

# 校园航拍图像超分辨率重建的粒计算方法

刘宏兵<sup>1a\*</sup>, 马原<sup>2</sup>, 刁小宇<sup>1b</sup>, 郭华平<sup>1b</sup>

(1. 信阳师范学院 a. 网络信息与计算中心; b. 计算机与信息技术学院, 河南 信阳 464000;  
2. 信阳农林学院 信息工程学院, 河南 信阳 464000)

**摘要:**提出了校园航拍图像超分辨率重建的粒计算方法,包括:(1)提出了图像粒化方法,实现图像空间向粒度空间的转化;(2)设计粒之间合并运算和分解运算,构造粒之间的模糊包含关系 $\mu$ 和 $\sigma$ ,实现不同粒度空间之间的转化,获取图像的先验知识,指导校园航拍图像超分辨率重建算法的设计;(3)根据自顶向下、自底向上两种模式和图像先验知识,设计校园航拍图像超分辨率重建粒计算方法,实现粒度空间向图像空间的转化。实验验证了提出方法的可行性。

**关键词:**低分辨率图像;高分辨率图像;粒计算;超分辨率重建

中图分类号: TP391 文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Granular Computing for Super-Resolution Reconstruction of Aerial Images in Campus

LIU Hongbing<sup>1a\*</sup>, MA Yuan<sup>2</sup>, DIAO Xiaoyu<sup>1b</sup>, GUO Huaping<sup>1b</sup>

(1a. Network Information and Computing Center; b. College of Computer and Information Technology, Xinyang Normal University, Xinyang 464000, China;

2. College of Information Engineering, Xinyang Agriculture and Forestry University, Xinyang 464000, China)

**Abstract:** Granular Computing (GrC) is proposed for super-resolution reconstruction of aerial images in campus. (1) The granulation method of image is proposed to transform the image space into granularity space. (2) The join operation and the meet operation between two granules are designed for the fuzzy inclusion measure  $\mu$  and  $\sigma$  between two granules, which are used to realize the transformation between two granularity spaces with different granularities, to obtain the prior knowledge to guide the design of super-resolution reconstruction algorithms. (3) According to up-down and bottom-up computing models, the granular computing algorithms of image super-resolution reconstruction are designed to realize the transformation from granularity space to image space in terms of the prior knowledge. The proposed algorithms are verified by the experiments.

**Key words:** low-resolution image; high-resolution image; granular computing; super-resolution reconstruction

## 0 引言

航拍是远距离不接触物体而获取物体图像信息的一种技术。航拍图像作为一类重要的信息源,大大扩展了人们的观察视野及观测领域,校园航拍在校园规划、学生管理与服务等应用领域具有显著的优越性和重要性<sup>[1]</sup>。在航拍过程中,由于大气的扰动、可见光变换等因素的影响,使航拍图像变得

模糊<sup>[2]</sup>;由于系统本身存在的缺陷,使航拍图像含有噪声;由于光电器件在变换过程中的欠采样,导致航拍图像纹理细节模糊,分辨率不高。总之,航拍图像会受到多种因素的影响,不能很好地满足用户需求<sup>[3]</sup>。

提高图像或视频的分辨率是人们提取图像、分析图像、识别图像的重要手段之一<sup>[4-6]</sup>。目前人们获取高分辨率图像的方式主要有两种:一是提高成像

设备的分辨率<sup>[7]</sup>;二是根据先验知识重建低分辨率图像对应的高分辨率图像<sup>[8]</sup>.超分辨率荧光显微技术使得成像设备的成像精度可以达到纳米级水平,但其最大的缺陷在于设备成本昂贵,不能满足大众需求.因此,根据图像的先验知识,从模型和算法方面提高图像分辨率的超分辨率重建是人们获取高分辨率图像的主要手段.一方面,根据图像先验知识建立的算法便于嵌入手机、ipad 等大众化电子产品,减少高精度成像设备带来的昂贵费用;另一方面,人们通过手机获取图像的分辨率不能满足人们对图像清晰度的要求,使用超分辨率重建可以满足人们不同场景下对图像分辨率的不同需求.图像超分辨率重建就是利用一组或单幅低分辨率图像来产生单幅高分辨率图像,是超清视频和高清视频重建的基础.图像超分辨率重建广泛应用在军事侦察、公共安全、空中监视等航拍或监控领域.

本文以图像分辨率为研究对象,研究校园航拍图像的超分辨率重建问题.分辨率可分为显示分辨率与图像分辨率.显示分辨率是屏幕图像的精密密度,是指显示器所能显示的像素有多少.图像分辨率是指单位英寸中所包含的像素点数.在显示分辨率一定的情况下,图像分辨率越高,图像在显示器上显示得越清晰.校园体现以人为本的人文环境,让人能够感受到校园的自然、宁静、平和、安详.校园一般包括中心广场区、植物园区、道路、教学楼、办公楼、学生宿舍楼、食堂等,分析校园航拍图像的特征,提高校园航拍图像分辨率的超分辨率重建问题是校园监控的重要内容之一.

