



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 103426148 A

(43) 申请公布日 2013. 12. 04

(21) 申请号 201310281916. 4

(22) 申请日 2013. 05. 10

(30) 优先权数据

12305519. 6 2012. 05. 10 EP

(71) 申请人 汤姆逊许可公司

地址 法国伊西莱穆利诺

(72) 发明人 J·萨尔瓦多 A·科查勒

M·博苏姆

(74) 专利代理机构 北京市柳沈律师事务所

11105

代理人 吕晓章

(51) Int. Cl.

G06T 5/00 (2006. 01)

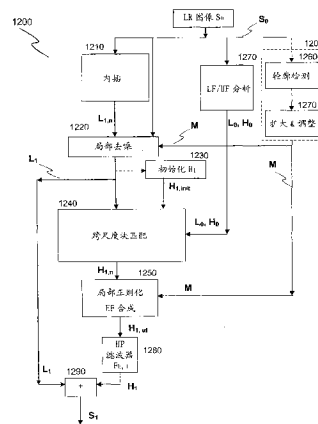
权利要求书3页 说明书17页 附图8页

(54) 发明名称

生成低分辨率输入数据结构的超分辨率版本的方法和设备

(57) 摘要

本发明涉及常规采样的多维信号的分辨率的放大中的改进的鲁棒性,其中单个低分辨率信号是可用的。这些方法被称为基于实例的超分辨率处理或单幅图像超分辨率处理。一种用于超分辨率处理单幅图像的方法,包括三个阶段。首先,对输入图像执行基于内插的放大,随后是在轮廓区域中的局部去噪步骤。所述第二阶段包括通过跨尺度块匹配外推,其中获得通过在相同的轮廓区域内的正则化去噪的外推的高频频带。所述第三阶段包括将高分辨率图像的低频频带的贡献与所述外推的高频频带相加。



1. 一种用于对数字 1D、2D 或 3D 数据的低分辨率输入数据结构 ( $S_0$ ) 执行超分辨率处理的方法,包括以下步骤:

- 检测 (F1) 低分辨率输入数据结构中可能出现混叠的一个或多个区域,并生成指示检测到的低分辨率输入数据结构中的一个或多个区域的去噪掩模 (M);

- 将输入数据结构 ( $S_0$ ) 分裂 (170,180) 成低频输入数据结构 ( $L_0$ ) 和与低频输入数据结构 ( $L_0$ ) 互补的高频输入数据结构 ( $H_0$ ),其中使用第一低通滤波器 ( $F_{1,0}$ );

- 放大 (120) 输入数据结构 ( $S_0$ ) 并通过第二低通滤波器 ( $F_{1,1}$ ) 滤波 (130) 放大的输入数据结构,其中获得低频放大数据结构 ( $L_{1,n}$ );

- 根据所述去噪掩模 (M) 局部去噪 (F2) 低频放大数据结构 ( $L_{1,n}$ ) 中的一个或多个区域,其中获得局部去噪的低频放大数据结构 ( $L_1$ );

- 通过外推高频数据结构 ( $H_0$ ) 生成 (150,190) 标准化的高频放大数据结构 ( $H_{1,n}$ ),其中使用局部去噪的低频放大数据结构 ( $L_1$ ) 和低频输入数据结构 ( $L_0$ ) 之间的对应关系,并且其中执行跨尺度块匹配 (150) 和标准化 (190);

- 在局部正则化步骤中局部去噪 (F3) 标准化的高频放大数据结构 ( $H_{1,n}$ ),由此根据去噪掩模 (M) 在所述一个或多个区域中执行局部去噪,并由此获得局部去噪的标准化的高频放大数据结构 ( $H_{1,uf}$ );

- 高通滤波 (195) 标准化的高频放大数据结构 ( $H_{1,uf}$ ),由此获得高通滤波过的标准化的高频放大数据结构 ( $H_1$ );以及

- 将所述高通滤波过的标准化的高频放大数据结构 ( $H_1$ ) 加到所述低频放大数据结构 ( $L_1$ ),由此获得超分辨率处理的数据结构 ( $S_1$ ).

2. 根据权利要求 1 所述方法,其特征在于,所述生成 (150、190) 标准化的高频放大数据结构 ( $H_{1,uf}$ ) 的步骤包括以下步骤:

- 确定局部去噪的低频放大数据结构 ( $L_1$ ) 中在第一位置处的第一片 ( $P_{n,L1}$ );

- 在低频输入数据结构 ( $L_0$ ) 中搜索 (152、154) 与第一片 ( $P_{n,L1}$ ) 最佳匹配的第一块 ( $B_{n,L0}$ ),并确定所述第一块 ( $B_{n,L0}$ ) 在低频输入数据结构 ( $L_0$ ) 中的位置;

- 选择 (155) 高频输入数据结构 ( $H_0$ ) 中在确定的位置处的第二块 ( $B_{n,H0}$ );

- 累加 (157) 所选择的第二块 ( $B_{n,H0}$ ) 的像素数据到第二片 ( $P_{n,H1}$ ),所述第二片是高频放大数据结构 ( $H_{1,acc}$ ) 中在第一位置处的片;

- 重复 (150) 以下步骤:确定局部去噪的低频放大数据结构 ( $L_1$ ) 中的新片 ( $P_{n,L1}$ ),在低频输入数据结构 ( $L_0$ ) 中搜索 (152、154) 与选择的片 ( $P_{n,L1}$ ) 最佳匹配的块 ( $B_{n,L0}$ ),选择 (155) 在高频输入数据结构 ( $H_0$ ) 中的对应块 ( $B_{n,H0}$ ),以及将所述选择的对应块 ( $B_{n,H0}$ ) 的像素数据累加 (157) 到高频放大数据结构 ( $H_{1,acc}$ ) 中在所述新片 ( $P_{n,L1}$ ) 的位置处的片 ( $P_{n,H1}$ ) 上;以及

- 标准化 (190) 高频放大数据结构 ( $H_{1,acc}$ ) 中累加的像素值,由此获得标准化的高频放大数据结构 ( $H_1$ ).

3. 根据权利要求 2 所述的方法,其中局部去噪的低频放大数据结构 ( $L_1$ ) 中的每个新片 ( $P_{n,L1}$ ) 与至少一个先前处理的片重叠。

4. 根据权利要求 2 或 3 所述方法,其特征在于,还包括如下步骤:

- 确定 (151、152) 在低频输入数据结构 ( $L_0$ ) 中的第一搜索窗口 ( $W_1$ ),其中所述第一搜索

窗口 ( $W_1$ ) 覆盖与高频放大数据结构中的所述第一位置相对应的位置处的块的周围的区域, 其中在低频输入数据结构 ( $L_0$ ) 中的搜索 (152、154) 仅在第一搜索窗口 ( $W_1$ ) 中执行, 并且其中确定 (151、152) 在低频输入数据结构 ( $L_0$ ) 中的搜索窗口 ( $W_1$ ) 的步骤对局部去噪的低频放大数据结构 ( $L_1$ ) 中的每个新片重复执行。

5. 根据权利要求 2 所述的方法, 还包括以下步骤: 对高频放大数据结构 ( $H_{1,acc}$ ) 中的每个像素的贡献的数量进行计数, 其中标准化 (190) 步骤包括将累加的每个像素的值除以贡献的数量。

6. 根据权利要求 1 所述的方法, 其中所述检测 (F1) 低分辨率输入数据结构中可能出现混叠的一个或多个区域包括轮廓检测 (1260) 的步骤。

7. 根据权利要求 6 所述的方法, 其中所述检测 (F1) 低分辨率输入数据结构中的一个或多个区域的步骤进一步包括扩大和调整的步骤 (1270), 其中轮廓检测 (1260) 检测到的至少一个轮廓被加宽, 并且其中被加宽的轮廓被调整到超分辨率处理的数据结构 ( $S_1$ ) 的尺寸。

8. 根据权利要求 1 的方法, 所述局部去噪低频放大数据结构 ( $L_{1,n}$ ) 中的一个或多个区域的步骤包括应用总变差正则化到由去噪掩模指示为可能发生混叠的区域的一个或多个轮廓区域上。

9. 根据权利要求 1 所述方法, 其中局部去噪 (F2) 低频放大数据结构 ( $L_{1,n}$ ) 中的一个或多个区域的步骤和局部去噪 (F3) 标准化的高频放大数据结构 ( $H_{1,n}$ ) 的步骤中的至少一个包括应用总变差正则化到由去噪掩模指示为可能发生混叠的区域的一个或多个轮廓区域上。

10. 根据权利要求 1 的方法, 其中所述局部去噪 (F2) 低频放大数据结构 ( $L_{1,n}$ ) 中的一个或多个区域的步骤, 总变差正则化根据输入低分辨率输入数据结构 ( $S_0$ ) 的像素合成局部去噪的标准化的高频放大数据结构 ( $H_{1,urf}$ ) 的像素。

11. 根据权利要求 1 所述方法, 其中低频放大数据结构 ( $L_1$ ) 通过以下步骤获得: 以放大因子  $n$  放大 (120) 输入数据结构 ( $S_0$ )、通过所述第二低通滤波器 ( $F_{1,l}$ ) 对放大的输入数据结构进行滤波 (130) 并以缩小因子  $d$  缩小 (140) 所述滤波过的放大输入数据结构,  $n > d$ , 其中获得最终的非整数放大因子  $n/d$ 。

12. 根据权利要求 1 所述方法, 其中对所述标准化的高频放大数据结构 ( $H_{1,urf}$ ) 进行滤波的步骤通过具有标准化截止频率  $\Omega_{1,h} = d/n$ , 阶数  $N_{1,h} = \text{round}(N_0 * n/d)$  以及幅度  $\sigma_{1,h} = 1$  的高通滤波器 ( $F_{h,1}$ ) 执行。

13. 根据权利要求 1 所述方法, 其中输入数据结构包括数字 2D 数据, 其中每个块和每个片包含至少  $5 \times 5$  个值, 所述搜索窗口覆盖至少  $9 \times 9$  个值, 并且每个片与至少一个早前处理的片重叠至少 2 个值。

