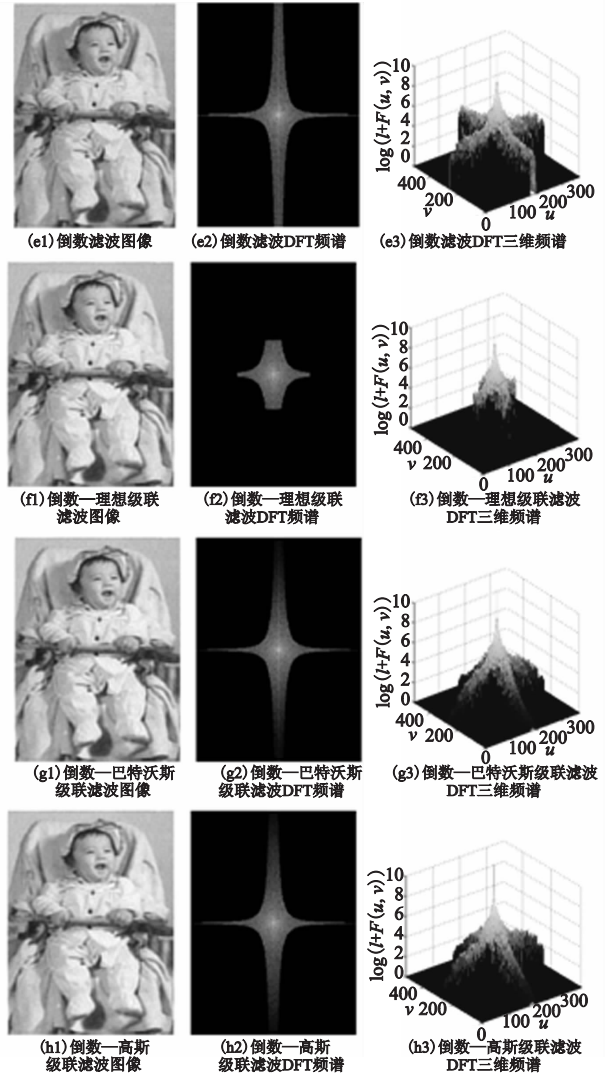
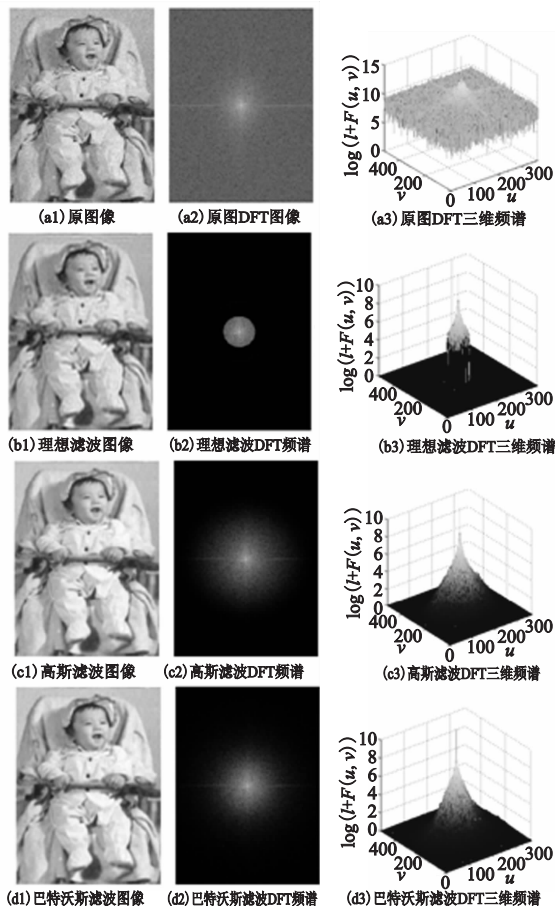
$f(v) = d_{\min}^2 = (1/\sqrt[3]{4} + \sqrt[3]{2}) \sqrt[3]{a^2}$, 所以倒数低通滤波器的有效滤波面积为

$$S_d = \pi d_d^2 = \pi (1/\sqrt[3]{4} + \sqrt[3]{2}) \sqrt[3]{a^2} = 1.89\pi \sqrt[3]{a^2} \quad (17)$$



2.2 仿真与分析

本文在单一滤波仿真中取截止频率 $D_0 = 40$, 即 $S_i = 1600\pi$, 此时 $\delta = 48, a = 2.5 \times 10^4$, 巴特沃斯低通滤波器的阶数 $n = 2$; 在二次滤波中, $D_0' = 2, D_0 = 80, \delta' = 2, \delta = 96$ 。二次滤波中增大滤波范围是为了保留图像更多的细节信息。仿真结果如图 4(a1) ~ (h3) 所示。



