

基于亚像素块匹配和字典学习的超分辨率算法

徐煜明^{1,2} 宋佳伟² 肖贤建¹

(常州工学院计算机信息工程学院 常州 213002)¹ (河海大学计算机与信息学院 南京 211100)²

摘要 针对基于字典学习算法的计算效率低,且大多局限于处理单帧图像的问题,提出了一种基于亚像素块匹配和字典学习的超分辨率算法,实现对多帧图像的重构。采用亚像素块匹配方法对图像进行配准,依据配准结果构造低分辨率字典,并通过计算辅助图像块与目标图像块的相似度来选择用于重构的图像块。在 Matlab 平台上,将该算法用于静态图像和视频图像处理,获得了较好的重构效果。

关键词 超分辨率,稀疏编码,亚像素块匹配,字典学习

中图分类号 TP301.6 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2016.8.062

Super Resolution Algorithm Based on Sub-pixel Block Matching and Dictionary Learning

XU Yu-ming^{1,2} SONG Jia-wei² XIAO Xian-jian¹

(School of Information and Engineering, Changzhou Institute of Technology, Changzhou 213002, China)¹

(College of Computer and Information, Hohai University, Nanjing 211100, China)²

Abstract For algorithms based on dictionary learning have low computational efficiency and are limited to single frame image reconstruction, a super resolution algorithm based on sub-pixel block matching and dictionary learning was introduced to realize the reconstruction of multiple-frame images. Firstly, the image registration is realized by sub-pixel block matching, then the low-resolution dictionary is constructed according to the result of registration to reduce the amount of calculation, and the patches for reconstruction are selected by calculating the degree of similarity between object image and auxiliary image. The algorithm is proved to achieve better reconstruction when used in still and motion image on MATLAB platform.

Keywords Super resolution, Sparse coding, Sub-pixel block matching, Dictionary learning

1 引言

利用超分辨率技术可以从低分辨率的图像重构出高分辨率的图像。视频设备的快速发展,使得对超分辨率技术的需求越来越大^[1,2],因而其受到学者的关注。与简单的插值方法相比,超分辨率技术充分利用了高低分辨率图像在结构和关系上的先验知识。文献[3]采用马尔科夫随机场模型来表示高低分辨图像像素间的关系,这种方法能获得较好的效果,但需要很大的计算量。Freeman 提出了一种基于邻域插入的方法^[4],Yang 提出了一种基于稀疏表示的超分辨率方法并对其进行了改进^[5,6],Lu 等提出了基于稀疏表示和几何字典的算法,但这些算法都局限于对单帧图像的重构。

本文提出了一种基于亚像素块匹配和字典学习的超分辨率算法,并将其用于多帧图像的重构。该算法使用亚像素块匹配的方法^[7]对图像序列进行配准,通过匹配结果对低分辨率字典进行构造,同时可以选择相似度好的图像块用于图像重构,从而获得比单帧图像更多的有用信息。

2 超分辨率相关理论

2.1 图像观测模型

设 X 和 Y 分别表示 HR 图像和 LR 图像,根据超分辨率的一般表达式,其关系可以表示为:

$$Y = SHWX + \epsilon \quad (1)$$

其中, W 和 H 分别为变形矩阵和模糊矩阵, S 表示下采样因子, ϵ 为加性噪声^[8]。在多帧图像的超分辨率中,假定有 N 个低分辨率图像 Y_1, Y_2, \dots, Y_N , 从中选择一个目标图像 Y_t , 通过超分辨率方法输出的图像即为 Y_t 对应的高分辨率图像, 其余观测图像作为辅助图像。为了不失一般性, t 的取值应为 $1, 2, \dots, N$ 。低分辨率图像和高分辨图像的关系可以表示为:

$$Y_j = S_j H_j W_j X + \epsilon_j, j = 1, \dots, N \quad (2)$$

其中,对于所有的 $j \in \{1, \dots, N\}$, 为方便分析,假设 $H_j = H$, $S_j = S$ 。在多帧图像的超分辨率重构中,设 X 表示需要重构的高分辨率图像, x 表示从 X 中提取的图像块, Y_1, Y_2, \dots, Y_N 表示低分辨率图像, y_1, y_2, \dots, y_N 表示相应的低分辨率图像