14. 一种用于对数字数据的低分辨率输入数据结构 ( $S_0$ ) 执行超分辨率处理的装置, 包括:

- 去噪掩模生成器 (F1b), 用于生成指示低分辨率输入数据结构中可能发生混叠的一个或多个区域的去噪掩模 (M);

- 分裂模块 (975), 用于将输入数据结构 ( $S_0$ ) 分裂成低频输入数据结构 ( $L_0$ ) 和与低频输入数据结构 ( $L_0$ ) 互补的高频输入数据结构 ( $H_0$ ), 其中使用第一低通滤波器 ( $F_{1,0}$ );

- 放大器 (920), 用于放大输入数据结构 ( $S_0$ ) ;
  - 第二低通滤波器 (930), 用于滤波放大的输入数据结构, 其中获得低频放大数据结构 ( $L_{1,n}$ ) ;
  - 局部去噪器 (F2b), 用于根据低频放大输入数据结构 ( $L_{1,n}$ ) 对所述一个或多个由去噪掩模 (M) 指示的区域局部去噪, 其中获得局部去噪的低频放大数据结构 ( $L_1$ ) ;
  - 跨尺度块匹配模块 (1240), 用于通过外推高频输入数据结构 ( $H_0$ ) 并标准化外推的高频放大数据结构生成标准化的高频放大数据结构 ( $H_{1,n}$ ), 其中外推使用局部去噪的低频放大数据结构 ( $L_1$ ) 和低频输入数据结构 ( $L_0$ ) 之间的对应关系 ;
  - 局部正则化器 (F3b), 用于根据标准化的高频放大数据结构 ( $H_{1,n}$ ) 对所述一个或多个由去噪掩模 (M) 指示的区域局部去噪, 由此获得局部去噪的标准化的高频放大数据结构 ( $H_{1,uf}$ ) ;
  - 高通滤波器 (995), 用于滤波局部去噪的标准化的高频放大数据结构 ( $H_{1,uf}$ ), 由此获得高通滤波过的标准化的高频放大数据结构 ( $H_1$ ) ; 以及
  - 组合单元 (999), 用于组合所述高通滤波过的局部去噪的标准化的高频放大数据结构 ( $H_1$ ) 和所述局部去噪的低频放大数据结构 ( $L_1$ ), 由此获得超分辨率处理数据结构 ( $S_1$ ) 。
15. 根据权利要求 14 所述的用于对低分辨率输入数据结构 ( $S_0$ ) 执行超分辨率处理的装置, 其中跨尺度块匹配模块 (1240) 包括 :
- 第一确定单元 (951), 用于确定低频放大数据结构 ( $L_1$ ) 中在第一位置处的第一片 ;
  - 搜索单元 (952), 用于在低频输入数据结构 ( $L_0$ ) 中搜索与第一片最佳匹配的第一块 ;
  - 第二确定单元 (954), 用于确定所述第一块在低频输入数据结构 ( $L_0$ ) 中的位置 ;
  - 选择器单元 (955), 用于选择在高频输入数据结构 ( $H_0$ ) 中确定的位置处的第二块 ;
  - 累加器 (957), 用于累加所选择的第二块的像素数据到第二片, 第二片是高频放大数据结构中第一位置处的片 ;
  - 控制单元 (950), 用于控制重复对低频放大数据结构 ( $L_{1,n}$ ) 中多个片的处理 ; 以及
  - 标准化 (990) 单元, 用于标准化在高频放大数据结构中累加的像素值, 由此获得标准化的高频放大数据结构 ( $H_1$ ) ;
- 以及, 其中所述去噪掩模生成器 (F1b) 包括
- 高对比度轮廓检测器模块 (F1. 1b) ; 以及
  - 放大和调整模块 (F1. 2b) 。

## 生成低分辨率输入数据结构的超分辨率版本的方法和设备

### 技术领域

[0001] 本发明涉及一种用于生成低分辨率输入数据结构的超分辨率处理版本的方法和相应的设备。

### 背景技术

[0002] 超分辨率 (SR) 处理被认为是对常规采样多维信号分辨率的一种改进。特别令人感兴趣的情况是仅有低分辨率信号是可用时。单个低分辨率信号可用还是多个相似的低分辨率信号可用,是有显著差异的,因为在后一种情况下,可以通过结合几个可用信号的贡献充分利用更丰富的数据值。在图像处理方面的文献中,这些方法被笼统地称为基于实例的超分辨率处理,或者,更确切地说,单幅图像超分辨率处理。尽管下面的描述是一般性的,并且可以应用于不同维度的信号,但是焦点将集中在 2D 图像超分辨率处理的情形。

[0003] 图像超分辨率处理技术已为公众熟知多年,始于 M. Irani 和 S. Peleg 的《Super Resolution from Image Sequences》。最常见的是,这些技术涉及在给定一组噪声、模糊、低分辨率的观察结果(如,视频序列中连续的图像)的情况下使用与图像形成模型相逆的重建处理估计高分辨率图像。因此,图像之间的子像素运动、摄像机和后处理模糊以及子采样被逆转,以融合所述可用数据,得到超分辨率处理图像。几种全局优化迭代技术可用,它们的不同之处基本在于假定图像先验模型。这为其他病态问题提供了若干种唯一解。

[0004] 通常,这些技术的限制因素是在于用于图像去模糊和配准的点扩散函数 (PSF) 的估计,也就是,确定图像之间的子像素运动。通常,文献中的 SR 技术指的是用于获得配准的传统光流 (OF) 估计技术。这些技术在准合成例子中表现良好,但在实践中,当更多一般运动出现时,OF 估计中的已知解决方案无法鲁棒地、以足够的精确度配准视频序列中的连续帧。

[0005] 众所周知,在较宽范围的自然条件下,基于重建的 SR 算法在局部平移下具有分辨率最大增大 1.6 倍左右的基本限制,而在合成场景中(这是大多数可获得的出版物中经常研究的)分辨率增大到 5.7 倍是可能的。这是由于当子像素的移动通常是像素大小的精确的一部分 (fraction) 时,配准方面的有利条件。

[0006] SR 算法的替代类型尝试通过使用先验的已知的高分辨率的实例来足够地丰富输入视觉数据(低分辨率图像),来增加图像的分辨率。这些技术通常被称为基于实例的超分辨率处理 (EBSR)。在《Example-based super-resolution》中,W. T. Freeman、T. R. Jones 和 E. C. Pasztor 从足够通用的图像片 (patch) 数据库中获得合适的高分辨率实例,其高频率内容被求平均并便利地与输入图像的低频率内容融合。然而,当目标场景偏离包含在实例数据库中的情况时(当没有已知的片实际上类似于输入图像时),所述算法的性能就恶化了。实际上,扩大数据库的大小会导致在搜索最佳匹配训练片时的计算成本过高。因此,这种技术并不是一般常用的,而是集中应用于某一类超分辨率处理图像。

[0007] 为了处理该问题,并根据将被放大的内容适应性地表现,其他 EBSR 算法从所述单幅输入图像内提取高分辨率实例,可以在小的缩小因子下获得其不同分辨率图像的金

字塔表示。然后,对于输入图像中的每个片(例如,5×5 像素),在不同的分辨率(在金字塔的各级)的所有或部分图像中搜索匹配的片,以执行类似于基于重建的超分辨率处理的每个片的数据融合。这种技术的最好代表是 D. Glasner、S. Bagon 和 M. Irani 所著的《Super-Resolution from a Single Image》,以及 O. Shahar、A. Faktor 和 M. Irani 所著的《Space-Time Super-Resolution from a Single Video》,这是视频超分辨率处理的后续。以由于在 3D 时空中搜索跨越几个空间和时间尺度的视频帧所导致的计算复杂度的增加为代价,作者获得图像分辨率和帧率的同时增加,包括去除时域混叠。当前的计算能力使得该方法不能用于实时操作。

[0008] 其他已知的办法也都成本高昂,并且通常不能表明可用于实时方法,或由于施加过度对比度容易产生一些看起来不真实的边缘,或在纹理区域中容易产生过度平滑,这样在一般情况下会产生看起来不自然的图像。

[0009] 在 G. Freedman 和 R. Fattal 所著的《Image and Video Upscaling from Local Self-Examples》中,所提出的策略是充分利用每个图像片的局部相邻区域中的自相似性。这被证明可以提供接近于在《Super-Resolution from a Single Image》中使用的全图像搜索的结果,同时获得减少计算时间的益处。这种方法的缺点是用于将图像中的高频和低频分离的空间移变滤波器的高度复杂的设计并不能快速完成,这导致了一组有限的可选择的扩大因子。

[0010] 与生成 SR 数据结构(特别是 SR 图像)相联系出现的一个特别问题是:空间伪像(例如,轮廓混叠(contour aliasing))已包括在低分辨率的数据结构中,并且 SR 处理通常会强调这些不想要的结构。

## 发明内容

[0011] 本发明解决了至少一些上述的问题。本发明涉及一种用于改善常规采样的多维信号的分辨率的方法,其中,单个低分辨率信号是可用的。在图像处理方面的文献中,这些方法一般都称为基于实例的超分辨率处理,或更精确地,称为单幅图像超分辨率处理。虽然在此公开的方法是通用的,并且可以应用于不同维度的信号,但是以下将集中于 2D 图像超分辨率处理的情形。

[0012] 根据本发明,单幅图像的超级分辨率重建包括三个阶段。首先,对输入的图像执行基于插值的放大,之后对低分辨率(LR)图像执行等同于低通滤波的操作,得到高分辨率(HR)图像的低频(LF)频带。所述第二阶段包括外推高分辨率图像的高频(HF)频带,例如,通过跨尺度块匹配。后者可以包括搜索在 HR 图像中的被检查的片和 LR-LF 图像的局部邻域中的片(也包括部分重叠的片)之间的 LF 匹配,并且累加从 LR 图像获取的对应的 HF 贡献。进一步,生成指示潜在噪声或受干扰区域的去噪掩模(de-noising mask),以及根据去噪掩模的定义,对 HR 图像的 HF 频带和 HR 图像的 LF 频带中至少一个的像素分别应用局部去噪。在一些实施例中, HF 频带和 LF 频带中至少一个的去噪通过局部正则化实现。第三阶段包括将局部去噪的 HR 图像的 LF 频带和局部去噪的外推得到的 HR 图像的 HF 频带的贡献相加。局部去噪具有中和(neutralizing)效果,或至少减少来自输入图像的至少混叠效应的传播。

