

基于相似性约束的面部幻象在 人脸识别中的应用

廖建锋^{1,2} 王志忠^{3*}

(河南经贸职业学院 信息管理学院¹, 郑州 450002;

北京工业大学 计算机学院² 和电子信息与控制工程学院³, 北京 100022)

摘要 为了根据低分辨率(LR)人脸图像生成高分辨率(HR)图像以提高人脸识别率,设计了四个相似性约束函数,提出了基于相似性约束的面部幻象方法。首先利用 LR-LR 约束计算出输入的 LR 人脸图像与训练集中各 LR 人脸图像之间的相似性;然后利用 LR-HR 约束描述输入的 LR 人脸图像与 HR 训练图像之间的局部结构相似性,同时增强相邻幻象图像块之间的平滑约束;最后利用空间相似性约束减少远离幻象图像块的那些图像块的影响。在 FERET、Yale 及 ORL 三大通用人脸数据库上的实验结果表明,相比其它几种较为先进的面部幻象生成方法,所提方法得到的幻象图像分辨率更高,此外,所提方法得到了更高的识别率。

关键词 人脸识别 相似性约束 面部幻象 局部线性滤波 平滑约束

中图分类号 TP391.41; **文献标志码** A

受环境或设备等条件的限制,许多情况下现场照相机采集到的人脸图像的分辨率通常比较低,因此,如何将低分辨率(low resolution, LR)的人脸图像变换为高分辨率(high resolution, HR)已成为研究中很重要的问题之一^[1]。

为了有效地生成高分辨率人脸图像,近年来,学者们提出了许多方法。例如,文献[2]对基于面部幻象的学习进行了跟踪,首先介绍了一个基于面部幻象算法的概率模型,使用包含在识别决策集中的信息;受基于超分辨率框架图像的 MRF 启发,文献[3]为幻象低分辨率人脸图像提出一个二阶方法,将脸部外观分解成一个全局参数模型和一个局部马尔可夫网络模型,但是,这种概率模型存在的

主要问题是对计算负荷和内存负荷有很高的要求。不同于概率模型^[2,3],文献[4]提出了一种基于特征转换的面部幻象方法,基于主成分分析,以训练集中低分辨率人脸图像的线性组合作为输入人脸图像;文献[5]提出依靠合并带有扩展形变人脸模型的基于实例的重构方法来重构高分辨率人脸图像;基于层次张量空间表示,文献[6]提出了一种在多种方式幻象高分辨率人脸图像变换方法;受基于面部幻象方法的位置块的启发^[7],文献[8]提出一种简单的多视点面部幻象(MHF)方法,用于从单一低分辨率人脸图像产生高分辨率多视角人脸图像;文献[9]用凸优化替代了最小二乘估计,改进了文献[8]提出的方法;此外,基于流形排列,文献[10]提出依靠投影成对点从原始耦合流形到普通流形的嵌入改进面部幻象。

最近,文献[11]提出一种在离散余弦变换(DCT)域基于学习的面部幻象方法,可从单一的低分辨率人脸图像产生一个高分辨率人脸图像;为了学习目标高分辨率人脸图像的局部像素结构,文献[12]通过利用输入的低分辨率人脸图像搜索人脸数据库得到相似的高分辨率人脸图像。

2013年7月27日收到,8月14日修改 国家自然科学基金
(42069153)和河南省教育厅自然科学研究计划项目

(2011B520029)资助

第一作者简介:廖建锋(1975—),男,硕士,讲师,研究方向:人工智能、图形图像处理。

* 通信作者简介:王志忠(1970—),男,博士,副教授,研究方向:模式识别、控制工程。

基于上述分析,为了更好地将低分辨率(LR)人脸图像变换为高分辨率(HR)以提高人脸识别率,提出了一种基于相似性约束的面部幻象方法,利用基于训练LR-HR人脸图像对的局部线性滤波过程生成面部幻象,实验结果表明了所提方法的有效性。