2.2.1 主观评价

由仿真结果图 4(a1) ~ (a3) 可以看出, 原图像由于噪声的影响出现失真而影响视觉观察。通过理想低通滤波器滤波处理的图 4(b1) ~ (b3) 虽然消除了大部分噪声, 但同时也使图像恶化变形, 这种方法不可取; 通过高斯低通滤波器滤波处理的图 4(c1) ~ (c3) 效果相对比较好, 但是图像大量细节信息丢失而出现模糊虚假, 如小孩衣领的褶皱和眉毛等; 通过巴特沃斯低通滤波器滤波处理的图 4(d1) ~ (d3) 同高斯滤波结果相似, 也具有模糊和细节丢失的问题; 单一使用本文提出的倒数低通滤波结果如图 4(e1) ~ (e3) 所示, 从图中可以看到该滤波具有一定的去噪效果, 在滤除噪声的同时保留了大量的细节信息, 图像亮度也没有出现非线性增强, 但是去噪效果不是特别理想, 所以进一步研究二次滤波。图 4(f1) ~ (h3) 分别用理想低通滤波器、巴特沃斯低通滤波器、高斯低通滤波器与倒数低通滤波器级联的仿真图, 从中可以很明显地看出, 采用倒数—高斯低通滤波级联的效果最佳。其原图像除噪声明显减少外无其他形变, 并且图像对比度相对于单一滤波或其他级联滤波都高, 直观图像更清晰, 没有出现模糊和虚假的现象。

综上所述, 本文提出的倒数—高斯级联低通滤波方法对于图像去噪有着优越的性能, 是一种优良的滤波方法。

2.2.2 客观评价

客观评价主要采用简单实用的均方误差 (MSE) 和峰值信噪比 (PSNR) 两种方法^[14]。设 $M \times N$ 大小的带噪图像为 $f(m, n)$, 处理后的图像为 $f'(m, n)$, 其中 $m = 1, 2, \dots, M; n = 1, 2, \dots, N$ 。

2, ..., N, 则其计算方法如下:

$$MSE = \frac{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N [f(m, n) - f'(m, n)]^2}{MN} \quad (18)$$

$$PSNR = 10 \lg \frac{Q^2}{\frac{1}{MN} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N [f(m, n) - f'(m, n)]^2} \quad (19)$$

其中: Q 是量化级数, 仿真中 $Q = 255$, $M = 367$, $N = 518$ 。结果如表 1 所示。

表 1 不同滤波算法得到的 MSE、PSNR 值

滤波方法	MSE	PSNR
理想低通滤波	308.143	23.243
巴特沃斯低通滤波	244.871	24.241
高斯低通滤波	233.205	24.453
倒数低通滤波	231.915	24.478
倒数—理想级联低通滤波	255.692	24.054
倒数—巴特沃斯级联低通滤波	245.413	24.232
倒数—高斯级联低通滤波	230.979	25.257

由表中参数可以清楚地看出, 本文所提的级联滤波方法均方误差 MSE 是最小的, 峰值信噪比 PSNR 是最大的, 与主观评价法所得结论相一致。

3 结束语

本文通过对频域低通滤波去噪方法的介绍与实现, 分析比较各滤波效果后, 为取得更好的滤波去噪效果, 提出了一种新的频域倒数—高斯级联低通滤波方法。另外, 在仿真比较阶段定义了一个新的滤波方法比较基准——有效滤波面积。经过仿真比较, 本文提出的倒数—高斯级联低通滤波方法在图像去噪处理中体现出优良的性能, 在图像预处理中将有很大的应用空间。

参考文献:

[1] 穆立胜, 李宗宗, 马冬冬, 等. 一种新的基于 FFT 的图像增强算法[J].

黑龙江大学自然科学学报, 2010, 27(4): 264-267.

- [2] 李恪, 王江安, 郭谊. 舰船热尾流红外图像的频域滤波增强技术[J]. 激光与红外, 2007, 37(10): 1114-1116.
- [3] 靳建峰, 李云松, 沈黎明, 等. 基于离散余弦变换的自适应图像增强[J]. 武汉大学学报: 工学版, 2009, 42(8): 532-536.
- [4] 奚吉, 赵晓铃, 张煜东. 改进的沃尔什滤波的图像插值算法[J]. 计算机工程, 2010, 36(11): 211-213.
- [5] LI Wei, PANG Qi-chang, LI Hong. Application of wavelet transform in UV image fusion[J]. Science Technology and Engineering, 2005, 5(15): 1067-1069, 1080.
- [6] HEL-OR Y, SHAKED D. A discriminative approach for wavelet denoising[J]. IEEE Trans on Image Processing, 2008, 17(4): 443-457.
- [7] 刘云鹏, 马国明, 刘肇鹏, 等. 低通滤波在紫外成像降噪处理中的应用[J]. 高压技术, 2007, 33(6): 129-132.
- [8] 高向东, 赵传敏, 白天翔, 等. 傅里叶变换在熔池图像特征提取中的应用[J]. 焊接学报, 2008, 29(8): 13-16.
- [9] 陈春宁, 王延杰. 在频域中利用同态滤波增强图像对比度[J]. 微计算机信息, 2007, 23(2): 264-266.
- [10] BUADES A. Nonlocal image and movie denoising[J]. International Journal of Computer Vision, 2008, 76(2): 123-139.
- [11] CHEN Zhi-gang. Enhancement of remote sensing image based on contourlet transform[J]. Guangxue Jingmi Gongcheng/Optics and Precision Engineering, 2008, 16(10): 2030-2037.
- [12] YOUNG S S. Alias-free image subsampling using Fourier-based windowing methods[J]. Optical Engineering, 2004, 43(4): 843-855.
- [13] 余艳梅, 罗代升. 一种基于频域滤波的图纸背景坐标网去除技术[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2008, 40(1): 144-147.
- [14] 丁绪星, 朱日宏, 李建欣. 一种静止图像质量评价指标[J]. 南京理工大学学报: 自然科学版, 2004, 28(5): 507-510.