到稿日期:2015-07-01 返修日期:2015-10-19 本文受国家自然科学基金:基于仿生视觉感知机理的金属板带表面缺陷在线检测方法研究(61273170)资助。

徐煜明(1962—),男,教授,硕士生导师,主要研究方向为智能信息处理、计算机应用,E-mail: xuyms@126.com;宋佳伟(1989—),男,硕士生,主要研究方向为图像处理、计算机视觉;肖贤建(1974—),男,博士,副教授,主要研究方向为无线传感网、视频图像处理。

块,那么需要解决的优化问题即为:

$$\text{minimize } \|\tilde{D}_i \alpha - \tilde{y}\|_2^2 + \gamma \|\alpha\|_1 \text{ with } \tilde{D}_i = \begin{bmatrix} D_{i1} \\ \dots \\ D_{iN} \end{bmatrix},$$

$$\tilde{y} = \begin{bmatrix} y_1 \\ \dots \\ y_N \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中, y_1 和 D_{i1} 可以通过与单帧图像同样的处理方法得到提取和重构,其余 $N-1$ 个图像块和字典也以同样的方式处理获取^[9,10]。

2.2 块匹配

在多帧图像的超分辨率重构中,准确的运动估计对于获取高质量的图像至关重要。图像配准不仅要识别观测图像之间的相对位移,还要对式(2)中的 W_1, \dots, W_N 进行估计。目前已经有很多运动估计方法,本文采用块匹配的方法来估计图像之间的亚像素位移^[11]。假设图像块之间的位置关系可以通过平移来表示,通过估计图像之间的亚像素位移可以对分辨率的增强起到较好的效果。本文采用两个参数同时进行相似插值,可以在保证计算效率的同时保持准确率。通过块匹配方法可以计算目标图像 y_i 和辅助图像 y_j 之间的相似度,如式(4)所示^[12]:

$$\text{sim}(y_i, y_j) = \frac{y_i^T y_j}{|y_i|_2 \times |y_j|_2} \in [0, 1] \quad (4)$$

该指标用来判断从辅助图像中提取的图像块是否适合于 HR 图像重建。

2.3 稀疏编码

假设 $D = [d_1, d_2, \dots, d_k] \in R^{p \times k}$ 是一个包含 k 个原子的字典, $\alpha \in R^k$ 是信号 $s \in R^p$ 的稀疏表示,那么 L_0 范式稀疏编码可以表示为^[13]:

$$\min \|\alpha\|_0 \text{ subject to } \|D\alpha - s\|_2^2 \leq \epsilon \quad (5)$$

其中, ϵ 表示允许的误差。

给定一个字典 D , L_0 范式最小化是一个 NP 难题,可以将其转换为 L_1 范式最小化问题来求解,如式(6)所示^[14]:

$$\min \|\alpha\|_1 \text{ subject to } \|D\alpha - s\|_2^2 \leq \epsilon \quad (6)$$

在稀疏表示中,字典 D 的构造至关重要。代表性的字典学习方法有基于矢量量化的 MOD 方法以及基于 k -均值聚类 and 奇异值分解的 K-SVD 方法^[15,16],本文采用文献[17]中的方法。

3 基于亚像素块匹配和字典学习的超分辨率算法

在多帧的情况下,每个低分辨率图像可以看作是同一高分辨率图像经过不同变换得到的,通过多帧观测图像,可以提取更多的有用信息来达到更好的效果。本文算法的一个重要特征是考虑了亚像素精度的图像配准,以下对该算法的基本思想和实现过程作详细的分析。

3.1 基本原理

本文算法通过亚像素块匹配的方法对观测图像间的相对位移作出估计,以生成堆叠的低分辨率字典 \tilde{D}_i 和观测向量 \tilde{y} 。图 1 用水平轴和垂直轴分别代表图像的位置和亮度值,直观地展示了亚像素位移的采样过程。图 1(g)、图 1(h)、图 1(i)