## 1 相关工作

国际上,最典型的图像超分辨率重建算法 LLE 将高维流型用剪刀剪成很多的小块,每一小块可以用平面代替,然后在低维空间中重新拼合出来,且要求保留各点之间的拓扑关系不变<sup>[8]</sup>.YANG 等<sup>[9]</sup>用稀疏表示重建低分辨率对应的高分辨率图像,它先由低分辨率的输入图像块求取稀疏表示系数,然后根据此系数生成对应的高分辨率图像块,最后由高分辨率块重建出整幅图像.PELEG 等<sup>[10]</sup>在低/高分辨率图像块稀疏编码的基础上,构建单幅图像超分辨率重建的统计预测模型,该模型是在计算复杂性和重建质量两个方面较好的折中.SHIN 等<sup>[11]</sup>利用离散小波变换估计重建图像在高频域的信息损失,构建了小波变换后的图像块的邻域嵌入超分辨率重建算法,取得了较好的边缘增强效果.

在基于像素补偿的超分辨率重建方面,龚健雅院士等从时空数据的异质性出发,提出了一种顾及时空异质性的缺失数据时空插值方法<sup>[12]</sup>.肖进胜等<sup>[13]</sup>针对基于插值的图像超分辨率算法造成图像边缘扩散和引入噪声的缺点,该文提出一种改进的自适应冲击滤波模型的图像超分辨率插值方法,获得更好的超分辨率结果,主观效果得到明显改善,客观指标得到一定提高.何林阳等<sup>[14]</sup>为提高航空图像的空间分辨率,提出一种基于多相组重建的超分辨率算法.融合图像间的互补信息,将多帧低分辨率图像作为图像基,参考帧分解为多相组,利用差异采样特性构建图像基与参考帧之间的多相组线性关系重建得到高分辨率图像的多项组,经图像多相分解逆变换获得融合的高分辨率图像.鉴于现有超分辨率重建方法难以突显重建影像细节信息的问题,朱红等<sup>[15]</sup>提出多尺度细节增强的遥感影像超分辨率重建模型框架,使重建影像提供更多高频细节信息,具有较好鲁棒性和普适性.

图像超分辨率重建是视频超分辨率重建的基础.为了改善无人机侦察视频质量,针对目前无人机摄像的特点,张岩等<sup>[16]</sup>提出一种无人机侦察视频超分辨率重建方法,强化了重建图像的一致性与保真度,特别是对图像边缘细节部分等效果极为明显,且处理速度更快.

在基于学习的超分辨率重建方面,李玲慧等<sup>[17]</sup>综合考虑了外部图像块之间的关联映射关系和内部图像块间的相似性,利用深度卷积神经网络学习得到的拟合系数快速地重建视频细节,提出了一种基于时空特征和神经网络的视频超分辨率重建算法,实现了视频视觉分辨率质量和细节清晰度的提升,在客观评价指标和主观视觉效果上均取得了较好的重建效果.YU 等<sup>[18]</sup>以信号处理、模式识别等理论为基础,以统计学习方法为主要技术手段,从图像超分辨率重建问题本质出发,通过学习与利用有效的先验知识,对基于实例学习和基于重构的图像超分辨率方法进行了深入研究,获得较好的重建质量,在保持清晰的图像边缘和恢复丰富的高频细节方面取得了较好的效果.GU 等<sup>[19]</sup>为了解决有限的采样能力和高分辨率图像重建需求之间的矛盾,把稀疏信号和低秩矩阵的不完全采样、高分辨率重构方法归纳在一个优化问题框架中,采样方法的不同影响采样的效率.HU 等<sup>[20]</sup>研究了图像块的特征提取方法,提出了一个基于多特征联合稀疏表示的特征提取算法.稀疏表示包含像素值、纹

理和边缘。在多特征联合优化中,用一组简单的模板处理噪声。引入稀疏权重约束机制从模板集中动态选择相关的模板,采用方差比的方法,对不同特征的权重进行自适应调整。实验结果表明,提出的算法在目标跟踪领域具有优越性。

粒计算是一种计算框架,涉及粒表示、粒运算、粒计算算法的设计等研究内容。信息粒广泛存在于我们的现实生活中,是对现实的一种抽象。信息粒化是人类处理和存储信息的一种反映,信息组织是人们提取研究对象共性的一种基本方法之一,信息粒之间的因果关系是人们发现对象之间内在联系的主要手段之一。粒计算对人类的问题求解非常重要,它通过把复杂问题划分,转化为若干较为简单的问题,通过解决多个简单问题来解决复杂问题;或把有共性的简单问题作为同一类问题研究,避免多次解决同类简单问题。总之,粒计算可以通过空间转换简化复杂问题的求解方式。

国际上,最早提出粒计算的专家是 ZADEH<sup>[21]</sup>,其称之为词计算,将粒计算与模糊逻辑进行了融合,形成了粒计算的模糊逻辑理论。QIAN等<sup>[22]</sup>以人类认知活动为中心研究粒计算,认为人们可以从不同的粒度空间认识同一事物。