1 方法提出

1.1 提出方法的框架

令 Z_L 和 Z_H 分别表示低分辨率训练人脸图像和高分辨率训练人脸图像,其中 Z_L 是经过一个整数因子从 Z_H 下采样得到的,若无具体说明,所提方法中的下采样因子均取4。假设 I_L 是一个输入的低分辨率人脸图像,而 I_H 表示它的幻象高分辨率人脸图像。图1给出了所提方法的整体框架,由一个线性滤波过程自动重构高分辨率人脸图像 I_H , 其中, $Z_L(i)$ 和 $Z_H(j)$ 分别为低分辨率训练人脸图像块和高分辨率训练人脸图像块, $I_L(i)$ 和 $I_H(i)$ 分别为输入低分辨率人脸图像块和虚拟的高分辨率人脸图像块。主要分为三个阶段,对于给定的低分辨率人脸图像块,如图1顶端显示的有红色轮廓线的嘴巴图像块,首先搜索一个LR-HR人脸数据库寻找预存的所有图像块;然后,在不同约束条件下测量输入图像块与每对LR-HR人脸图像块之间的相似性;最后,推断输入的低分辨率人脸图像的确切细节,从而虚拟出高分辨率图像。

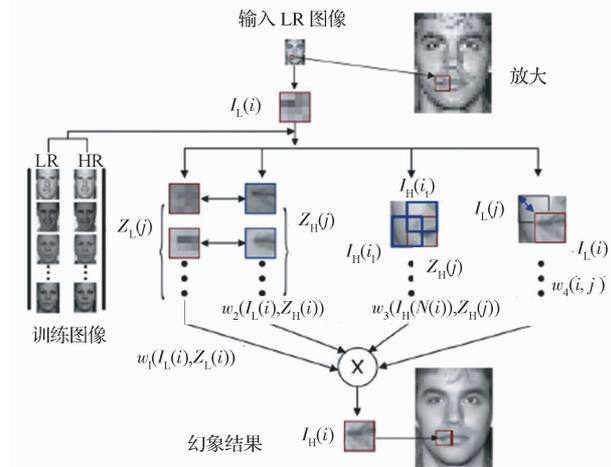


图1 所提方法的整体框架

假设每个图像均被划分为 N 个重叠等间距块,

令 \mathfrak{N} 表示成对训练 LR-HR 图像块集, i 和 j 为图像块索引,对于一个输入 LR 人脸图像块 $I_L(i)$, 研究的目的是利用训练图像块对恢复虚拟图像块 $I_H(i)$ 中丢失的高频率细节,幻象的图像块 $I_H(i)$ 定为

$$I_H(i) = \sum_{j \in \mathfrak{N}} w_{ij} (I_L, Z_L, Z_H) [Z_H(j) - \mu_{Z_H}^j] + \mu_{I_L}^i \quad (1)$$

式(1)中, $\mu_{I_L}^i$ 和 $\mu_{Z_H}^j$ 分别为输入 LR 图像块 $I_L(i)$ 和 HR 图像块 $I_H(j)$ 的平均值。第二项 $(Z_H(j) - \mu_{Z_H}^j)$ 通过减去 HR 图像块 $Z_H(j)$ 的平均值,实现归一化。 w_{ij} 定义为依赖于 I_L, Z_L 和 Z_H 的一个滤波核函数,依据它们之间的关系,取不同的约束条件构建这个核函数,表示为

$$w_{ij} = \frac{1}{C_{ij}} w_1 [I_L(i), Z_L(j)] w_2 [I_L(i), Z_H(j)] \times w_3 \{I_H[N(i)], Z_H(j)\} w_4(i, j) \quad (2)$$

式(2)中,归一化项 C_{ij} 是为了确保 w_{ij} 的总和为1。 $N(i)$ 表示图像块 i 的邻域,核函数 w 中定义了四项相似性约束:LR-LR 相似性约束 w_1 , LR-HR 相似性约束 w_2 , 平滑约束 w_3 和空间相似性约束 w_4 。