分别表示给定的 N 个低分辨率观测图像,图 1(d)、图 1(e)、图 1(f) 分别表示其对应的高分辨率图像,这些高、低分辨率图像都由连续图像图 1(a)、图 1(b)、图 1(c) 采样而得。图中,实线箭头表示图像降质的过程,虚线箭头表示生成原子的过程,虚线则描述了亚像素精度的位置关系。

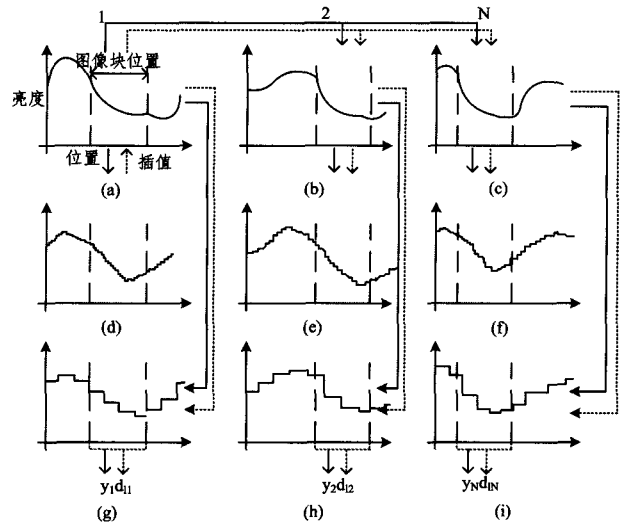


图 1 亚像素位移采样图

低分辨率观测图像 Y_1, Y_2, \dots, Y_N 可以看作由连续图像降质而得,通过亚像素块匹配的方法对观测图像间的位移进行估计,可以获得图像块 y_1, y_2, \dots, y_N 。假设图 1(d) 中的信号表示一个高分辨率原子,那么可以通过对其插值来估计连续图像图 1(a),并且通过对连续图像进行平移得到连续图像图 1(b) 和图 1(c)。实际操作中,通过对图 1(d) 中的高分辨率原子进行插值、平移操作,可以计算得到图 1(e) 和图 1(f) 中的高分辨率原子,通过对图 1(b) 和图 1(c) 进行降质可以得到低分辨率图像图 1(h) 和图 1(i)。

3.2 实现过程

观测向量 \tilde{y} 和低分辨率字典 \tilde{D}_i 的生成过程是本文算法的重要组成部分,图 2 给出了堆叠的观测向量 \tilde{y} 的生成过程。

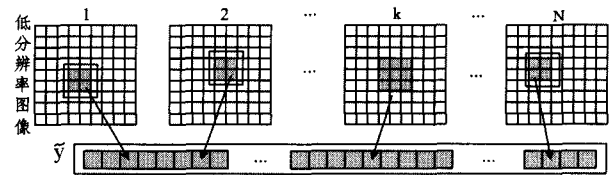


图 2 观测向量 \tilde{y} 的生成过程

通过对低分辨率图像进行分块可以得到 y_1, y_2, \dots, y_N , 观测向量 \tilde{y} 即由这些像素堆叠而成。

$$\tilde{y} = \begin{bmatrix} y_1 \\ \dots \\ y_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_1 Y_1 \\ \dots \\ C_N Y_N \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中, $C_j \in R^{q_j \times p_j}$ ($j=1, \dots, N$) 表示裁剪因子,用来把低分辨率图像中的像素提取到观测向量 \tilde{y} 中。由式(3)可知,低分辨率字典 \tilde{D}_i 由字典 D_{ij} ($j=1, \dots, N$) 组成,由于高分辨率字典 D_{ij} 已知,在高分辨率图像块中,将 D_{ij} 中的每个原子嵌入到目标位置,通过降质处理,就可以得到相应的低分辨率原子。