在国内,张铃等<sup>[23]</sup>模仿人类思考问题的方式研究粒计算,认为:人类智能的一个公认的特点,是人们能从不相同的粒度上观察和分析同一问题。“人们不仅能在不同粒度的世界上进行问题的求解,而且能够很快地从一个粒度世界跳到另一个粒度世界,往返自如,毫无困难”,这种处理不同粒度世界的的能力,正是人类研究问题求解的智慧结晶。

本文研究航拍图像超分辨率重建的粒计算方法,其基本思路是:选取高分辨率航拍图像作为训练图像,通过下采样构造低分辨率图像,提取高分辨率图像和低分辨率图像特征信息,构造向量空间并将其转化为粒度空间;在粒度空间中,通过粒运算、粒关系,建立不同粒度空间之间转化的粒计算模型,提取训练图像的先验知识;利用图像粒化和粒计算获取的训练图像的先验知识,重建与低分辨率图像对应的高分辨率图像。

## 2 图像超分辨率重建的粒计算方法

### 2.1 构造图像粒化方法,实现图像空间向粒度空间的转化

图像粒化包括高分辨率图像(训练图像)粒化和待重建低分辨率图像粒化。高分辨率图像粒化和

通过下采样得到对应的低分辨率图像粒化用于构建粒计算模型,构建低分辨率图像和高分辨率图像之间的关系。待重建低分辨率图像粒化用于重建与低分辨率图像对应的高分辨率图像。考虑到下采样过程图像信息的丢失,在低分辨率图像的划分过程中,要充分利用高分辨率图像的信息,提取低分辨率图像粒的特征(如梯度、边缘、轮廓等),即高分辨率图像粒化和低分辨率图像粒化的特征空间不同,高分辨率图像在 YUV 空间划分,低分辨率图像在梯度空间划分,用于补偿下采样过程中的信息丢失。待重建低分辨率图像划分和训练图像的低分辨率图像的划分方法一致。

(1) 图像分块。对于 YUV 空间分辨率为  $m \times n$  高分辨率图像  $Y$ ,若重建因子为  $K$ ,利用下采样得到分辨率为  $[m/K] \times [n/K]$  的低分辨率图像  $X$ ,若低分辨率图像块的分辨率为  $P_1 \times P_2$ ,则高分辨率图像块的分辨率为  $[P_1 \times K] \times [P_2 \times K]$ 。

(2) 特征提取。对于大小为  $P_1 \times P_2$  的低分辨率图像块和重建因子  $K$ ,提取像素点的水平方向和垂直方向的一阶梯度和二阶梯度,则低分辨率图像块包含  $P_1 \times P_2 \times 4 \times 3$  个特征,即低分辨率图像块的特征向量长度为  $P_1 \times P_2 \times 4 \times 3$ ,与低分辨率图像块对应的高分辨率图像块包含  $P_1 \times P_2 \times K \times K \times 3$  个特征,即高分辨率图像块的特征向量长度为  $P_1 \times P_2 \times K \times K \times 3$ ,融合低分辨率图像块和相应高分辨率图像块的向量长度为  $P_1 \times P_2 \times 4 \times 3 + P_1 \times P_2 \times K \times K \times 3$ 。图像粒化将  $m \times n$  高分辨率图像对应的  $m \times n \times 3$  空间转化为  $P_1 \times P_2 \times K \times K \times 3$  空间,将  $[m/K] \times [n/K]$  低分辨率图像对应的  $[m/K] \times [n/K] \times 3$  空间转化为  $P_1 \times P_2 \times 4 \times 3$  空间,由于  $P_1 \ll m, P_2 \ll n$ ,所以该转化实现了高维空间向低维空间的转化。

图1 高分辨率图像和对应的低分辨率图像粒化。若  $P_1 = P_2 = 30, K = 3$ ,对于如图1(a)所示的分辨率为  $300 \times 480$  的高分辨率图像  $Y$ ,将其划分为若干如图1(b)所示分辨率为  $30 \times 30$  的高分辨率图像块,实现了 144 000 维空间向 24 300 维空间的转化,对图像1(a)下采样,得到如图1(c)所示分辨率为  $100 \times 160$  的低分辨率图像  $X$ ,利用图像粒化得到若干如图1(d)所示  $10 \times 10$  低分辨率图像块,实现 16 000 维空间向 1200 维空间的转化。

图2 是低分辨率图像块和高分辨率图像块的粒表示过程, $f_1, f_2, \dots, f_n$  是低分辨率图像块的特征,如梯度、纹理、结构等特征; $F_1, F_2, \dots, F_N$  是高分辨率图像块的特征,如图像块每个像素点的

RGB 值或 YUV 值. 低分辨率图像块和高分辨率图像块在不同的特征空间提取相应的特征, 目的是尽可能多地保留低分辨率图像块的特征, 以补偿下采

样过程的信息丢失.  $G = (f_1, f_2, \dots, f_n, F_1, F_2, \dots, F_N, 0)$  是不能再分割的原子粒, 0 是其粒度.