[0013] 本发明的一个方面是抵抗来自输入图像中伪像的鲁棒性。该鲁棒性通过生成去噪

掩模来实现,根据去噪掩模应用局部去噪到 HR 图像的 HF 频带和 LF 频带中的至少一个,因此,在一个实施例中,至少外推得到的 HR 图像的 HF 频带的去噪是通过根据去噪掩模的局部正则化实现的。该局部正则化实现了去噪的效果。

[0014] 该去噪掩模指示在超分辨率处理的图像的尺度下比在其他区域中更容易发生混叠的区域。在这里,它也被称为“指示函数”或“潜在受到混叠影响的像素的掩模”。可使用各种算法产生所述去噪掩模。在一个实施例中,去噪掩模按如下生成:用于检测陡峭轮廓(例如 Sobel 方法)的检测器被应用到输入 LR 图像上,并通过在由应用所述轮廓检测器得到的二元掩模上应用形态(morphology)(例如扩大)来扩展所述轮廓像素周围的区域。然后对被扩大的轮廓进行尺寸调整以匹配所述超分辨率处理的图像的尺寸。通常,被去噪掩模指示为具有更大的混叠可能性的区域在此被称为“轮廓区域”,即使使用不同的算法来检测更容易发生混叠的区域。由于去噪和/或正则化仅被应用于所述轮廓区域内部,因此它们在此被称为“局部去噪”和/或“局部正则化”。

[0015] 此外,在一些实施例中,应用局部去噪包括将总变差(Total Variation, TV)正则化矩阵应用于去噪掩模指示的轮廓区域上。TV 正则化矩阵的正则化除去由输入 LR 图像中存在的 HF 混叠引起的伪像。最后,在超分辨率处理的图像的轮廓区域中, HF 频带不是如同在其他区域中那样生成成为重叠的局部片的贡献的平均,而是生成成为使能量函数最小化的一组像素值。所述能量函数考虑数据成本项(data cost terms)和 TV 先验(TV prior)。该去噪的技术的优点是可以获得抗混叠效果,也就是,超分辨率处理的图像在较可能发生混叠的区域中(例如,具有高对比度轮廓的区域)不存在伪像。

[0016] 原则上,根据本发明的用于产生单个低分辨率数字输入数据结构  $S_0$  的超分辨率处理版本的方法包括以下步骤:生成去噪掩模;放大;对单个低分辨率数字输入数据结构  $S_0$  进行低通滤波和局部去噪,以获得放大的高分辨率数据结构的局部去噪的低频部分  $L_1$ ;以及将低分辨率数字输入数据结构  $S_0$  分离为低频部分  $L_0$  和高频部分  $H_0$ 。放大的高分辨率数据结构的高频部分  $H_{1,init}$  被创建,其被初始化为空(即,所有像素被设置为零),然后通过外推计算其像素。例如,在一些实施例中,对放大的 HR 数据结构的局部去噪的 LF 部分  $L_1$  的多个片中的每一个,搜索 LR 数字输入数据结构的 LF 部分  $L_0$  中的最佳匹配块,并确定 LR 数字输入数据结构的 HF 部分  $H_0$  中的对应块。在这些实施例中,然后,确定的来自 LR 数字输入数据结构的 HF 部分  $H_0$  中的块加到在上述放大的 HR 数据结构的 LF 部分  $L_1$  中的片所在的位置处的放大的 HR 数据结构的 HF 部分  $H_{1,acc}$  上。最后,所得到的外推的放大 HR 数据结构的 HF 部分  $H_{1,acc}$  被标准化、局部去噪,以及在一个实施例中,高通滤波。所述被标准化、局部去噪和高通滤波的放大的 HR 数据结构的 HF 部分  $H_1$  被加到放大的 HR 数据结构的局部去噪的 LF 部分  $L_1$  中,得到单个 LR 数字输入数据结构  $S_0$  的改善的去噪超分辨率处理版本  $S_1$ 。

[0017] 应当注意,对于更好的可读性,术语“块”在本文中用来表示低分辨率数据结构中的一组相邻值,而术语“片”用于表示在高分辨率数据结构中的一组相邻值。然而,块和片具有相同的尺寸(也就是,相邻值的数量和形状)并且基本上是相同的。

[0018] 本发明还涉及一种用于对数字数据的低分辨率输入数据结构  $S_0$  执行超分辨率处理的装置,在一个实施例中包括:用于生成去噪掩模的去噪掩模生成器;用于将所述输入数据结构  $S_0$  分裂成 LF 输入数据结构  $L_0$  和与 LF 输入数据结构互补的 HF 输入数据结构  $H_0$  的分裂模块,所述分裂模块在一个实施例中包括用于对输入数据结构  $S_0$  进行滤波的第一

低通滤波器  $F_{1,0}$ ，其中获得 LF 输入数据结构  $L_0$ ；以及用于计算输入数据结构  $S_0$  和 LF 输入数据结构  $L_0$  之间的差的减法单元（例如，加法器、减法器、比较器或差分器），由此生成 HF 输入数据结构  $H_0$ 。该装置进一步包括：用于放大所述输入数据结构  $S_0$  的放大器；用于对所述放大的输入数据结构进行滤波的第二低通滤波器  $F_{1,1}$ ；以及局部去噪器，用于根据去噪掩模对所述滤波后的放大的输入数据结构进行局部去噪，其中获得局部去噪的放大的 LF 数据结构  $L_1$ 。该装置还包括：跨尺度块匹配模块，用于通过外推 HF 输入数据结构  $H_0$  并标准化外推得到的 HF 放大数据结构生成标准化的 HF 放大数据结构  $H_{1,n}$ 。在一个实施例中，所述跨尺度块匹配模块包括：第一确定单元，用于确定在所述局部去噪的放大的 LF 数据结构  $L_1$  中第一位置处的第一片；搜索单元，用于在所述 LF 输入数据结构  $L_0$  中搜索与第一片匹配最佳的第一块；以及第二确定单元，用于确定所述第一块在 LF 输入数据结构  $L_0$  中的位置；选择器，用于选择在 HF 输入数据结构  $H_0$  中在所确定的位置处的第二块；用于累加所选择的第二块的像素数据到第二片的累加器，第二片是在 HF 放大数据结构  $H_{1,acc}$  中第一位置处的片；控制单元，用于控制对局部去噪的放大的 LF 数据结构  $L_1$  中多个片的重复处理；以及标准化单元，用于标准化在放大的 HF 数据结构  $H_{1,acc}$  中累加的像素值。该装置还包括：局部正则化器，用于对轮廓区域内的标准化的累加（即，平均的）像素值进行局部去噪，从而得到局部去噪的标准化的放大的 HF 数据结构  $H_1$ ；以及组合单元，用于组合（例如，相加）所述去噪的标准化的放大的 HF 数据结构  $H_1$  和所述局部去噪的放大的 LF 数据结构  $L_1$ ，从而获得去噪的超分辨率处理的数据结构  $S_1$ 。

[0019] 本发明还涉及一种具有使得计算机执行一种如上文所解释的方法的可执行指令的计算机可读介质。在一个实施例中，本发明涉及一种具有使得计算机执行一种用于对数字数据的低分辨率输入数据结构  $S_0$  执行超分辨率处理的方法的可执行指令的计算机可读介质，包含如下步骤：

[0020] 生成去噪掩模，使用第一低通滤波器对输入数据结构  $S_0$  进行滤波，其中获得 LF 输入数据结构  $L_0$ ；

[0021] 计算输入数据结构  $S_0$  和 LF 输入数据结构  $L_0$  之间的差，由此生成 HF 输入数据结构  $H_0$ ；

[0022] 放大输入数据结构  $S_0$ ，并使用第二低通滤波器和局部去噪器对放大的输入数据结构进行滤波和局部去噪，其中获得局部去噪的放大的 LF 数据结构  $L_1$ ；

[0023] 外推并标准化 HF 放大数据结构，由此获得标准化的高频的放大的数据结构  $H_1$ ；

[0024] 使用局部正则化对标准化的高频的放大的数据结构进行局部去噪，由此获得局部去噪的标准化的放大的 HF 数据结构  $H_1$ ，并将局部去噪的标准化的放大的 HF 数据结构  $H_1$  与局部去噪的放大的 LF 数据结构  $L_1$  相加，获得去噪的超分辨率处理的数据结构  $S_1$ 。

[0025] 在具有所述可执行指令的计算机可读介质的一个实施例中，通过以下外推放大的 HF 数据结构：确定在所述局部去噪的 LF 放大数据结构  $L_1$  中第一位置处的第一片，在所述 LF 输入数据结构  $L_0$  中搜索与第一片匹配最佳的第一块，确定所述第一块在 LF 输入数据结构  $L_0$  中的位置，选择在 HF 输入数据结构  $H_0$  中在所确定的位置处的第二块，累加所选择的第二块的像素数据到第二片，第二片是 HF 放大数据结构中第一位置处的片，重复以下步骤：确定 LF 放大数据结构  $L_1$  中的新片，在 LF 输入数据结构  $L_0$  中搜索与所选择的片最佳匹配的块，在 HF 输入数据结构  $H_0$  中选择对应的块，并将所选择的对应块的像素数据累加到 HF 放大数

据结构中所述新片的位置处的片上,并标准化在 HF 放大数据结构中所累加的像素值,由此获得标准化的高频放大数据结构  $H_1$ 。

[0026] 本发明的一个优点是它能够(在至少一个实施例中)以任何想要的非整数图像放大因子产生任何 1D、2D 或 3D 数字输入数据结构(例如,任何数字图像)的更高分辨率的呈现。此外,至少在轮廓区域之外这按照一般的方式执行,不需要引入在先的任意图像,超越已被证明对一般图像成立的图像必须在不同的分辨率级别下显示出局部自相似性的假设:。