对于 (x, y) 处的亮度值,假设 $u_1 = \lfloor x \rfloor, u_2 = \lfloor y \rfloor, v_1 = x - u_1, v_2 = y - u_2$,那么在 (x, y) 处的亮度值可以用式(8)表示^[18]:

$$X(x, y) = [1 - v_1 \quad v_1] \begin{bmatrix} X[u_1, u_2] & X[u_1 + 1, u_2] \\ X[u_1, u_2 + 1] & X[u_1 + 1, u_2 + 1] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 - v_2 \\ v_2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

为了获取形变算子 W ,需要计算4个像素级偏差矩阵的加权总和,设 $w_1, w_2 \in N$ 表示水平和垂直位移,那么形变算子 W 可以用式(9)来表示:

$$W = (1 - v_1)(1 - v_2)W_{[w_1, w_2]} + (1 - v_1)v_2W_{[w_1 + 1, w_2]} + v_1(1 - v_2)W_{[w_1, w_2 + 1]} + v_1v_2W_{[w_1 + 1, w_2 + 1]} \quad (9)$$

图3展示了生成堆叠的低分辨率字典 \bar{D}_l 的过程。对于高分辨率字典 D_h 中的每个原子,可以通过上述方法获取其在低分辨率图像中的表示 \bar{d}_l ,从而求得低分辨率字典 \bar{D}_l 。若用一个嵌入算子 $R \in R^{p_h \times q_h}$ 来表示在目标图像块的位置嵌入一个高分辨率原子,那么低分辨率字典 \bar{D}_l 可以表示为:

$$\bar{D}_l = \begin{bmatrix} D_{l1} \\ \dots \\ D_{lN} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_1 SHW_1 RD_h \\ \dots \\ C_N SHW_N RD_h \end{bmatrix} \quad (10)$$

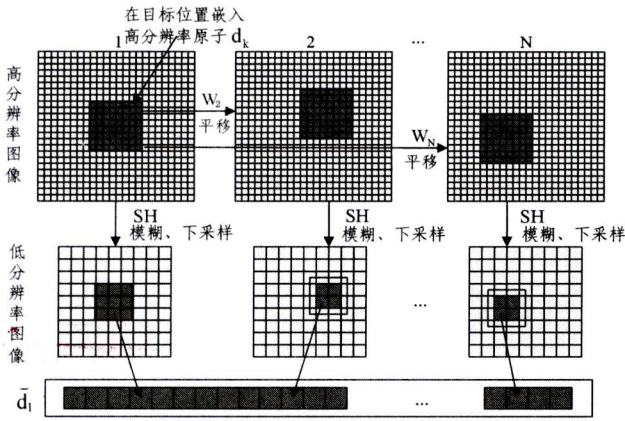


图3 低分辨率字典 \bar{D}_l 的生成过程

本文算法的具体步骤如算法1所示。首先,从 N 个观测图像中任意选择一个目标图像,简单起见,选择第一个图像作为目标图像,算法的输出即为目标图像 Y_1 的高分辨率图像。算法主体分为两个阶段,分别是超分辨率重构和后续处理阶段。

算法1 基于亚像素块匹配和字典学习的超分辨率算法
输入:低分辨率图像 Y_1, Y_2, \dots, Y_N , HR字典 D_h , 阈值 $\delta \in [0, 1]$

(超分辨率重构阶段)

选择目标图像(例如 Y_1)

for 图像块 y do

步骤1 进行块匹配,并根据阈值 δ 选择信息块

步骤2 构造 \bar{y}, \bar{D}_l

步骤3 进行稀疏编码

$m \leftarrow \text{weighted mean}(\bar{y})$

$\bar{y} \leftarrow \bar{y} - m$

$\alpha \leftarrow \text{SparseCoding}(\bar{D}_l, \bar{y})$

步骤4 重构

• 306 •

$x \leftarrow D_h \alpha + m$

end for

由全部图像块 x 重构出 X_0

(后续处理阶段)