图 1 高分辨率图像和低分辨率图像的划分过程

Fig. 1 Partitions of high-resolution image and low-resolution image

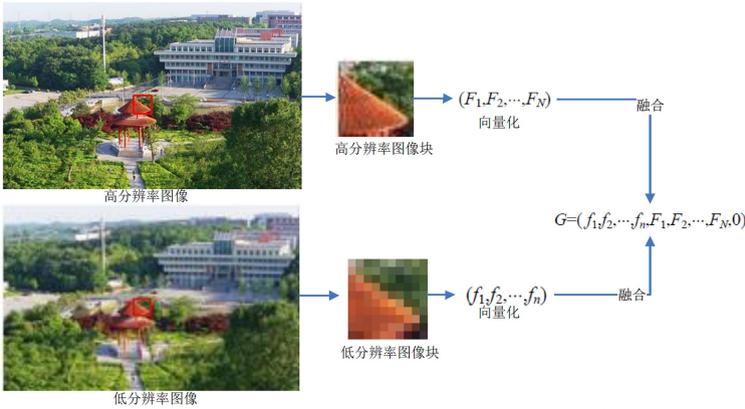


图 2 低分辨率图像块与高分辨率图像块的粒表示

Fig. 2 Granule representation of low-resolution image patch and high-resolution image patch

(3) 粒表示. 图像粒化将图像空间转化为特征向量空间, 用特征向量和粒度融合成向量的形式表示与图像块对应的粒. 现实生活中不规则形状的粒不便于研究粒运算和关系. 我们将粒表示为规则的形式, 如超菱形、超球、超正方体和超盒. 超菱形、超球、超正方形, 可以表示为向量形式  $G = (c, g_r)$ , 其中  $c$  是粒中心,  $g_r$  是粒度, 可以表示为  $g_r = \max \|c - c_i\|_p$ ,  $c_i$  为包含在粒  $G$  中的点,  $\|\cdot\|_p$  为距离测度, 不同的距离测度表示不同形状的粒,  $p = 1$  表示对应的粒为超菱形粒,  $p = 2$  表示对应的粒为超球粒,  $p = \infty$  表示为超正方形粒. 由于空间中的任何两点均可以表示为由起点和终点组成的超盒, 将粒表示为超盒  $G = [B_p, E_p, g_r]$ ,  $B_p$  为超盒的起点,  $E_p$  为超盒的终点. 图 3 是二维空间粒具有的 4 种形状.

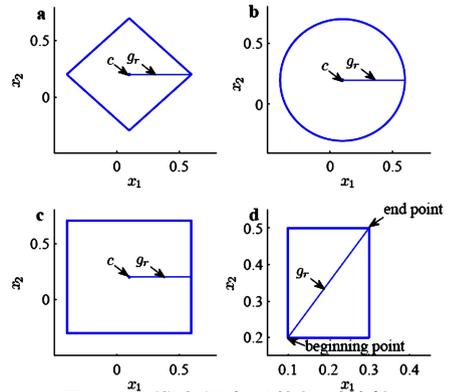


图 3 二维空间中形状规则的粒

Fig. 3 The regular granules in 2-D space

### 2.2 建立粒计算模型, 实现不同粒度空间之间的转化

对于通过图像粒化转化而来的粒度空间, 通过设计粒运算, 结合粒之间的模糊包含关系, 对粒实施有条件的合并或分解, 实现不同粒度空间之间的

转化.对于图像超分辨率重建而言,粒计算模型实现细粒度空间向粗粒度空间转化,包括粒运算、关系、关系的性质.

(1) 粒运算.粒之间的运算包括合并运算  $\vee$  与分解运算  $\wedge$ , 合并运算  $\vee$  就是将较小的两粒合并为较大的粒,用于设计自底向上的粒计算模型,分解运算  $\wedge$  就是将较大的粒分解为较小的粒,用于设计自顶向下的粒计算模型.

对于两粒  $G_1 = (C_1, r_1)$  和  $G_2 = (C_2, r_2)$ , 其合并粒为

$$G_1 \vee G_2 = \frac{1}{2}(P+Q, \|P-Q\|_2), \quad (1)$$

其中

$$P = C_1 - \frac{r_1}{\|C_{12}\|_2}, \quad Q = C_2 + \frac{r_2}{\|C_{12}\|_2},$$

$$C_{12} = C_2 - C_1.$$

图 4 显示了二维空间两超球粒  $G_1 = [0.1, 0.2, 0.05]$  和  $G_2 = [0.2, 0.15, 0.1]$  的合并超球粒.

对于超盒粒,将其表示为起点到终点的超盒,如  $N$  维空间中两个超盒粒  $G_1 = [a_1, b_1, g_{r_1}]$  和  $G_2 = [a_2, b_2, g_{r_2}]$ , 可以设计如下的合并运算  $\vee$  和分解运算  $\wedge$ :

$$G_1 \vee G_2 = [a_1 \wedge a_2, b_1 \vee b_2], \quad (2)$$

$$G_1 \wedge G_2 = \begin{cases} [a_1 \vee a_2, b_1 \wedge b_2], & \text{if } a_1 \vee a_2 \leq b_1 \wedge b_2, \\ \emptyset, & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (3)$$

其中:  $a_1 \wedge a_2 = (a_{11} \wedge a_{21}, a_{12} \wedge a_{22}, \dots, a_{1N} \wedge a_{2N})$ ,  $b_1 \vee b_2 = (b_{11} \vee b_{21}, b_{12} \vee b_{22}, \dots, b_{1N} \vee b_{2N})$ ,  $a_{ij}, b_{ij}$  都是实数.下面以二维空间说明这一事实,该方法可以推广至  $N$  维空间.