[0027] 本发明的另一个优点在于,由于使用了自平均,在放大的数据结构中相较于传统方法引入了更少的噪声。本发明的另一个优点是,它对单幅图像进行操作,但是有利地不需要数据库、码本或类似物,也不需要任何训练或训练数据,而传统的单幅图像方法都需要用于训练获取高频实例的数据库。本发明的还有一个优点在于,不仅图像中的噪声,还有伪像(如,空间混叠)也有所减少。

[0028] 在从属权利要求、下面的描述以及附图中公开了本发明的有利实施例。

### 附图说明

[0029] 参考附图描述了本发明的示例性实施例,其中

[0030] 图 1 示出了用于执行超分辨率处理的方法的流程图;

[0031] 图 2 示出了通过外推原始分辨率尺寸的相似片的高频信息来合成超分辨率处理图像的高频频带;

[0032] 图 3 示出了搜索窗口的示例性使用和位置;

[0033] 图 4(a)-(d) 中示出了选择 2D 输入数据结构中连续的片(包括重叠),以及确定连续片的匹配块的原理;

[0034] 图 5(a)-(c) 中示出了选择 1D 输入数据结构中连续的片(包括重叠),以及确定连续片的匹配块的原理;

[0035] 图 6 示出了高分辨率图像的放大的低频频带  $L_1$  的形成和低分辨率输入图像  $S_0$  的双频带分析 ( $L_0, H_0$ );

[0036] 图 7 示出了合成超分辨率处理图像的高频频带  $H_1$  的过程的概念框图。

[0037] 图 8(a)-(b) 示出了用于生成超分辨率处理图像  $S_1$  的所述插值后的低频频带  $L_1$  和所述外推的高频频带  $H_1$  的融合;

[0038] 图 9 示出了一个装置的框图;

[0039] 图 10(a)-(d) 示出了与传统放大图像的频谱相比的根据本发明的放大图像的频谱;

[0040] 图 11 示出了本发明的三个原理阶段;

[0041] 图 12 示出了用于改善抵抗在执行高分辨率处理的方法中的混叠的鲁棒性的的方法的流程图;以及

[0042] 图 13 示出了混叠的输入图像及其对应的去噪掩模。

### 具体实施例

[0043] 图 1 示出在本发明的一个实施例中的用于对数字 1D、2D 或 3D 数据的低分辨率输

入数据结构  $S_0$  执行超分辨率处理的方法的流程图。在此实施例中,该方法包括以下步骤:

[0044] 生成去噪掩模  $M$ ,包括轮廓检测步骤 F1.1 以及扩大和调整步骤 F1.2,

[0045] 通过第一低通滤波器  $F_{1,0}$  对输入数据结构  $S_0$  滤波 170,其中获得 LF 输入数据结构  $L_0$ ,

[0046] 在加法器/减法器 180 中计算输入数据结构  $S_0$  和 LF 输入数据结构  $L_0$  之间的差,从而生成 HF 输入数据结构  $H_0$ ,

[0047] 放大 120 输入数据结构  $S_0$ ,通过第二低通滤波器  $F_{1,1}$  对放大的输入数据结构进行滤波,从中获得 LF 放大数据结构,

[0048] 在所述去噪掩模  $M$  指示的区域中对 LF 放大数据结构进行局部去噪 F2,其中获得局部去噪的 LF 放大数据结构  $L_1$ ,

[0049] 确定低频放大数据结构  $L_1$  中第一位置处的第一片  $P_{n,L1}$ ,

[0050] 在低频输入数据结构  $L_0$  中搜索 151、152、154 与第一片  $P_{n,L1}$  匹配最好的第一块  $B_{n,L0}$ ,并确定所述第一块  $B_{n,L0}$  在低频输入数据结构  $L_0$  内的位置,

[0051] 选择 155 在高频输入数据结构  $H_0$  中确定的位置处的第二块  $B_{n,H0}$ ,累加 157 所选择的第二块  $B_{n,H0}$  的数据值(例如,像素数据)到第二片  $P_{n,H1}$ ,第二片是在高频放大数据结构  $H_{1,acc}$  中第一位置处(上面对应于第一片  $P_{n,L1}$  确定的)的片,

[0052] 重复 150 以下步骤:在低频放大数据结构  $L_1$  中确定新片  $P_{n,L1}$ ,在低频输入数据结构  $L_0$  中搜索 151、152、154 与被选择的片  $P_{n,L1}$  最佳匹配的块  $B_{n,L0}$ ,选择 155 高频输入数据结构  $H_0$  中对应的块  $B_{n,H0}$ ,并将选择的对应块  $B_{n,H0}$  的像素数据累加 157 到在所述新片  $P_{n,L1}$  的位置处的高频放大数据结构  $H_{1,acc}$  中的片  $P_{n,H1}$ ,

[0053] 标准化 190 在高频放大数据结构  $H_{1,acc}$  中累加的像素值,由此获得标准化的高频放大数据结构  $H_1$ ,以及

[0054] 在标准化的 HF 放大数据结构  $H_1$  的轮廓区域中执行局部正则化 F3,由此获得局部正则化的标准化 HF 放大数据结构  $H_{1,uf}$ 。局部正则化可以通过局部正则化的 HF 合成而完成。所述轮廓区域是从所述去噪掩模  $M$  确定的。所述局部正则化的标准化 HF 放大数据结构  $H_{1,uf}$  在高通滤波器  $F_{h,1}$  中滤波 195,以获得经滤波的局部正则化的标准化 HF 放大数据结构  $H_1$ 。最后,通过将经滤波的局部正则化的标准化 HF 放大数据结构  $H_1$  加到 199LF 放大数据结构  $L_1$ ,获得超分辨率处理数据结构  $S_1$ 。

[0055] 在一些实施例中,放大的输入数据结构经所述第二低通滤波器  $F_{1,1}$  滤波 130 之后,以缩小因子  $d$  缩小 140,其中  $n > d$ 。因此,低频放大数据结构  $L_1$  获得了总体非整数放大因子  $n/d$ 。相同的放大因子用于去噪掩模的放大,并且可以使用相同的方法。高频率放大数据结构  $H_{1,init}$ (或相应地  $H_1$ )与低频放大数据结构  $L_1$  具有相同的大小。 $H_1$  的大小可以预定义,或来源于  $L_1$ 。 $H_1$  在初始化步骤 160 中初始化成该大小的空数据结构  $H_{1,init}$ 。

[0056] 图 2 示出了通过外推原始分辨率尺寸  $H_0$  的相似片的 HF 信息来合成超分辨率处理(即,高分辨率)图像的 HF 频带  $H_1$  的原理的一个实施例。注意,在下面的描述中,参照图 2~图 7,如果提及高频高分辨率数据结构  $H_1$ ,实际上是指未滤波的、非标准化的 HF 高分辨率数据结构  $H_{1,acc}$ (去噪之前)。

[0057] 高分辨率图像  $L_1$  的低频频带首先被划分成具有一定重叠的多个小片  $P_{n,L1}$ (如,  $5 \times 5$  像素)。重叠量的选择需要权衡对高频伪像的鲁棒性(有较多的重叠的情况下)和计

算速度（有较少的重叠的情况下）。在一个实施例中，在每个方向上选择 20-30% 的重叠，即，对例如具有 5 个值的相邻片，2 个值重叠。在其他的实施例中，重叠更高，例如 30-40%，40-50%，50% 左右（如 45-55%）或高至 90%。对于低于片大小 20% 的重叠，本发明以下描述的效果通常较差。

[0058] 如上所述以及如下面进一步描述的，最终的高频频带在使用对每个像素有贡献的片的数量进行标准化之后获得，从而得到平均值。片之间的重叠越大，对由高频外推处理造成的高频伪像的抑制就越好，进行累加的值也越多。

[0059] 然后，对于每个低频高分辨率片  $P_{n,L1}$ ，在平均绝对差（mean absolute difference, MAD, 从运动估计获知）方面的最佳匹配在低分辨率图像的低频频带  $L_0$  上的局部搜索窗口（例如， $11 \times 11$  像素）中进行穷举搜索之后获得。最佳匹配是来自于低频高分辨率图像  $L_0$  中具有与低频高分辨率片  $P_{n,L1}$ （例如， $5 \times 5$  像素）相同尺寸的块  $P_{n,L0}$ 。关于搜索窗口的更多细节在下面参照图 4 描述。

[0060] 为便于理解下一步，重要的是要注意，如附图 2 所示，低分辨率的低频数据结构  $L_0$  具有与低分辨率的高频数据结构  $H_0$  相同的维数，并且高分辨率的低频数据结构  $L_1$  具有与高分辨率的高频数据结构  $H_1$  相同的维数。对每个片，确定匹配的低频低分辨率片  $P_{n,L0}$ （在  $L_0$  内）的位置，并且提取匹配的低频低分辨率片  $P_{n,L0}$  位置处对应的低分辨率高频片  $P_{n,H0}$ （在  $H_0$  内）。然后，将从  $H_0$  提取的低分辨率高频片  $P_{n,H0}$  累加到在高分辨率低频数据结构  $L_1$  中的当前片  $P_{n,L1}$  所在的相同位置处的高分辨率图像的高频频带  $H_1$  上。详细地说，将从  $H_0$  提取的低分辨率高频片  $P_{n,H0}$  的每个值（例如，像素）累加到高分辨率图像的高频频带  $H_1$  的各个片中的对应值（例如，像素）上。通过这种方式，通过逐个片（patch-wise）累加对高分辨率图像的高频频带  $H_1$  进行合成。将高分辨率图像的低频频带  $L_1$  划分为多个重叠的片，找到最佳低频匹配并累加对应的高频贡献的过程在图 3 中示出，并将在下面进行详细描述。