repeat

$X \leftarrow X - v[H^T S^T(SHX - Y) + c(X - X_0)]$

until 收敛

(1)超分辨率重构阶段

首先从目标图像 Y_1 中提取出图像块 y_1 ,然后通过块匹配方法,对由低分辨率图像 $Y_j (j = 2, \dots, N)$ 提取得到的图像块之间的相对位移作出估计,根据配准结果对低分辨率字典 D_l 进行构造(如图3所示)。对于低分辨率图像 $Y_j (j = 2, \dots, N)$,如果其中没有图像块的相似度高于预定的阈值,则不使用该低分辨率图像。接着由字典 D_l 得到 \bar{y}_l 的稀疏表示,通过稀疏编码得到对系数 α 的估计。最后由字典 D_h 和系数 α ,可以求得高分辨率图像块 x 。

(2)后续处理阶段

由于噪声和分块处理的影响,目标图像 Y_l 和 X 并不一定满足式(1),因此本文在后续处理中采用反向投影来使其保持前后的一致性。设 X_0 为获得的高分辨率图像,为了使 X_0 和高分辨率图像间的差异最小,需要通过梯度法解决以下最小化问题^[19]:

$$\text{minimize } \|SHX - Y\|_2^2 + c \|X - X_0\|_2^2 \quad (11)$$

其中, c 为平衡参数。梯度法可以表示为:

$$X_{t+1} = X_t - v[H^T S^T(SHX - Y) + c(X - X_0)] \quad (12)$$

其中, v 为步长参数, $v > 0$ 。

4 实验结果与分析

(1)实验一:静态图像的重构

在静态图像的重构实验中,通过对高分辨率图像进行平移和降质的操作来获取低分辨率观测图像。在本实验中,采用的低分辨率观测图像的数量设为5,放大倍数设为2,水平和垂直方向上的平移随机取值于 $[-5, 5]$ 的均匀分布,采用均值为0、方差为1的高斯核函数对图像进行模糊处理,下采样倍数设为2,噪声为均值为0、方差为2的高斯噪声。

实验中,将本文算法与其他3种算法进行了比较,第一种是双三次插值算法,第二种是Yang提出的基于稀疏表示的单帧图像重构算法^[6],第三种是Wang提出的基于联合字典的多帧图像重构算法^[19]。对于双三次插值和Yang的算法,只通过目标图像来重构高分辨率图像;而对于Wang的算法和本文算法,则使用包括目标图像在内的5个低分辨率图像进行重构。表1给出了本实验中需要用到的参数值。

表1 实验所需的参数值

参数	值
稀疏约束系数 η	0.05
字典的原子数目 m	512
高分辨率图像块的大小 q_h	15 * 15
阈值 δ	0
平衡参数 c	0.0001
步长 v	0.001

实验中,使用分辨率为 $256 * 256$ 的图像Lena、House、Cameraman、Baboon、Peppers进行超分辨率重建,通过主观视

觉以及 PSNR、SSIM 值的比较,对各种算法的重构效果进行评价。图 4 给出了测试图 Lena 的重构效果图。其中图 4(a)为低分辨率输入图像,图 4(b)为用双三次插值法重构出的图像,图 4(c)为用 Yang 算法重构的图像,图 4(d)为通过 Wang 算法重构而得的图像,图 4(e)为本文算法恢复的图像,图 4(f)为原始高分辨率图像。

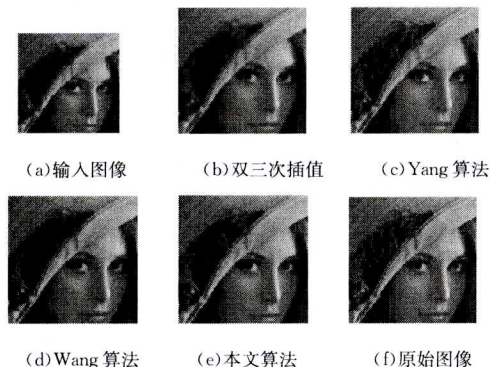


图 4 测试图 Lena 的重构效果图

表 2 和表 3 分别给出了不同算法得到的 PSNR 值以及不同算法的平均耗时。

表 2 不同算法获得的 PSNR 值比较

图像	双三次插值	Yang 算法	Wang 算法	本文算法
Lena	30.712	31.840	32.267	32.813
Cameraman	28.871	30.293	30.726	31.259
House	29.782	30.691	31.160	31.604
Baboon	31.941	32.437	33.183	33.361
Peppers	30.696	31.320	31.952	32.287