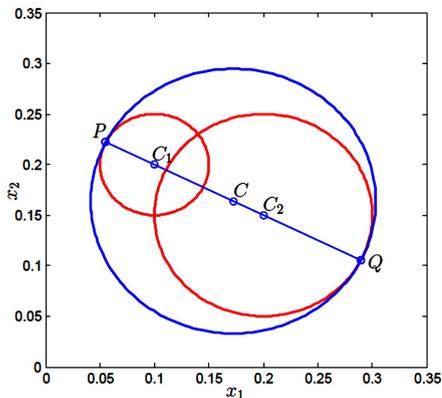


图 4 二维空间两超球粒的合并粒

Fig. 4 The united hypersphere granule of two hypersphere granules in 2-D space

$0.3, 0.4, 0.3162]$  和  $G_2 = [0.25, 0.15, 0.4, 0.5, 0.3808]$  之间的合并超盒粒  $G_1 \vee G_2 = [0.2, 0.1, 0.4, 0.5, 0.4772]$  和分解超盒粒  $G_1 \wedge G_2 = [0.25, 0.15, 0.3, 0.4, 0.255]$ .

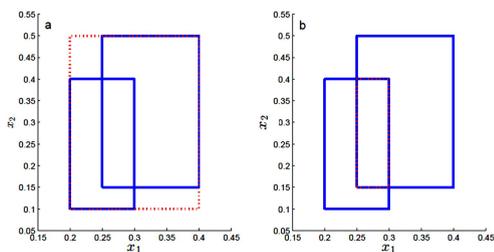


图 5 二维空间超盒粒的合并与分解过程  
(a) 超盒粒的合并; (b) 超盒粒的分解

Fig. 5 The union and decomposition of two hyperbox granules in 2-D space. (a) the union process, (b) the decomposition process

(2) 粒之间的模糊包含关系.根据粒的向量化表示方法,粒之间的关系必然涉及向量之间的关系.以超盒粒为例,超盒粒表示为起点和终点组成的向量,向量之间的关系有相等关系和不等关系(如  $\leq$ ),粒之间的关系是包含关系  $\subseteq$ , 这里  $\subseteq$  与  $\leq$  的关系如下:

$$\begin{aligned} \text{设 } G_1 &= [a_1, b_1, g_{r_1}] \text{ 和 } G_2 = [a_2, b_2, g_{r_2}], \\ G_1 \subseteq G_2 &\Leftrightarrow a_2 \leq a_1 \text{ 且 } b_1 \leq b_2. \end{aligned} \quad (4)$$

设  $[a_1, b_1]$  和  $[a_2, b_2]$  均是向量,则

$$[a_1, b_1] \leq [a_2, b_2] \Leftrightarrow a_1 \leq a_2 \text{ 且 } b_1 \leq b_2, \quad (5)$$

这里  $\leq$  和  $\subseteq$  都是偏序关系,从式(4)和式(5)可以看出,向量之间的偏序关系和粒之间的包含关系是不一致的.

为了解决这种不一致性,(1)用评价函数  $v(G)$  和保序函数  $p(G) = [\theta(a), b]$  ( $G$  是超盒粒,  $\theta(a)$  是代数系统  $\langle \mathbf{R}^N, \leq \rangle$  和其对偶系统  $\langle \mathbf{R}^N, \geq \rangle$  的同构映射)统一向量之间的偏序关系和表示为向量的粒之间的包含关系;(2)研究保序函数具有的性质,如不等式性  $G_1 \subseteq G_2$  当且仅当

$$\begin{aligned} v(G_1) &\leq v(G_2), \\ v(G_1) + v(G_2) &= v(G_1 \vee G_2) + v(G_1 \wedge G_2). \end{aligned}$$

(3)用保序函数度量超盒粒之间的模糊包含关系  $\mu$  和  $\sigma$ :

$$\mu(G_1, G_2) = \frac{v(G_2)}{v(G_1 \vee G_2)}, \quad (6)$$

$$\sigma(G_1, G_2) = \frac{v(G_1 \wedge G_2)}{v(G_1)}, \quad (7)$$

$v(G): GS \rightarrow \mathbf{R}$  是粒度空间到实数空间的映射.它们满足下述 4 个性质:

$$G \in GS, G \neq \emptyset, \sigma(G, \emptyset) = 0, \quad (8)$$

$$\sigma(G, G) = 1, \quad (9)$$

$$G_1 \subseteq G_2 \Rightarrow \sigma(G, G_1) \leq \sigma(G, G_2), \quad (10)$$

$$G_1 \wedge G_2 \subseteq G_1 \Rightarrow \sigma(G_1, G_2) < 1. \quad (11)$$

(4) 研究粒度空间的性质. 针对多幅训练图像, 构造由粒度空间( $GS$ )、模糊包含关系 $\mu$ 和 $\sigma$ 、合并运算 $\vee$ 和分解运算 $\wedge$ 组成的粒度空间 $\langle GS, \mu \rangle$ 和 $\langle GS, \sigma \rangle$ , 它们都是代数系统, 并证明它们都是模糊格. 由于粒之间传统的非此即彼的包含关系并不能完全体现人们认识研究对象的模糊性、随机性和不确定性, 本文拟利用粒之间的合并运算 $\vee$ 和分解运算 $\wedge$ 度量粒之间的模糊包含关系, 并构造粒度空间 $\langle GS, \mu \rangle$ 和 $\langle GS, \sigma \rangle$ .