[0061] 因此，所得到的（初步的）高分辨率数据结构的高频频带  $H_1$  的每个值是来自多个有贡献的片的值的总和。由于在  $L_1$  中的片重叠（由于两者具有相同的尺寸，因此也在  $H_1$  中），来自至少两个片的值对  $H_1$  中的多个或所有值有贡献。因此，对所得到的（初步的）高分辨率数据结构的高频频带  $H_1$  进行标准化 190。为此目的，在合成过程中，对来自  $H_0$  的、对高频高分辨率数据结构  $H_1$  中的每个值有贡献的值的数量计数，并且  $H_{1,acc}$  中的每个累加值最终都除以贡献的数量。

[0062] 图 3 示例性地示出了搜索窗口在低分辨率低频数据结构  $L_0$  中的使用和定位。对于在  $L_1$  中的第一片  $P_{11,L1}$ ，在第一搜索窗口  $W_{11}$  内搜索  $L_0$  中的第一最佳匹配块  $P_{11,L0}$ 。两个片具有相同的大小。所述搜索窗口在每一方向上（除边缘上，就第一片而言）比所述片大至少一个值。在该示例中，所述第一最佳匹配块  $P_{11,L0}$  在  $L_0$  中第一搜索窗口  $W_{11}$  的左上角被发现。对该片和块的进一步处理如上所述。然后，随后的片水平和 / 或垂直地移动，其中每个片与前一个片重叠。

[0063] 在该示例中，选择位于水平移动给定的片前移量（advance）的位置处的第二片  $P_{12,L1}$ 。片前移量是片的大小和重叠之间的差。片前移量在不同的维度（例如，2D 数据结构的水平和垂直方向）下可能不同，这可能导致在高分辨率输出数据结构的多个维度中的不同的效果或质量，但是它们通常是相等的。新的搜索窗口  $W_{12}$  根据新片的位置确定。原则上说，搜索窗口在与片相同的方向上前移，但更慢。因此，当前搜索窗口可以在与之前的搜

索窗口相同的位置处,正如这里的情况一样。然而,由于在所述搜索窗口中搜索的是另一片  $P_{12,L_1}$ ,因此最佳匹配片  $P_{12,L_0}$  的位置通常是不同的。然后,最佳匹配片  $P_{12,L_0}$  累加到在低频高分辨率片  $P_{12,L_1}$  位置处的高分辨率高频数据结构  $H_1$ ,如上所述。确定后续片  $P_{13,L_1}$ 、 $P_{14,L_1}$ ,并且以相同的方式搜索它们的最佳匹配。如图 3 所示,最佳匹配块在搜索窗口中的位置是任意的,并且取决于输入数据(例如,图像内容)。

[0064] 上面的说明对应用于 1 维 (1D) 数据结构也提供了足够多的信息。对于 2D 数据结构,更多后续片的位置通过垂直片前移(可以或可以不与水平片前移相结合)找到。同样,如上所述且如图 3 所示的  $P_{21,L_1}, \dots, P_{23,L_1}$ ,垂直片前移包括重叠。

[0065] 搜索窗口的位置根据当前片的位置来确定。如图 3 所示,不同片的搜索窗口  $W_{11}, \dots, W_{22}$  重叠。由于  $L_0$  是比  $L_1$  更小的数据结构,因此搜索窗口在每个维度上的前移量是很小的。在一个实施例中,如果与之对应的片在  $L_1$  的边缘上,那么搜索窗口位于  $L_0$  的边缘上,并且它匀速地和 / 或按比例地在这些边缘之间移动。

[0066] 在一个实施例中(图 3 中未示出),搜索窗口的中心设置在与片的中心基本成比例的位置。例如,在片的中心位于高分辨率数据结构  $L_1$  的 3% 处的情形中,搜索窗口的中心设置为位于低分辨率数据结构  $L_0$  的大约 3% (四舍五入) 处。在此情况下,对于边缘附近的片,搜索窗口的大小可能会减小,或者搜索窗口可能完全移动到低分辨率数据结构  $L_0$  中。

[0067] 通常,搜索窗口越大,越可能找到非常相似的片。然而,在实践中,通过较大地增大搜索窗口,预见将会获得非常小的精度差异,因为在一般的自然图像中,局部片结构更有可能只在非常局部的区域中找到。此外,较大的搜索窗口在搜索期间需要更多的处理。

[0068] 图 4 示出了在图像(即,2D 输入数据结构)中选择连续片、重叠和确定连续片的匹配块的原理的细节。示例性地,片和块具有  $5 \times 5$  像素以及搜索窗口具有  $12 \times 12$  像素。如上所述,对  $L_1$  中的第一片  $P_{1,L_1}$ ,确定  $L_0$  中的搜索窗口  $W_1$ 。在搜索窗口  $W_1$  内,将第一片在不同的块位置处进行比较,并确定具有最小平均绝对差 (MAD) 的块  $B_{1,L_0}$ 。这就是最佳匹配块。确定它在低分辨率低频数据结构  $L_0$  中的位置,例如,在第三列第三行的左上角处。然后,确定高频低分辨率图像  $H_0$  中相同位置处的对应的片。因此,它是在第三列第三行的左上角处的  $5 \times 5$  像素片。该片提取自  $H_0$ ,并加到当前低频高分辨率片  $P_{1,L_1}$  所在的位置处的  $H_1$  上,即  $H_1$  的左上角(见图 4a)。

[0069] 如图 4b 所示,根据采用的片前移量选择第二片  $P_{2,L_1}$ 。在此情形中,片前移量是两个维度上的两个像素,这意味着由于片大小为  $5 \times 5$  像素,因此重叠是 3。因此,在该例子中,垂直重叠  $V_v$  和水平重叠  $V_h$  是相等的。由于较慢的搜索窗口前移,搜索窗口  $W_2$  与前一个片所用的相同。然而,由于不同的像素值(根据任意图像内容),在搜索窗口内找到另一个最佳匹配块  $B_{2,L_0}$ 。以如上所述相同的方式,确定它的位置(例如,在第 7 列第 2 行的左上角),从  $H_0$  中提取对应的  $5 \times 5$  块(在第 7 列第 2 行的左上角),并将从  $H_0$  中提取的块加到第二片  $P_{2,L_1}$  的位置处的高频高分辨率图像  $H_1$  上,即,其第一行第三列的左上角。因此,属于两个或更多不同片的特定像素累加自最佳匹配块的对应像素。也就是,示例性地,高分辨率高频图像  $H_1$ (对应于图 4 中所示的  $L_1$  中的位置)的第 4 列第 5 行中的特定像素在所述处理的当前阶段具有从第 6 列第 7 行的像素(来自第一片的最佳匹配块  $B_{1,L_0}$ )和从第 8 列第 6 行的像素(来自第二片的最佳匹配块  $B_{2,L_0}$ )累加的值。

[0070] 如上面提到的,搜索窗口通常只在多个片被处理之后才前移。如图 4c 示例性地所

示,对上述结构,在搜索窗口  $W_3$  在水平方向上移动一个像素之前,需要前移三个片(即,第4个片)。此外,在这里应该注意的是,片前移(从而搜索窗口前移)的各个维度的次序的差异不会造成任何差异。因此,虽然图 4d 中示出的片可以在前面的片移动到  $L_1$  的右边边缘之后处理,但是它也可以在如图 4a 所示的第一片之后立即处理。

[0071] 图 5 示出了 1D 数据结构的相应示例。同样在此情况下,在低频高分辨率数据结构  $L_1$  的位置 #1...#4 处的第一片(具有表示为 X 的值)位于低频低分辨率数据结构  $L_0$  中的搜索窗口  $W_1$  内,例如,在位置 #2...#5 处的值。因此,对应的  $H_0$ (未示出)的在位置 #2...#5 处的值被加到  $H_1$ (未示出)的位置 #1...#4 处。在第二步骤中,在  $L_1$  的位置 #3...#6 处的第二片位于  $L_0$  中的第二搜索窗口  $W_2$  内,例如,在  $L_0$  的位置 #3...#6 处(搜索窗口的位置 #2...#5 处)。因此,对应的  $H_0$ (未示出)的在位置 #3...#6 处的值被加到  $H_1$ (未示出)的位置 #2...#5 处,等等。

[0072] 与如上所述的用于 1D 和 2D 数据结构的原理相同的原理也可应用于任何多维数据结构,包括 3D 数据结构。

[0073] 如上所述,公开的用于对单幅图像进行超分辨率处理的方法包括三个阶段。作为本发明的第一阶段,图 6 示出了一个用于形成放大的高分辨率图像的低频频带  $L_1$  和对低分辨率输入图像  $S_0$  进行双频带分析 ( $L_0, H_0$ ) 的实施例的原理。除了获得剩余的分辨率图像的高频分量  $H_0$  之外,该方法的第一阶段的目的是还要获得具有在一个实施例中是分数的放大因子的高分辨率图像的低频频带  $L_1$ ,以及具有相同的标准化带宽的低分辨率图像  $L_0$ 。对低分辨率输入图像  $S_0$  的双频带分析分为低频部分  $L_0$  和高频部分  $H_0$  执行。低分辨率图像的截止标准化频率与高分辨率图像的截止标准化频率是相等的。在一个实施例中,使用可分离滤波器以避免方点扩展函数(square Point Spread Functions, PSFs)较大的卷积(convolution)。这意味着,内插高分辨率滤波器  $F_{1,1}$  和低通低分辨率滤波器  $F_{1,0}$  都可以完全表示为一个 1 维滤波器,因为,如果需要,所述 PSF 可以被计算为对应系数向量的张量积( $F_{1,1}^{2D} = F_{1,1} F_{1,1}^T$ ,并相应地适用  $F_{1,0}$ )。

[0074] 在下文中,描述了滤波器设计的一个实施例。

[0075] 在图 6 中示出的两个滤波器的设计主要由合理的放大系数  $n/d$  和低分辨率 FIR 滤波器  $F_{1,0}$  可任意选择的阶数  $N_0$  决定。通常,阶数的选择由可用的卷积计算时间确定。通常,在大约 8...16 的值应足够提供足够陡峭的过渡频带。通过为阶数  $N$  选择偶数值,得到  $N+1$  个滤波器系数,可避免附加相移,获得更精确的高频频带。低通滤波器  $F_{1,1}$  和  $F_{1,0}$  是实数的并具有线性相位,即,它们是有限脉冲响应(FIR)滤波器。每个滤波器在对应的截止频率处的标准化增益被定义为 -6dB。系数被定义为具有长度为  $N+1$  的汉明窗的离散正弦函数。滤波器幅度一般被定义为在加窗后的低通频带中心处的缩放比例(scaling)。