1.2 相似性约束计算

1.2.1 LR-LR 相似性约束

给定一幅 LR 训练人脸图像,预存其对应的 HR 训练图像,意味着 LR 图像中所有缺失的高频率细节都能从它的 HR 图像精确的估算出,基于这个思想,定义 LR-LR 相似性来比较取自训练集的 LR 图像块 $Z_L(j)$ 和输入图像块 $I_L(i)$ 。令 S 表示距离函数,LR-LR 相似性约束如下:

$$w_1(I_L(i), Z_L(j)) = \exp\{-\theta_1 S(I_L(i), Z_L(j))\} \quad (3)$$

式(3)中,控制参数 θ_1 用来调整相似性强度范围,也就是 θ_1 越小,两个 LR 图像块之间允许的变化越大。有明显光照变化或噪声干扰时,会影响性能,为了能够得到鲁棒性好的性能,通过减去每个图像块的平均值的方式将归一化过程纳入到距离计算中,即光照平衡过程,距离 S 可表示为

$$S(I_L(i), Z_L(j)) = \|I_L(i) - Z_L(j) + \mu_{Z_L}^j - \mu_{I_L}^i\|^l \quad (4)$$

式(4)中,操作符 $\|\cdot\|^l$ 指的是 l -范数距离。

1.2.2 LR-HR 相似性约束

定义 LR-HR 约束 w_2 来测量输入图像块 $I_L(i)$ 与 HR 图像块 $Z_H(j)$ 之间的相似性,由于 HR 图像块通常包含很多 LR 图像块缺失的高频细节,基于距离来直接比较它们的相似性较为困难。因此,提出了局部外观相似性(local appearance similarity, LAS)描述符来测量 LR 和 HR 图像块之间的相似性,该描述符是基于局部区域成对图像块的相似性生成的,如图 2 所示,其中,第一行指输入 LR 图像中的 LAS 描述符计算过程,第二行指 HR 训练图像中的 LAS 描述符计算过程。给定一个 LR 图像块 $I_L(i)$ 和一个 HR 训练图像块 $Z_H(j)$,即黄色实线标注的图像块,定义 LR-HR 约束 w_2 来测量他们之间的相似性。为了实现这个目标,在搜寻窗口(如图 2 左侧的红色窗口)分开计算图像块 i 和 j 相对于所有图像块的相似性矩阵,每个图像块最终的 LAS 描述符是按照光栅扫描顺序的矩阵元素级联,由于这个描述符是基于局部外观表示计算的,可能会从不同的解中捕捉到相似性。

令 LAS_{I_L} 和 LAS_{Z_H} 表示图像块 $I_L(i)$ 和 $Z_H(j)$ 的 $1 \times d$ 维 LAS 描述符,LR-HR 约束 w_2 定义为

$$w_2[I_L(i), Z_H(j)] = \exp\{-\theta_2 \|LAS_{I_L} - LAS_{Z_H}\|^l\} \quad (5)$$

有

$$LAS_{I_L}(k) = \exp\left\{-\frac{\|I_L(i) - I_L(k)\|^2}{\sigma_s^2}\right\};$$

$$k \in \eta_L^n(i) \quad (6)$$

$$LAS_{Z_H}(k) = \exp\left\{-\frac{\|Z_H(j) - Z_H(k)\|^2}{\sigma_s^2}\right\};$$

$$k \in \eta_H^n(j) \quad (7)$$

其中,参数 θ_2 和 σ_s 用于调整描述符相似性, $\eta_L^n(i)$ 和 $\eta_H^n(j)$ 分别表示图像块 $I_L(i)$ 和 $I_H(j)$ 的 $n \times n$ 邻域,如无特殊说明,所提方法中均设置 $n = 5$, 最终的 LAS 描述符将会是一个 25 维向量。

1.2.3 HR 平滑约束

为了求解那些与邻域有良好兼容性的相似图像块,设计了平滑约束 w_3 , w_3 可提高相邻幻象图像块的平滑约束。

由于所提方法是以光栅扫描的方式来执行面部幻象的,所以应该使幻象图像块 $I_H(i)$ 在上方和

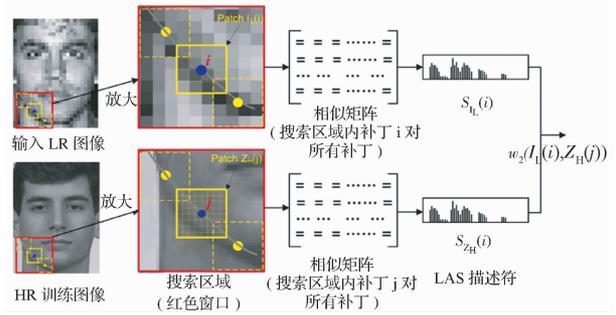


图 2 w_2 计算过程

左侧重叠区域内有良好的兼容性。令 $I_H(i_u)$ 和 $I_H(i_l)$ 分别表示相对于幻象图像块 $I_H(i)$ 上方和左侧的图像块,HR 平滑约束 w_3 可定义为