对于实数集 $\mathbf{R}$ ,  $N$ 维空间 $\mathbf{R}^N$ 和由 $N$ 维空间的训练集 $S$ 诱导的粒度空间 $GS$ , 将得到如下4个定理:

**定理1** 粒度空间 $\langle \mathbf{R}, \leq \rangle$ 是格,  $\mathbf{R}$ 是一维空间,  $\leq$ 是实数之间的小于等于关系.

**定理2** 粒度空间 $\langle \mathbf{R}^N, \leq \rangle$ 是格,  $\mathbf{R}^N$ 是 $N$ 维空间,  $\leq$ 是 $N$ 维向量之间的小于等于关系,  $x \leq y \Leftrightarrow x_1 \leq y_1, x_2 \leq y_2, \dots, x_N \leq y_N$ .

**定理3** 粒度空间 $\langle GS, \subseteq \rangle$ 是格,  $\subseteq$ 是粒之间的0-1包含关系.

**定理4** 粒度空间 $\langle GS, \mu \rangle$ 和 $\langle GS, \sigma \rangle$ 都是模糊格,  $\mu$ 和 $\sigma$ 是粒之间的模糊包含关系的模糊包含度函数(式(6)和式(7)).

(5) 粒度空间转化算法. 粒之间的模糊包含关系和粒运算共同决定粒之间的合并和分解过程, 即粒的合并和分解是有条件可控的.

下面以超球粒为例说明自底向上的粒计算算法, 其他形状的粒计算算法可以按照该框架构造.  $S$ 是 $N$ 维向量空间中含有 $L$ 个图像块对应的 $L$ 个向量的训练集, 每个训练样本均是由图像粒化得到的原子粒, 通过粒之间的合并运算实现细粒度空间向粗粒度空间的转化, 粒度阈值 $\rho$ 控制粒之间的合并过程, 即粒之间的有条件合并.  $GS$ 是输出粗粒度空间.

#### 算法1: 超球粒自底向上粒计算

输入:  $N$ 维空间中含有 $L$ 个训练样本的训练集 $S$ , 粒度阈值 $\rho$

输出: 超球粒度空间 $GS$

S1. 初始化超球粒度空间 $GS = \emptyset$ ;

S2. 若 $S = \emptyset$ , 则算法停止, 输出 $GS$ ; 否则

S3. 若 $GS$ 为空, 则 $GS = \{(x_1, 0)\}$ ,  $(x_1, 0)$ 由 $S$ 中第一个样本 $x_1$ 诱导的超球粒, 从 $S$ 中删去样本 $x_1$ ; 否则

S4. 计算 $S$ 超球粒 $(x_1, 0)$ 与 $GS$ 中每个超球粒 $G_j (j=1, 2, \dots, |GS|)$ 之间的模糊包含关系 $\mu_j$ ;

S5. 找到包含超球粒 $(x_1, 0)$ 最大模糊包含关系的粒 $G_{id}$ ,  $id = \operatorname{argmax} u_j$ ;

S6. 将超球粒 $(x_1, 0)$ 与 $G_{id}$ 合并成 $G_i = (x_1, 0) \vee G_{id}$ ;

S7. 若 $G_i$ 的粒度小于粒度阈值 $\rho$ , 则更新 $G_{id} = G_i$ , 否则,  $GS = GS \cup \{(x_1, 0)\}$ ;

S8. 从 $S$ 中删去 $x_1$ , 并转向S2.

### 2.3 构建图像超分辨率重建的粒计算算法, 实现粒度空间向图像空间的转化

对于待重建图像(低分辨率图像) $X$ , 首先通过图像粒化将其转化为粒度空间 $gs$ , 通过粒度空间 $gs$ 和 $GS$ 之间的模糊包含关系, 确定与待重建图像块对应的高分辨率图像块.

下面以超球粒为例说明高分辨率图像的重建过程, 对输入低分辨率图像 $X$ 进行粒化, 构造若干低分辨率图像块, 提取低分辨率图像块的特征信息组成特征向量, 将特征向量表示为原子粒, 通过计算低分辨率图像粒化得到的粒度空间 $gs$ 的粒与训练图像通过粒计算得到的粒度空间 $GS$ 的粒之间的模糊包含度, 得到与低分辨率图像块对应的高分辨率图像块, 重建与低分辨率图像对应的高分辨率图像.