[0076] 高分辨率内插滤波器

[0077] 记住这些规则,要设计的第一个滤波器是高分辨率内插滤波器  $F_{1,3}$ 。给定低分辨率滤波器  $F_{1,0}$  想要的阶数  $N$ ,合理的放大因子  $n/d$  和前一段中的设计规则,唯一缺失的参数是缩放比例  $\sigma_1$ (为了处理在已知样本之间插入  $n$  个零)、高分辨率滤波器  $N_1$  的阶数和其截止标准化频率  $\Omega_1$ 。这些参数是  $\sigma_1 = n$ ,  $N_1 = N_0 n$  和  $\Omega_1 = \min(1/n, 1/d) = 1/n$ 。该截止频率遵守消除源于在现有样本之间插入零的谱分量的要求。

[0078] 低分辨率等效低通滤波器

[0079] 在这种情况下, 现有样本之间没有引入零, 所以这种滤波器的幅度是  $\sigma_0 = 1$ 。滤波器的阶数已经被任意地定义, 并且所述截止频率设定为  $\Omega_0 = d/n$ 。这个值补偿在内插滤波器施加于高分辨率图像后的抽取。

[0080] 使用该滤波器设计, 已分析的低分辨率输入图像的低频分量在标准化带宽方面匹配想要的高分辨率图像的低频分量。相反地, 已分析的低分辨率图像的高频分量可以用于估计缺失的高分辨率图像的高频频带。

[0081] 本发明的第二阶段的目的是通过充分利用输入图像中的局部自相似性合成高分辨率图像的高频频带。这样做是基于每个小片; 该方法通常受益于使用较小的放大因数, 由于可以使用更宽的频带宽度 (增加的信息) 用于已分析的低分辨率图像的低频分量, 对于具有相似的低频内容的图像片, 它可以提供更好的选择性。这些在图 7 中示意性示出。方法的进一步细节将在下面讨论。

[0082] 图 7 示出了合成超分辨率处理图像的高频频带 ( $H_1$ , 初始设定为 0) 的过程的示例性概念框图 700, 其在原理上是通过外推低分辨率图像的高频频带  $H_0$  完成的。信号  $W_1(t)$  和  $W_0(t)$  是具有根据被处理的当前图像片随时间变化的位置的空间窗口, 并分别表示片前移量和搜索窗口前移量。也就是, 例如, 高分辨率图像的低频频带  $L_1$  被划分成的小片 (例如  $5 \times 5$  像素) 的前移量和重叠可以理解为在低频高分辨率数据结构  $L_1$  中并同时为高分辨率数据结构的高频频带  $H_1$  中以第一速度前移的窗口  $W_1(t)$ 。搜索窗口在低分辨率图像的低频频带  $L_0$  上的前移被建模为时变窗口  $W_0(t)$ , 其以相同的方式应用于低分辨率图像的高频频带  $H_0$ 。搜索单元 710 在搜索窗口内执行穷举搜索找到最佳匹配块 (即, 具有最小 SAD 的块)。如上所述, 其位置被施加到低分辨率图像的高频频带  $H_0$ 。由于搜索通常具有一定的持续时间, 因此延迟由延迟补偿单元 720、730 来补偿。在所述低分辨率高频数据结构  $H_0$  中的对应片在提取单元 740 中被提取, 并在累加单元 750 中被累加到高分辨率高频数据结构  $H_1$ 。可以推导出用于具有不同于 2D 维度 (如, 1D 或 3D) 的数据结构的类似实施例。

[0083] 第三阶段是形成最终的高分辨率图像。该阶段的目的是合适地融合所述高分辨率图像的低频频带  $L_1$  和标准化的高分辨率图像的高频频带  $H_1$ 。标准化的高频高分辨率图像的高频频带  $H_1$  可以在与低频高分辨率频带  $L_1$  相加之前高通滤波。为确保频谱兼容性, 这种高通滤波是有利的, 但当  $L_1$  和  $H_1$  基本上没有重叠频率 (参见附图 8b) 时可以被省略。

[0084] 图 8 示出了示例性的融合所述低频高分辨率频带  $L_1$  和标准化的高频高分辨率频带  $H_1$  以生成超分辨率处理的图像  $S_1$ 。使用高通滤波器 800 滤波标准化的高频频带  $H_1$ , 以确保与低频频带的频谱兼容性。

[0085] 高分辨率高通滤波器

[0086] 在第一阶段, 滤波器  $F_{h,1}$  与滤波器  $F_{l,0}$ 、 $F_{l,1}$  按照相同的方式设计。在这种情况下, 目标是获得具有截止频率  $\Omega_{1,h} = d/\max(n, d) = d/n$  的高通滤波器。其阶数被设置为低分辨率滤波器阶数的缩放版本:  $N_{1,h} = \text{round}(N_0 n/d)$ , 并且其幅度  $\sigma_{1,h} = 1$ 。可分离高通滤波器的最终系数被设置为与汉明窗的中心对齐的克罗内克符号减去具有相同的截止频率的互补低通滤波器的系数。即, 高通滤波器被定义为全通滤波器 (设置系数等于克罗内克符号) 减去具有与理想的高通滤波器相同的截止频率的低通滤波器。这在图 8b) 中以图示出, 其中左边是高通滤波器的理想频率响应 HP, 右边是全通滤波器 AP 和上述低通滤波器 LP 响应的差。

[0087] 由于上述说明很清楚,高分辨率图像的低频频带  $L_1$  原理上是通过内插获得的,而高分辨率图像的高频频带  $H_1$  原理上是通过外推获得的。

[0088] 图 9 示出了一种用于对数字数据的低分辨率输入数据结构  $S_0$  执行超分辨率处理的设备,包括用于生成去噪掩模  $M$  的去噪掩模生成器 F1b 和包括用于将输入数据结构  $S_0$  分裂成低频输入数据结构  $L_0$  和高频输入数据结构  $H_0$  的第一低通滤波器 970 的分裂模块 975。该设备还包括用于放大所述输入数据结构  $S_0$  的放大器 920、用于滤波所述放大的输入数据结构的第二低通滤波器 930、用于根据去噪掩模  $M$  对所述滤波后的放大输入数据结构进行局部去噪的局部去噪器 F2b(其中获得局部去噪的低频放大数据结构  $L_1$ )、通过外推高频输入数据结构  $H_0$  并标准化外推的高频放大数据结构来生成标准化的高频放大数据结构  $H_{1,n}$  的跨尺度块匹配模块 95(其中外推使用局部去噪低频放大数据结构  $L_1$  和低频输入数据结构  $L_0$  之间的对应关系)、用于对轮廓区域内的标准化的累加的(即,平均的)像素值进行局部去噪的局部标准化器 F3b(从而获得局部去噪的标准化的高频放大数据结构  $H_{1,uf}$ )、用于过滤局部去噪的标准化高频放大数据结构  $H_{1,uf}$  的高通滤波器 995 以及用于组合(例如,逐个像素相加)高通滤波过的局部去噪的标准化的高频放大数据结构  $H_1$  和局部去噪的低频放大数据结构  $L_1$  的组合单元 999(从而获得去噪的超分辨率处理的数据结构  $S_1$ )。具有合适的尺寸的各种存储器  $MemL_0$ 、 $MemL_1$ 、 $MemH_0$ 、 $MemH_1$  可被用于中间存储设备,该中间存储设备可以实现为单个或多个物理存储器。

[0089] 在一个实施方案中,所述分裂模块包括用于对所述输入数据结构  $S_0$  进行滤波的第一低通滤波器 970,其中获得低频输入数据结构  $L_0$ ,和用于计算输入数据结构  $S_0$  和低频输入数据结构  $L_0$  之间的差的加法器、减法器或差分器 980,从而生成高频输入数据结构  $H_0$ 。

[0090] 在一个实施例中,所述跨尺度块匹配模块 95 包括:用于确定在局部去噪的低频放大数据结构  $L_1$  中的第一位置处的第一片的第一确定单元 951;用于在所述低频率输入数据结构  $L_0$  中搜索与第一片最佳匹配的第一块的搜索单元 952;用于确定所述第一块在低频输入数据结构  $L_0$  中的位置的第二确定单元 954;用于选择在高频输入数据结构  $H_0$  中确定的位置处的第二块的选择器单元 955;用于累加所选择的第二块的像素数据到第二片的累加器 957,所述第二片是高频放大数据结构  $H_{1,acc}$  中第一位置处的片;控制单元 950,用于重复处理局部去噪的低频放大数据结构  $L_1$  中的多个片;用于标准化 HF 放大数据结构  $H_{1,acc}$  中累加的像素值的标准化单元 990。

[0091] 去噪掩模生成器 F1b(它还可以被认为是区域选择器块)发现具有高对比度的像素(即,轮廓区域)并选择局部邻域中的所有像素作为轮廓区域的一部分。在一个实施例中,它包括高对比度轮廓检测器模块 F1.1b 和扩大和调整模块 F1.2b。高对比度轮廓检测器模块 F1.1b 通过检测图像导数的高一阶近似(high first order approximation)(例如,通过两个 Sobel 一阶导数估计器)来测量高对比度,并提供 1 个像素宽度的轮廓。扩大和调整模块 F1.2b 将形态扩大(morphologic dilation)应用到轮廓,以便为每个轮廓设置预定义宽度(例如,向轮廓像素两侧 3 个像素)。

[0092] 更多的实施例,其中有一些也在图 1 和 / 或图 9 中示出,在下面描述。

[0093] 在一个实施例中,该方法还包括以下步骤:确定 151、152 在低频输入数据结构  $L_0$  中的第一搜索窗口  $W_1$ ,其中所述第一个搜索窗口  $W_1$  覆盖与所述高频放大数据结构  $L_1$  中的所述第一位置相对应的位置处的块的周围的区域,并且其中在低频输入数据结构  $L_0$  中的搜索