表 3 不同算法的平均耗时(s)

算法	双三次插值	Yang 算法	Wang 算法	本文算法
平均耗时	2.65	78.31	206.17	93.28

(2)实验二:视频图像的重构

本实验中,为了模拟本文算法对于实际动态图像的重构效果,从视频中提取出连续的 5 帧图像,然后将其处理成低分辨率观测图像进行仿真实验,处理方法与静态图像实验中的方法相同。在本实验中,把 5 张连续低分辨率图像的第一张作为目标图像,其余图像作为辅助图像。除了阈值 δ 外,本实验所使用的参数均与表 1 中相同。本实验中,将阈值 δ 的值分别设为 0.003 和 0.001 进行实验。当 $\delta=0.003$ 时,辅助图像中与目标图像块具有较高相似度的图像块才被用于超分辨率重构,而当 $\delta=0.001$ 时,低分辨率图像序列中的大部分图像块都用于超分辨率重构。

图 5 给出了 MacArthur 的重构效果图。

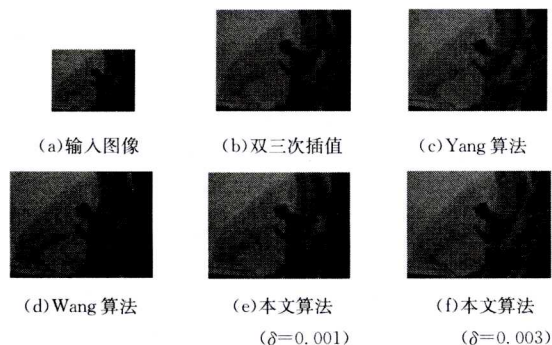


图 5 MacArthur 的重构效果图

表 4 比较了不同算法间的 PSNR 值。

表 4 不同算法获得的 PSNR 值比较

视频图像	双三次插值	Yang 算法	Wang 算法	本文算法 ($\delta=0.001$)	本文算法 ($\delta=0.003$)
MacArthur	30.490	31.701	32.251	32.693	32.827
Foreman	29.513	30.628	31.230	31.582	31.761

由重构效果图以及表 4 中的数据可以看出,本文算法与其他几种算法相比,恢复的图像在细节和纹理处更加清晰,重构效果较好。对于不同相似度阈值的选择,由表 4 中数据可以看出 $\delta=0.003$ 时比 $\delta=0.001$ 时得到的 PSNR 值高出 0.2dB 左右,可见选择与目标图像块相似度更高的图像块进行重构可以获得更好的重构效果。

结束语 本文提出了一种基于亚像素精度块匹配和字典学习的多帧图像重构算法,在超分辨率重构阶段运用亚像素精度块匹配的方法估计图像块的相对位移,从而生成低分辨率字典;在后续处理阶段使用梯度法得到最优的解,使得重构的高分辨率图像最优。实验证明,与其它算法相比,该算法得到的 PSNR 值有较明显的提高,重构效果较好。