$$w_3\{I_H[N(i)], Z_H(j)\} =$$

$$\exp\{-\theta_3(\|Z_H(j) - I_H(i_u)\|_{\Delta_u}^l + \|Z_H(j) - I_H(i_l)\|_{\Delta_l}^l)\} \quad (8)$$

其中, Δ_u 和 Δ_l 分别表示成对图像块 $Z_H(j) - I_H(i_u)$ 和 $Z_H(j) - I_H(i_l)$ 上方和左侧重叠区域, θ_3 用来控制平滑变化范围。从式(8)中可以看到,平滑项 w_3 用来测量重叠区域的差异,获得相邻幻象图像块之间的平滑变化。如果设定了过大的重叠区域,那么会有模糊效果出现,相反,如果重叠区域过小,会由于较弱的平滑约束产生明显的阻断伪影。

1.2.4 空间相似性约束

对于那些远离幻象图像块 $I_H(i)$ 的图像块应该给予较小的约束,所提方法定义了一个新的约束 w_4 来计算 $Z_H(j)$ 和 $I_L(i)$ 之间的相似性,令 t_i 和 t_j 分别表示图像块 i 和 j 的坐标,则有

$$w_4(i, j) = D(i, j) \exp(-\theta_4 \|t_i - t_j\|^l) \quad (9)$$

有

$$D(i, j) = \begin{cases} 1, & \text{if } t_j \in \eta_m(t_i) \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (10)$$

其中,参数 θ_4 用来调整空间相似性, $D(i, j)$ 是空间窗口函数,由 t_i 的 $m \times m$ 领域集(如 $\eta_m(t_i)$)定义,所提方法设置 $m = 5$, 通过改善窗口 $D(i, j)$, 可以加入更多的训练图像块来执行 HR 图像块幻象。

2 实验

所有实验均在 4G 内存 Intel (R) Core (TM) 2.93GHz Windows XP 机器上完成,编程环境为

MATLAB 7.0。

2.1 参数设置

实验将所有人脸图像排列,基于三个标记位置:两个眼球中心点和嘴巴中心点;然后将原始 HR 图像裁剪为 128×96 大小,其中两眼球中心的距离固定为 40 像素,眼睛和嘴巴的垂直距离固定为 48 像素,通过下采样过程得到它对应的 32×24 大小的 LR 图像。给定一个输入 LR 图像,将其划分成许多大小为 4×4 的重叠块,重叠像素设定为 3,对应于 HR 人脸图像中的 12 个像素。使用拉普拉斯成本函数,即 $l = 1$ 来计算相似约束,式(3)、式(5)、式(8)和式(9)中定义四个控制参数分别设置为 $\theta_1 = 0.1$ 、 $\theta_2 = 50$ 、 $\theta_3 = 0.05$,从经验研究看这些参数会产生良好的性能,为了处理可能的排列误差,简单的设置 $\theta_4 = 0$ 来均匀地对待相邻块的空间影响。

2.2 高分辨率图像生成

首先在取自 FERET 人脸数据库^[13]的大量人脸图像上执行实验评估,选择 873 个人的约 1200 张图像作为训练图像,227 个人的 300 张图像作为测试图像,注意训练图像和测试图像使用的是不同人的图像,如图 3 所示为 FERET 人脸库上的人脸图像示例。



图 3 FERET 库中的人脸图像示例

实验将所提方法与其它先进的方法进行比较,包括通用的双三次插值^[2]及文献[3,4,7,11]提出的方法,实验结果如图 4 所示,其中,第 1 列:输入的 LR 人脸图像,第 2 列:双三次插值方法得到的结果,第 3 列:文献[3]方法得到的结果,第 4 列:文献[4]方法得到的结果,第 5 列:文献[7]方法得到的结果,第 6 列:文献[11]方法得到的结果,第 7 列:本文所提方法得到的结果,最后一列:输入的原始 HR 人脸图像。