152、154 仅在第一搜索窗口  $W_1$  中执行。所述确定 151、152 在低频输入数据结构  $L_0$  中的搜索窗口  $W_1$  的步骤,对低频放大数据结构  $L_1$  中的每个新片重复执行。

[0094] 在一个实施例中,被所述搜索窗口覆盖的区域包括在与高频放大数据结构  $L_1$  的所述第一位置相对应的位置处的块的周围的低频放大数据结构  $L_0$  的每个方向上的多个值。

[0095] 在一个实施例中,低频放大数据结构  $L_1$  中的每个新片  $P_{n,L1}$  与至少一个先前处理的片重叠。

[0096] 在一个实施例中,低频放大数据结构  $L_1$  通过以放大因子  $n$  对输入数据结构  $S_0$  进行放大 120 获得,通过所述第二低通滤波器  $F_{1,1}$  对放大输入数据结构进行滤波 130,并在缩小单元 940 中以缩小因子  $d$  缩小 140 滤波过的放大输入数据结构,其中  $n > d$ 。因此获得最终的非整数放大因子  $n/d$ 。

[0097] 在一个实施例中,所述第一低通滤波器  $F_{1,0}$  和所述第二低通滤波器  $F_{1,1}$  是等效滤波器(即,关于标准化截止频率)。

[0098] 在一个实施例中,第一低通滤波器  $F_{1,0}$  具有这样的特征:阶数  $N_0$ 、幅度  $\sigma_0 = 1$  和标准化截止频率  $\Omega_0 = d/n$ ,所述第二低通滤波器  $F_{1,1}$  具有这样的特征:阶数  $N_1 = nN_0$ 、幅度  $\sigma_1 = n$  和标准化截止频率  $\Omega_1 = 1/n$ 。

[0099] 在一个实施例中,该方法进一步包括以下步骤:使用高通滤波器  $F_{h,1}$  对所述高频放大数据结构  $H_{1,acc}$  进行滤波。所述的高通滤波器  $F_{h,1}$  具有标准化截止频率  $\Omega_{1,h} = d/\max\{d, n\} = d/n$ 、阶数  $N_{1,h} = \text{round}(N_0 * n/d)$  以及幅度  $\sigma_{1,h} = 1$ 。

[0100] 在一个实施例中,该方法进一步包括以下步骤:确定低频放大数据结构  $L_1$  中的新片  $P_{n,L1}$ ,在低频输入数据结构  $L_0$  中搜索 152、154 与所选择的片  $P_{n,L1}$  最佳匹配的块  $B_{n,L0}$ ,选择 155 高频输入数据结构  $H_0$  中的对应块  $B_{n,H0}$ ,并将所选择的对应块  $B_{n,H0}$  累加 157 到高频放大数据结构  $H_{1,acc}$  中所述新片  $P_{n,L1}$  的位置处的片  $P_{n,H1}$  上。上述步骤对所有片重复,直到完整的低频放大数据结构  $L_1$  被覆盖。

[0101] 在一个实施例中,该方法还进一步包括以下步骤:对高频放大数据结构  $H_{1,acc}$  中的每一像素的贡献的数量进行计数,即,高频输入数据结构  $H_0$  中对高频放大数据结构  $H_{1,acc}$  的一像素有贡献的块的数量。标准化 190 步骤包括然后将累加的  $H_{1,acc}$  中的每一像素的值除以贡献的数量。

[0102] 在一个实施例中,输入数据结构是 2D 数字图像。在另一个实施例中,输入数据结构是 3D 数字图像。数字图像一般可以是数字视频序列的一部分。

[0103] 在一个实施例中,输入数据结构包括数字 2D 数据,并且每个块和每个片包含至少  $5 \times 5$  个值,所述搜索窗口覆盖至少  $9 \times 9$  个值,并且每个片与至少一个较早处理的片重叠至少 2 个值。

[0104] 在一个实施例中,所述装置进一步包括用于 LF 输入数据结构  $L_0$ 、LF 放大数据结构  $L_1$ 、HF 输入数据结构  $H_0$  和 HF 放大数据结构  $H_1$  之中至少一个的中间存储设备的至少一个存储器  $\text{Mem}_{L_0}$ 、 $\text{Mem}_{L_1}$ 、 $\text{Mem}_{H_0}$ 、 $\text{Mem}_{H_1}$ 。

[0105] 在一个实施例中,所述装置进一步包括其中有搜索窗口的搜索单元 952,以及用于在低频输入数据结构  $L_0$  中确定搜索窗口  $W_1$  的确定单元,其中所述搜索窗口  $W_1$  覆盖对应于高频放大数据结构  $L_1$  中的所述第一位置的位置处的块的周围的区域,并且其中所述搜索单元 952 仅在第一搜索窗口  $W_1$  中搜索低频输入数据结构  $L_0$ 。

[0106] 在一个实施例中,所述装置进一步包括用于对高频放大数据结构  $H_{1,acc}$  中的每一像素的贡献的数量进行计数的计数器 953。标准化单元 990 执行将累加的每一像素的值除以贡献的数量的操作。

[0107] 图 10 在 a) 和 b) 示出了图像及其原始频谱。此外,图 10c) 示出了它根据本发明放大之后的图像的频谱,并且图 10d) 示出了使用已知的双三次插值进行传统放大的图像的频谱。可以认识到的是,在这个例子中沿对角线的附加值可见,传统放大图像的限幅频谱得到了改善。换句话说,本发明的一个优点是使得根据本发明进行放大的数据结构的频谱,相较于使用传统方法放大的数据结构的频谱,更加接近原始频谱。该频谱清楚地示出了本发明所公开的方法如何能够合理似真地外推放大图像的缺失的高频(它们可在放大图像更加锐利的轮廓上观察到,这导致形成视觉上更吸引人的图像),而双三次插值则引入了大量的混叠伪像。

[0108] 所公开的方法已经在多个公共可用的、将其较高分辨率的版本进行估计的低分辨率输入图像上实施和测试。在一个实施例中,通常只应用到输入图像的亮度通道,而颜色使用如双三次插值的更快的算法进行放大。在图 10 的例子中,通过三次迭代地将较小的放大因子  $1.5 \times (n = 3, d = 2)$  应用于所述输入图像从而获得超分辨率处理的图像。

[0109] 图 11 示出了在所公开的用于改善超分辨率处理单幅图像的鲁棒性的方法的一个实施例中包括的三个原理阶段。在第一阶段 1110,执行输入图像的基于内插的放大,然后对低分辨率图像执行等效的低通滤波操作,以及对低分辨率图像执行第一去噪操作。第二阶段 1120 包括搜索高分辨率图像中被检查的片和低分辨率低频图像中局部邻域中的片(包括部分重叠片)之间的低频匹配,并累加从低分辨率图像获得的高频贡献。第三阶段 1130 包括标准化和高通滤波,执行第二去噪操作并将高分辨率图像的低频频带的贡献与所述外推的高通滤波过的标准化高频频带相加。

[0110] 图 13 示出了示例性的混叠输入图像(左边)和其对应的去噪掩模(右边)。显然,噪声区域被确定为主要在图像中的边缘或轮廓附近。

[0111] 图 12 示出了在一个本发明的实施例中用于改善抵抗在对数字 1D、2D 或 3D 数据的低分辨率输入数据结构  $S_0$  执行超分辨率处理的方法中的混叠的鲁棒性的方法的流程图。在此实施例中,方法 1200 包括以下步骤:

[0112] 在区域选择器中产生 1205 去噪掩模  $M$ ,包括轮廓检测步骤 1260 以及扩大和调整步骤 1270,

[0113] 将输入数据结构  $S_0$  分裂或分离 1270 为低频输入数据结构  $L_0$  和与低频输入数据结构  $L_0$  互补的高频输入数据结构  $H_0$ ,

[0114] 根据所述输入数据结构  $S_0$  内插 1210 噪声低频放大数据结构  $L_{1,n}$ ,

[0115] 在去噪掩模  $M$  指示为轮廓区域的区域内对噪声低频放大数据结构  $L_{1,n}$  进行局部去噪 1220,由此获得局部去噪的低频率放大数据结构  $L_1$ ,

[0116] 对局部去噪 LF 放大数据结构  $L_1$  执行跨尺度块匹配 1240,包括如上所述的标准化,由此获得标准化的高频放大数据结构  $H_{1,n}$ ,

[0117] 在局部正则化 HF 合成步骤 1250 中,对标准化的高频放大数据结构  $H_{1,n}$  进行局部去噪,由此在去噪掩模  $M$  指示为轮廓区域的区域中进行局部去噪(即,与用于对噪声低频放大数据结构  $L_{1,n}$  执行局部去噪相同的区域),并且由此获得局部去噪的标准化高频放大数

据结构  $H_{1, \text{uf}}$ ,

[0118] 在高通滤波器  $F_{h,1}$  (如上所述) 中对局部去噪的标准化高频放大数据结构  $H_{1, \text{uf}}$  进行滤波 1280, 由此获得高通滤波后的局部去噪的标准化高频放大数据结构  $H_1$ , 以及

[0119] 将所述局部去噪的标准化高频放大数据结构  $H_1$  与局部去噪的低频放大数据结构  $L_1$  相加 1290, 从而获得超分辨率处理的数据结构  $S_1$ 。