参考文献

- [1] Pu Jian, Zhang Jun-ping, Huang Hua. A survey of super resolution algorithms [J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2009, 39 (1): 27-32 (in Chinese)
- [2] 浦剑, 张军平, 黄华. 超分辨率算法研究综述 [J]. 山东大学学报 (工学版), 2009, 39(1): 27-32
- [3] Tian J, Ma K K. A survey on super-resolution imaging [J]. Signal Image & Video Processing, 2011, 5(3): 329-342
- [4] Katsuki T, Torii A, Inoue M. Posterior Mean Super-resolution with a Causal Gaussian Markov Random Field Prior [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2011, 21(7): 3182-3193
- [5] Freeman W T, Jones T R, Pasztor E C. Example-based super-resolution [J]. Computer Graphics & Applications IEEE, 2002, 22(2): 56-65
- [6] Yang J, Wright J, Huang T. Image super-resolution as sparse representation of raw image patches [C] // IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2008 (CVPR 2008). IEEE, 2008: 1-8
- [7] Yang J, Wright J, Huang T, et al. Image super-resolution via sparse representation [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2010, 19(11): 2861-2873
- [8] Sun Yan-yue, He Xiao-hai, Song Hai-ying, et al. A block-matching image registration algorithm for video super-resolution reconstruction [J]. Acta Automatica Sinica, 2011, 37(1): 37-43 (in Chinese)
- [9] 孙琰玥, 何小海, 宋海英, 等. 一种用于视频超分辨率重建的块匹配图像配准方法 [J]. 自动化学报, 2011, 37(1): 37-43
- [10] Farsiu S, Robinson M D, Elad M, et al. Fast and Robust Multi-Frame Super-Resolution [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2003, 13(10): 1327-1344
- [11] Lian Qiu-sheng, Zhang Wei. Image super-resolution algorithms based on representation of classified image [J]. Chinese Journal of Electronics, 2012, 40(5): 920-925 (in Chinese)
- [12] 练秋生, 张伟. 基于图像块分类稀疏表示的超分辨率重构算法 [J]. 电子学报, 2012, 40(5): 920-925
- [13] Li Min, Cheng Jian, Le Xiang, et al. super resolution based on

sparse dictionary coding [J]. Journal of Software, 2012, 23(5): 1315-1324(in Chinese)

李民,程建,乐翔,等. 稀疏字典编码的超分辨率重建[J]. 软件学报, 2012, 23(5): 1315-1324

- [11] Zhang Jin-yin, Li Bo, Yao Chun-lian. A fast sub-pixel motion estimation algorithm based on best position calculation [J]. Chinese Journal of Computers, 2005, 28(9): 1541-1548(in Chinese)
张荐尹,李波,姚春莲. 基于最优位置计算的快速亚像素运动估计[J]. 计算机学报, 2005, 28(9): 1541-1548
- [12] Shimizu M, Okutomi M. Multi-Parameter Simultaneous Estimation on Area-Based Matching[J]. International Journal of Computer Vision, 2006, 67(3): 327-342
- [13] Li Min, Li Shi-hua, Wang Fu, et al. Super-resolution based on improved sparse coding[C]// 2010 International Conference on Computer Application and System Modeling (ICCA SM 2010). IEEE, 2010, 15: 398-401
- [14] Wang Jun-hua, Huang Zhi-tao, Zhou Yi-yu, et al. Robust sparse recovery based on approximate l_0 norm [J]. Chinese Journal of Electronics, 2012, 40(6): 1185-1189(in Chinese)
王军华,黄知涛,周一宇,等. 基于近似 l_0 范数的稳健稀疏重构

算法[J]. 电子学报, 2012, 40(6): 1185-1189

- [15] Li Juan-juan, Li Xiao-hong. Super-resolution reconstruction method for single frame image based on clustering [J]. Computer Engineering, 2013, 39(7): 284-287(in Chinese)
李娟娟,李小红. 基于聚类的单帧图像超分辨率重建方法[J]. 计算机工程, 2013, 39(7): 284-287
- [16] Aharon M, Elad M, Bruckstein A. K-SVD: An Algorithm for Designing Overcomplete Dictionaries for Sparse Representation [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2006, 54(11): 4311-4322
- [17] Schölkopf B, Platt J, Hofmann T. Efficient sparse coding algorithms[C]// Nips. MIT Press, 2007: 801-808
- [18] Hong W, Chen T S. Reversible data embedding for high quality images using interpolation and reference pixel distribution mechanism[J]. Journal of Visual Communication and Image Representation, 2011, 22(2): 131-140
- [19] Wang P, Hu X, Xuan B, et al. Super Resolution Reconstruction via Multiple Frames Joint Learning [C]// 2011 International Conference on Multimedia and Signal Processing (CMSP). IEEE, 2011: 357-361