图 4 各方法得到的图像变换结果

从图 4 可以看出,双三次插值算法会产生明显的模糊和锯齿效果,文献[4]提出方法的结果受幻象 HR 人脸图像噪声问题影响,文献[3]提出方法的结果也存在模糊问题,文献[11]中的算法能为幻象人脸图像得到较好的视觉质量,本文所提方法结果对大部分幻象人脸图像都有良好的视觉质量。为了强调差异,图 5 给出两个放大结果,即图 4 中第三行人脸图像的眼睛和嘴巴区域。

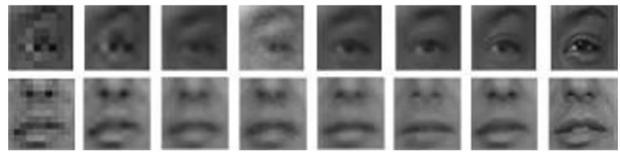


图 5 眼睛、嘴巴放大后的效果(图 4 中第三行)

从图 5 明显可以看出,相比现存的方法,本文所提方法能在眼睑和嘴巴处恢复更多的细节。

2.3 识别率比较

为了更好地体现所提方法的优越性,将所提的基于相似性约束的面部幻象运用到实际的人脸识别问题中,实验使用了 Yale^[14]及 ORL^[15]人脸数据库。

Yale 人脸库包含了 15 个人的 165 张人脸,每人 11 张,包括了不同光照条件(灯光往左照射、往右照射、往中间照射),不同的面部表情(正常的、开心的、沮丧的、睡着的、惊讶的以及眨眼的),不同场景的(戴眼镜的和不戴眼镜的),如图 6 所示为 Yale 人脸库中一个人的 11 副具有不同特征的人脸图像。

ORL 人脸库共有 40 个人的 400 张图片,每人 10 张,其中有些图像是拍摄于不同时期的,人的脸部表情和脸部细节有着不同程度的变化,如图 7 所示为 ORL 上某人的 10 张图像。

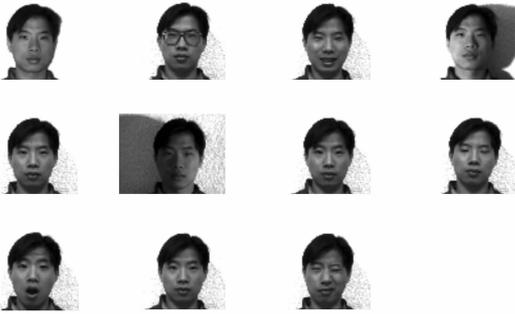


图6 Yale 人脸库中某人的 11 张人脸图像



图7 ORL 人脸库中某人的 10 张人脸图像

继续将本文所提方法与双三次插值方法^[2]及文献[3,4,7,11]提出的方法进行比较,实验选取 Yale 及 ORL 人脸库中每人的前 5 副人脸图像用于训练,剩下的图像用于测试,采用经典的 PCA 方法进行特征提取,主成分分别取 50、70、90、110、130 维,利用 K 近邻分类器完成最后的人脸分类, K 值取 1、2、3,各方法的参数设置分别参照各自所在文献,对参数的各种设置情况重复进行了大量的实验,并取得各个方法的平均识别率,结果如表 1 所示。

表 1 各方法在 Yale 上的识别率比较/%

方法	Yale	ORL
双三次插值	89.34	92.69
文献[3]的方法	90.71	93.78
文献[4]的方法	91.45	94.75
文献[7]的方法	90.41	94.22
文献[11]的方法	92.89	95.67
所提方法	94.98	98.93

从表 1 可以看出,相比其它几种方法,使用提出的方法生成高分辨率的虚拟图像可以获得更高的识别率,无论是在 Yale 还是 ORL 人脸库上,所提方法均取得了最高的识别率,因为高分辨率的训练图像更有利于后面的人脸分类。