#### 算法2: 图像超分辨率的重建过程

输入: 低分辨率图像 $X$ , 超球粒度空间 $GS$

输出: 高分辨率图像 $Y$

S1. 提取 $X$ 每个图像块的特征信息组成特征向量, 并构造原子超球粒 $g$ ;

S2. 计算原子超球粒 $g$ 与超球粒度空间 $GS$ 中每个超球粒之间的模糊包含关系 $u$ ;

S3. 选取最大模糊包含关系 $u$ 对应超球粒 $G$ , 提取超球粒 $G$ 的中心, 并将其转换为高分辨率图像块;

S4. 将高分辨率图像块代替相应的低分辨率图像块, 得到高分辨率图像 $Y$ .

### 3 可行性分析

以信阳师范学院校园的航拍图像验证项目设计算法的可行性. 重建因子设为 $K=3$ , 下采样因子为 $1/K=1/3$ , 图像块的大小为 $P_1 \times P_2 = 3 \times 3$ , 采用超菱形粒的表示方法, 模糊包含度(式(7))中的 $v(g) = g_r$ , 设计自底向上的粒计算算法. 以分辨率为

400 × 1350 的航拍图像为高分辨率图像  $Y$ , 通过下采样得到相应的分辨率为 133 × 450 的低分辨率图像  $X$ , 对  $X$  进行重建得到重建高分辨率图像  $Y_i$ , 以  $Y$  与  $Y_i$  之间的误差度量重建的优劣. 训练图像和测试图像相互独立, 将航拍图像的 RGB 图像转化为 YUV 图像, 以图像的 Y 通道, 提取航拍图像的特征, 包括水平方向和垂直方向的一阶梯度、二阶梯度.

1) 随机从信阳师范学院智慧校园航拍视频中选取 34 幅航拍图像, 构造训练集  $S$ , 利用算法 1 的框架得到超球粒度空间  $GS$ ;

2) 利用算法 2 的框架得到输入图像  $X$  的高分辨率图像  $Y_i$ ;

3) 比较重建的高分辨率图像  $Y_i$  与原高分辨率图像  $Y$  之间的误差.

图 6 显示了实验结果, 图 6(b) 是原高分辨率航拍图像  $Y$ , 图 6(a) 是下采样得到的低分辨率航拍图像  $X$ , 图 6(c)-(e) 是重建的高分辨率航拍图像  $Y_i$ , 利用均方根误差 (RMSE) 度量重建高分辨率航拍图像与原高分辨率航拍图像的接近程度, RMSE 越小越好. 图 6(c) 是粒计算重建的高分辨率图像 ( $\rho = 5.2$ ), 图 6(d) 是 NNlasso 重建的高分辨率航拍图像, 图 6(e) 是双边三次插值重建的高分辨率航拍图像, 其 RMSE 值分别为 15.3065、15.3354、15.4269. 对于选定的航拍图像而言, 粒计算算法得到较好的效果.

## 4 结束语

本文提出了一种校园航拍图像超分辨率重建的粒计算模型, 将图像分割为若干图像块并表示为粒, 利用粒之间的合并算子将具有相似的图像块合并, 用合并粒建立低分辨率图像块与高分辨率图像块之间的对应关系, 对于待重建的低分辨率图像,

## 参考文献:

- [1] 陈玉臻. 试论无人机航拍画面的形式美感: 以《航拍中国》为例[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.  
CHEN Yuzhen. On the aesthetic feeling of the aerial photograph of unmanned aerial vehicle: Taking "aerial Chian" as example[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.
- [2] 张帆, 付慧, 杨刚. 低空林地航拍图像拼接的改进缝合线算法[J]. 北京林业大学学报, 2018, 40(5): 90-102.  
ZHANG Fan, FU Hui, YANG Gang. Improved optimal seamless-line algorithm of aerial image mosaic in low altitude woodland[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2018, 40(5): 90-102.
- [3] 陈苏婷, 王卓, 王奇. 基于非线性尺度空间的航拍场景分类[J]. 上海交通大学学报, 2017, 51(10): 1228-1234.  
CHEN Suting, WANG Zhuo, WANG Ji. Aerial scene classification based on nonlinear scale space[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2017, 51(10): 1228-1234.
- [4] 孔颖, 孙明轩, 陆慧娟. 多幅混合数字图像提取的迭代学习方法[J]. 小型微型计算机系统, 2017, 38(3): 584-589.  
KONG Ying, SUN Mingxuan, LU Huijuan. Iterative learning method for extraction of digital images under multi-blending[J].



图 6 重建的高分辨率航拍图像 (a) 低分辨率航拍图像, (b) 原高分辨率航拍图像, (c) 粒计算重建的高分辨率航拍图像, (d) NNlasso 重建的高分辨率航拍图像, (e) 双边三次插值重建的高分辨率航拍图像

Fig. 6 The reconstructed high-resolution aerial images. (a) The low-resolution aerial image. (b) The original high-resolution aerial image. (c) The high-resolution aerial image by GrC. (d) The high-resolution aerial image by NNlasso. (e) The high-resolution aerial image by Bicubic interpolation

利用分割成块、建立对应关系, 重建相应的高分辨率图像. 实验证明, 相对于传统的基于邻域和基于双边三次插值的图像超分辨率方法, 本文提出的校园航拍图像超分辨率重建的粒计算方法具有较小的误差. 需要进一步研究之处是相对于基于插值的图像超分辨率方法, 图像超分辨率重建的粒计算方法需要较高的计算复杂度, 主要体现在粒计算算法.