(上接第 303 页)

- [2] Boulgouris N V, Hatzinakos D, Plataniotis K N. Gait recognition: a challenging signal processing technology for biometric identification[J]. Signal Processing Magazine IEEE, 2005, 22(6): 78-90
- [3] Li L J, Gu G H, Wang C R, et al. A feature fusion gait recognition based on the combination of energy map and canonical correlation analysis[J]. Small and Micro Computer Systems, 2014, 11(11): 2558-2561(in Chinese)
李林杰,顾广华,王成儒,等. 能量图和典型相关分析相结合的特征融合步态识别[J]. 小型微型计算机系统, 2014, 11(11): 2558-2561
- [4] Xu D, Huang Y, Zeng Z, et al. Human Gait Recognition Using Patch Distribution Feature and Locality-Constrained Group Sparse Representation [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2012, 21(1): 316-326
- [5] Boulgouris N V, Chi Z X. Gait Recognition Using Radon Transform and Linear Discriminant Analysis[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2007, 16(3): 731-740
- [6] Wang K J, Yan T, Lv Z W. Feature level fusion method based on coupling metric learning and its application in gait recognition [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2013, 43(S1): 7-11(in Chinese)
王科俊,阎涛,吕卓纹. 基于耦合度量学习的特征级融合方法及在步态识别中的应用[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2013, 43(S1): 7-11
- [7] Yang Q, Xue D. Gait Recognition Based on Sparse Representation and Segmented Frame Difference Energy Image[J]. Information & Control, 2013, 42(1): 27-32
- [8] Huang D Y, Lin T W, Hu W C, et al. Gait recognition based on Gabor wavelets and modified gait energy image for human identification[J]. Journal of Electronic Imaging, 2013, 22(4): 6931-6946
- [9] Yang Q, Xue D. Gait Recognition Based on Sparse Representa-

tion and Segmented Frame Difference Energy Image[J]. Information & Control, 2013, 42(1): 27-32

- [10] Ben X Y, Zhang P, Pan T T, et al. Performance analysis of matrix gait recognition under linear interpolation framework[J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2013, 8(5): 415-425 (in Chinese)
賁峴焯,张鹏,潘婷婷,等. 线性插值框架下矩阵步态识别的性能分析[J]. 智能系统学报, 2013, 8(5): 415-425
- [11] Ma Q Y. Moment Gait Energy Image Based Human Recognition at a Distance[J]. Acta Electronica Sinica, 2012, 35(11): 2078-2082
- [12] Lin C L, Wang K J, Li Y. Behavior classification algorithm based on enhanced gait energy image and two-dimensional locality preserving projection[J]. Journal of Computer Applications, 2011, 31(3): 721-720
- [13] Liu Z Y, Feng G C, Chen W F. Gait recognition based on local two value model and recognition common vector [J]. Computer Science, 2013, 40(9): 262-265(in Chinese)
刘志勇,冯国灿,陈伟福. 基于局部二值模式和辨识共同向量的步态识别[J]. 计算机科学, 2013, 40(9): 262-265
- [14] Li P. Gait recognition method based on Haar wavelet and fusion [J]. Journal of Computer Application and Software, 2013, 30(3): 244-246(in Chinese)
李萍. 基于 Haar 小波和融合 HMM 的步态识别方法[J]. 计算机应用与软件, 2013, 30(3): 244-246
- [15] Jia J, Ruan Q. Gait recognition based on Contourlet Transform and Collaborative Representation [C]// 2014 12th International Conference on Signal Processing (ICSP). IEEE, 2014: 952-957
- [16] Liu Qing-yun, Jing Tian-tian. Survey on Hexapod Walking Robot and Gait Planning [J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2015, 29(7): 87-94(in Chinese)
刘庆运,景甜甜. 六足步行机器人及其步态规划研究进展[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2015, 29(7): 87-94