3 结束语

为了根据低分辨率图像产生高分辨率图像以增加人脸识别率,提出了一种基于相似性约束的面部幻象方法。给定训练集,用设计的四个约束函数从大部分相似训练例子中学习缺失信息,在 FERET、Yale 及 ORL 三大人脸数据库上的实验结果表明,相比其它几种方法,所提方法能够得出更好的高分辨率图像,并且使用所提方法可以得到更高的识别率。

由于所提方法考虑了四个相似性约束,一定程度上增加了计算开销,未来会在早期的差候选项中放弃使用权重项,以降低计算复杂度,同时结合其它的技术,进一步提高所提方法的识别率。

参 考 文 献

- 1 张雪松,江 静,彭思龙. 人脸图像超分辨率的自适应流形学习方法. 计算机辅助设计与图形学学报, 2008; 20(7): 856—863
- 2 吴 炜,杨晓敏,陈 默,等. 基于 Contourlet 变换的人脸图像超分辨率技术研究. 光电子激光, 2009; (5): 694—697
- 3 Liu C, Shum H Y, Freeman W T. Face hallucination: Theory and practice. International Journal of Computer Vision, 2007; 75(1): 115—134
- 4 吴 炜,杨晓敏,陈 默,等. 一种新颖的人脸图像超分辨率技术. 光学精密工程, 2008; 16(5): 815—821
- 5 Park J S, Lee S W. An example-based face hallucination method for single-frame, low-resolution facial images. Image Processing, IEEE Transactions on, 2008; 17(10): 1806—1816
- 6 郑丽贤,吴 炜,杨晓敏,等. 基于多分辨率塔式结构的幻觉脸技术的研究. 光电子激光, 2008; 19(9): 1244—1249
- 7 Ma X, Zhang J, Qi C. Hallucinating face by position-patch. Pattern Recognition, 2010; 43(6): 2224—2236
- 8 Li B, Chang H, Shan S, et al. Aligning coupled manifolds for face hallucination. Signal Processing Letters, IEEE, 2009; 16(11): 957—960
- 9 Ma X, Huang H, Wang S, et al. A simple approach to multiview face hallucination. Signal Processing Letters, IEEE, 2010; 17(6): 579—582
- 10 Jung C, Jiao L, Liu B, et al. Position-patch based face hallucination using convex optimization. Signal Processing Letters, IEEE, 2011; 18(6): 367—370
- 11 Zhang W, Cham W K. Hallucinating face in the DCT domain. Image Processing, IEEE Transactions on, 2011; 20(10):

- 2769—2779
- 12 Hu Y, Lam K M, Qiu G, *et al.* From local pixel structure to global image super-resolution: A new face hallucination framework. *Image Processing, IEEE Transactions on*, 2011; 20(2): 433—445
- 13 黄 璞, 唐振民. 最小距离鉴别投影及其在人脸识别中的应用. *中国图象图形学报*, 2013; 18(002): 201—206
- 14 张 强, 戚 春, 蔡云泽. 基于判别改进局部切空间排列特征融合的人脸识别方法. *电子与信息学报*, 2012; 34(10): 2396—2401
- 15 王科俊, 邹国锋. 基于子模式的 Gabor 特征融合的单样本人脸识别. *模式识别与人工智能*, 2013; 26(1): 50—56

Face HallucinationBased on Similarity Constraints for Face Recognition

LIAO Jian-feng^{1, 2}, WANG Zhi-zhong^{3*}

(Department of Information Management¹, Henan Economy and Trade Vocational College, Zhengzhou 450046, P. R. China;
School of Computer Science² and School of Electronic Information and Control Engineering³,
Beijing University of Technology, Beijing 100022, P. R. China)

[**Abstract**] To generate high resolution image by low resolution face image so as to improving recognition accuracy, four similarity constraint functions are designed, based which face hallucination based on similarity constraints is proposed. Firstly, LR-LR constraint is used to compute similarity between inputted LR face image and that in training sets. Then, LR-HR constraint is used to describe local structure similarity between LR face image and HR training images, and slider constraint within neighboring hallucination image blocks. Finally, the spatial similarity constraint is used to reduce effect of image block away from those image blocks. Experimental results on FERET, Yale and ORL show that proposed method has hallucination image with higher resolution and get better face recognition accuracy than several advanced face hallucination approaches.

[**Key words**] face recognition similarity constraints face hallucination local linear filtering slider constraint