(上接第 4766 页) ASM 的各个标记点的误差像素数比较稳定, 定位效果比传统的 ASM 更好, 尤其是脸部外轮廓部分的定位, 误差像素数比传统的低 20 多个像素点。

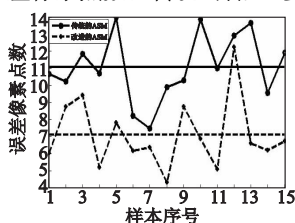


图5 姿态变化下人脸定位误差曲线对比

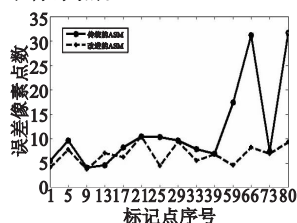


图6 部分标记点误差对比

4 结束语

作为统计建模方法中很重要的一种, ASM 在面部特征定位和人脸识别等模式识别领域中有广泛的应用。由于受到初始情况、姿态变化、光照变化等因素的影响, ASM 的性能会有所下降, 造成定位不准确。本文针对传统 ASM 在姿态变化下的特征定位不准确问题, 提出一种姿态变化下的 ASM, 通过在初始化阶段添加旋转因子 R 来初始化形状向量 b , 使初始定位更接近真实的人脸轮廓。实验结果表明, 姿态变化下的 ASM 方法能有效地解决初始化定位不准确的问题, 对有姿态变化的人脸定位更准确。

参考文献:

- [1] COOTES T F, TAYLOR C J, COOPER D H, et al. Active shape models-their training and application[J]. Computer Vision and Image Understanding, 1995, 61(1): 38-59.
- [2] LIU Qing-yan, LIU Yuan. Research on an improved active shape

models[C]//Proc of International Symposium on Intelligent Information Technology Application Workshops. 2008:401-404.

- [3] JIANG Min, XU Qin, SHANG Tao. A bottom-up method for facial feature extraction using active shape models[C]//Proc of International Workshop on Intelligent Systems and Application. 2009:1-4.
- [4] LEI Gang, LI Xiao-hua, ZHOU Ji-liu, et al. An novel dynamical multi-scale ASM for facial feature location[C]//Proc of International Workshop on Intelligent Systems and Applications. 2009:1-4.
- [5] MILBORROW S, NICOLLS F. Locating facial features with an extended active shape model[C]//Proc of European Conference on Computer Vision. 2008:504-513.
- [6] LI Zi-sheng, MAI Jun-chi, KANEKO M. Facial feature localization using statistical models and SIFT descriptors[C]//Proc of the 18th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication. 2009:961-966.
- [7] DANG Li, KONG Fan-rang. Facial feature point extraction using a new improved active shape model[C]//Proc of International Conference on Image and Signal Processing. 2010:944-948.
- [8] XIONG Peng-fei, HUANG Lei, LIU Chang-ping. Initialization and pose alignment in active shape model[C]//Proc of International Conference on Pattern Recognition. 2010:3971-3974.
- [9] 杨超, 李博文. 基于积分投影的眼睛定位系统设计[J]. 软件导刊, 2011, 10(9): 137-139.
- [10] 徐品, 童葵, 瞿静. 基于 Adaboost 算法和人眼定位的动态人脸检测[J]. 电视技术, 2011, 35(9): 114-118.
- [11] 左景龙, 孙长银, 杨万扣. 一种基于二值模式特征的人脸检测算法[J]. 科技通报, 2011, 27(5): 652-656.
- [12] 袁宝华, 王欢, 任明武. 基于完整 LBP 特征的人脸识别[J]. 计算机应用研究, 2012, 29(4): 1557-1559.
- [13] 陈恒鑫, 唐远炎, 房斌, 等. LMCP: 用于变化光照下人脸识别的 LBP 改进方法[J]. 计算机工程与应用, 2011, 47(3): 30-33.