- Journal of Chinese Computer Systems, 2017, 38(3): 584-589.
- [5] 田娟秀,刘国才,谷珊珊,等.医学图像分析深度学习研究方法研究与挑战[J].自动化学报,2018, 44(3):401-424.  
TIAN Juanxiu, LIU Guocai, GU Shanshan, et al. Deep learning in medical image analysis and its challenges[J]. Acta Automatica Sinica, 2018, 44(3): 401-424.
- [6] 尚存,李国梁,马文鹏,等.一种基于 Arnold 技术的彩色图像数字水印算法研究[J].信阳师范学院学报(自然科学版), 2018, 31(3):484-488.  
SHANG Cun, LI Guoliang, MA Wenpeng, et al. Research of digital watermarking algorithm of color image watermark embedded based on Arnold transformation[J]. Journal of Xinyang Normal University (Natural Science Edition), 2018, 31(3): 484-488.
- [7] BETZIG E, PATTERSON G H, SOUGRAT R, et al. Imaging intracellular fluorescent proteins at nanometer resolution[J]. Science, 2006, 313(5793): 1642-1645.
- [8] ROWEIS S T, SAUL L K. Nonlinear dimensionality reduction by locally linear embedding[J]. Science (New York, N Y), 2000, 290(550): 2323-2326.
- [9] YANG Jianchao, WRIGHT J, HUANG T S, et al. Image super-resolution via sparse representation[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2010, 19(11): 2861-2873.
- [10] PELEG T, ELAD M. A statistical prediction model based on sparse representations for single image super-resolution[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2014, 23(6): 2569-2582.
- [11] SHIN D K, MOON Y S. Super-resolution image reconstruction using wavelet based patch and discrete wavelet transform[J]. Journal of Signal Processing Systems for Signal Image and Video Technology, 2015, 81(1): 71-81.
- [12] 樊子德,龚健雅,刘博,等.顾及时空异质性的缺失数据时空插值方法[J].测绘学报,2016, 45(4):458-465.  
FAN Zide, GONG Jianya, LIU Bo, et al. A space-time interpolation method of missing data based on spatio-temporal heterogeneity[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2016, 45(4): 458-465.
- [13] 肖进胜,饶天宇,贾茜,等.改进的自适应冲击滤波图像超分辨率插值算法[J].计算机学报,2015, 38(6):1131-1139.  
XIAO Jinsheng, RAO Tianyu, JIA Qian, et al. Interpolation algorithm based on improved adaptive shock filter in image super-resolution[J]. Chinese Journal of Computers, 2015, 38(6): 1131-1139.
- [14] 何林阳,刘晶红,李刚.基于多相组重建的航空图像超分辨率算法[J].物理学报,2015, 64(11):114201-114208.  
HE Linyang, LIU Jinghong, LI Gang. Super-resolution of aerial image by means of polyphase components reconstruction[J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(11): 114201-114208.
- [15] 朱红,宋伟东,谭海,等.多尺度细节增强的遥感影像超分辨率重建[J].测绘学报,2016, 45(9):1081-1088.  
ZHU Hong, SONG Weidong, TAN Hai, et al. Remote sensing images super resolution reconstruction based on multi-scale detail enhancement[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2016, 45(9): 1081-1088.
- [16] 张岩,李建增,李德良,等.无人机侦察视频超分辨率重建方法[J].中国图象图形学报,2016, 21(7):967-976.  
ZHANG Yan, LI Jianzeng, LI Deliang, et al. Super-resolution reconstruction for UAV video[J]. Journal of Image and Graphics, 2016, 21(7): 967-976.
- [17] 李玲慧,杜军平,梁美玉,等.基于时空特征和神经网络的视频超分辨率算法[J].北京邮电大学学报,2016, 39(4):1-6.  
LI Linghui, DU Junping, LIANG Meiyu, et al. Video super-resolution algorithm based on spatial-temporal feature and neural network[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2016, 39(4): 1-6.
- [18] YU Jifei, GAO Xinbo, TAO Dacheng, et al. A unified learning framework for single image super-resolution[J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2014, 25(4): 780-792.
- [19] GU Shuhang, ZUO Wangmeng, XIE Qi, et al. Convolutional sparse coding for image super-resolution[C]//2015 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV), 2015: 1823-1831.
- [20] HU Weiming, LI Wei, ZHANG Xiaoqin, et al. Single and multiple object tracking using a multi-feature joint sparse representation[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2015, 37(4): 816-833.
- [21] ZADEH L. Fuzzy logic= computing with words[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 1996, 4(2): 103-111.
- [22] QIAN Yuhua, CHENG Honghong, WANG Jieting, et al. Grouping granular structures in human granulation intelligence[J]. Information Sciences, 2017, 382(1): 150-169.
- [23] 张铃,张钊.模糊相容商空间与模糊子集[J].中国科学:信息科学,2011, 41(1):1-11.  
ZHANG Ling, ZHANG Bo. Fuzzy tolerance quotient spaces and fuzzy subsets[J]. Science China Information Sciences, 2011, 41(1): 1-11.