[0120] 在各种实施例中, 该方法的一些或所有的步骤或者元件如上面结合图 1 ~ 11 进行的描述。

[0121] 在本发明的一个类似的实施例中, 一种用于改善抵抗在对数字 1D、2D 或 3D 数据的低分辨率输入数据结构  $S_0$  执行超分辨率处理的应用中的混叠的鲁棒性的装置, 包括包含轮廓检测单元以及扩大和调整单元的去噪掩模生成单元; 用于将输入数据结构  $S_0$  分裂或分离成 LF 输入数据结构  $L_0$  和与 LF 输入数据结构  $L_0$  互补的 HF 输入数据结构  $H_0$  的分裂或分离单元; 用于根据输入数据结构  $S_0$  内插 (潜在的噪声) 低频放大数据结构  $L_{1, n}$  的内插单元; 用于在去噪掩模指示为轮廓区域的区域内对噪声低频放大数据结构  $L_{1, n}$  进行局部去噪, 由此获得局部去噪的 LF 放大数据结构  $L_1$  的局部去噪单元; 用于对局部去噪的 LF 放大数据结构  $L_1$  执行跨尺度块匹配 (包括如上所述的标准化), 由此获得标准化 HF 放大数据结构  $H_{1, n}$  的跨尺度块匹配单元; 用于在局部正则化的 HF 合成中对标准化的高频放大数据结构  $H_{1, n}$  进行局部去噪, 由此在去噪掩模指示为轮廓区域的区域内进行局部去噪, 并由此获得局部去噪的标准化 HF 放大数据结构  $H_{1, \text{uf}}$  的局部正则化 HF 合成单元; 用于对局部去噪的标准化 HF 放大数据结构  $H_{1, \text{uf}}$  进行滤波, 由此获得高通滤波后的局部去噪的标准化 HF 放大数据结构  $H_1$  的高通滤波器  $F_{h,1}$  (如上所述); 以及用于将局部去噪的标准化 HF 放大数据  $H_1$  与局部去噪的 LF 放大数据结构  $L_1$  (1D、2D、3D) 相加, 从而获得超分辨率处理的数据结构  $S_1$  的加法器单元。在各种实施例中, 该方法的一些或所有的步骤或者元件如上面所描述。

[0122] 如附图 12 所示, 高对比度轮廓检测块 1260 和扩大和调整块 1270 关联在一起构成区域选择器块 1205, 局部去噪块 1220 和局部正则化 HF 合成块 1250 阻止了潜在存在于输入的低分辨率图像中的混叠的传播。在一个实施例中, 局部去噪块 1220 在区域选择块 1205 所选择的区域中执行正则化机制以除去不必要的高频纹理 (即, 噪声)。最后, 至少对由于 LR 输入图像中存在混叠而导致的伪像, 局部正则化 HF 合成块 1250 生成不存在伪像的高分辨率 HF 频带。

[0123] 在下文中, 将更详细地描述具有高对比度轮廓检测块 1260 以及扩大和调整块 1270 的区域选择器 1205、局部去噪块 1220 和局部正则化 HF 合成块 1250 的实施例。

[0124] 区域选择器

[0125] 该阶段的目的是找到具有高对比度的像素, 并且拾取局部邻域中的所有像素作为轮廓区域的一部分。在一个实施例中, 高对比度被测量为图像导数的一阶近似。该区域选择器模块 1205 为后续阶段提供去噪掩模  $M$ 。

[0126] 高对比度轮廓检测块

[0127] 在该阶段中, 两个 Sobel 一阶导数估计器被用于获得垂直和水平图像导数。然后, 水平或垂直导数高于特定阈值 (例如, 0.1) 的所有像素被选择为轮廓像素, 后面的细化阶段提供 1 个像素宽度的轮廓。这一技术中是图像处理中的标准。在其他实施例中, 该阶段被实现为专用混叠检测器, 或两种方法的组合。

[0128] 在所有情况下,目的是选择图像中易于受到混叠伪像影响的区域。

[0129] 扩大和调整块 1270

[0130] 作为另一个标准技术,应用形态扩大以便为轮廓设置预定义的宽度(例如,朝向轮廓像素两侧 3 像素)。这限定了具有潜在伪像的区域,特别是混叠导致的伪像,它将在后续阶段中进行处理。

[0131] 因为剩余的计算将在具有对应于最终的超分辨率处理的图像的尺寸的图像(或者子图像)中进行,因此扩大的轮廓被放大以匹配超分辨率处理的图像的分辨率。

[0132] 局部去噪块 1220

[0133] 对于下面的计算,令  $x_1$  为通过放大输入的低分辨率图像  $I_0$  所获得的超分辨率处理的图像的内插 LF 频带(即,  $x_1$  对应于图 12 中  $L_{1,n}$ , 以及  $I_0$  对应于  $S_0$ )。然后,我们想要获得 SR 图像的 LF 频带的无混叠估计。已知混叠伪像的结构,即小尺度高频变化 (small scale high-frequency variation),我们将除去混叠的问题转化为区域选择器 1205 选择的感兴趣区域内的去噪问题。所述模型被定义为

$$[0134] \quad M(L_1) := \min_{x_1} \{ \|M(L_1 - x_1)\|_2^2 + \lambda M(\|\nabla L_1\|_1) \} \quad (1)$$

[0135] 换句话说,总变差 (TV) 正则化矩阵被施加到由二进制掩模(或信令函数)  $M$  所定义的感兴趣区域上。正则化因子  $\lambda$  的值必须被如此设定以使得它除去不想要的伪像的同时保持细节。这可以通过标准化互相关方法解决。在实践中,0.05 附近的值(例如 0.03 至 0.07)表现良好。这种类型的正则化矩阵的目的是除去具有包含混叠的潜在风险的区域内不想要的 HF 结构。 $L_1$  的其余像素(掩模  $M$  指示为不是轮廓区域的那些像素)被设定为  $x_1$  中包含的值。

[0136] 为了找到上述函数的最小值,应用迭代梯度方法,它需要足够的迭代次数(例如 100)以收敛于最优值。找到迭代解(其中超级索引  $t$  和  $t+1$  表示迭代)为:

$$[0137] \quad M(L_1)^{t+1} := M(L_1)^t - \mu^t \nabla \{ \|M(L_1^t - x_1)\|_2^2 + \lambda M(\|\nabla L_1^t\|_1) \}. \quad (2)$$

[0138] 步骤  $\mu^t$  被初始化为相对较高的值,例如,0.1 ( $\pm 10\%$ ),当问题远离收敛时,第一代期间允许较大的变化。 $\mu$  的选择的实际示例为,  $\mu^{ini} = 0.1$ ,  $\mu^{end} = 0.01$ , 以及

$$[0139] \quad \mu^t := \mu^{t-1} \times (\mu^{end} / \mu^{ini})^{(1/(nmax-1))} \quad (2a) \quad \text{其中 } nmax \text{ 是迭代的最大次数。然后}$$

$\mu$  在每次迭代中按指数规律地减少,使得在最后的迭代中,当问题接近收敛时,仅允许接近最优的解的较小变化。每当梯度的幅度  $\nabla \{ \|M(L_1^t - x_1)\|_2^2 + \lambda M(\|\nabla L_1^t\|_1) \}$  落在某一给定的门限之下或达到迭代的最大次数时,该方法就终止。

[0140] 在局部去噪块 1220 的输出处,获得超分辨率处理的图像的 LF 频带的新版本,其极大地减少了至少那些由区域选择器 1205 检测的区域中输入图像的空间混叠所导致的伪像的存在。

[0141] 局部正则化 HF 合成块 1250

[0142] 类似于局部去噪块 1220,混叠被建模为在具有高对比度围绕轮廓的区域内存在 HF 信息。而在非轮廓区域中,高频带内每一个像素的值被生成来自  $N_c$  个重叠片的贡献的平均值,如上所述,这种贡献在选择区域(即轮廓区域)内正则化以中和,或者至少降低超分辨率处理的图像中混叠的传播。

[0143] 为了在下文中简化表示,我们假设每个像素获得相同数量的重叠贡献(尽管这可能对例如靠近轮廓的像素不成立),并且每个像素来自固定距离处的图像模块的贡献被组合在完全(complete)噪声高频频带  $X_i, i = \{1, \dots, N_c\}$  中。

[0144] 令  $H_1$  为将通过利用跨尺度自相似性合成的想要的 SR 图像(高通滤波之前)的 HF 频带。然后,由也在局部去噪块 1220 中使用的指示函数(即,去噪掩模)  $M$  发出信号指示的感兴趣区域的 HF 频带表示为:

$$[0145] \quad M(H_1) := \min_{H_1} \left\{ \left\| \sum_{i=1}^{N_c} M(H_1 - X_i) \right\|_2^2 + \lambda M(\|\nabla H_1\|_1) \right\} \quad (3)$$

[0146] 采用相同的梯度下降方法以最小化该函数并定义由潜在受到混叠影响的像素的掩模(即,去噪掩模)  $M$  发出信号指示的高频频带的内容。剩下的像素如上所述被设定为贡献的平均值。如果我们定义了  $N$  为与  $M$  互补的掩模,使得在图像的各处  $M+N = 1$ ,那么完整的合成高频频带的组成为:

$$[0147] \quad H_1 = M(H_1) + N \left( \frac{1}{N_c} \sum_{i=1}^{N_c} X_i \right) \quad (4)$$

[0148] 改善的鲁棒性的优点在于:由此获得的超分辨率处理的图像在具有高对比度轮廓的区域内不含伪像,所述具有高对比度轮廓的区域是较可能发生混叠的区域。因此,在正常的超分辨率处理导致输入图像中整个混叠的高对比度轮廓上出现不想要的波动的图像中,由于改进的鲁棒性将获得在感知上更真实和锐利的超分辨率处理结果。此外,该方法可以高效地实现在 GPU 或其他并行处理器上。它可以用在当只有一个图像可用时可以正确地超分辨率处理混叠的输入数据的、包括多核心处理器的超分辨率处理算法的图像系统中。

[0149] 作为另一个优点,所公开的方法在计算上相对高效(它只需要单幅图像,并且主要处理步骤是小尺寸局部搜索),放大因子的定义是灵活的(它使得可以使用合理的放大因子和直接 FIR 滤波器设计),并且也可以推广为对不同性质的信号进行处理(不需要有关信号模型、超越局部自相似性的先验假设)。

[0150] 本发明的再一个优点在于,只使用输入数据结构的单个放大过程,并且外推根据原始分辨率的输入数据结构执行。因此,由放大所引入的伪像的数量得以最小化,这特别有利于合理的放大因子,以及较宽的高频频带可用于增强高频率高分辨率数据结构中的信息。

[0151] 本发明的另一个优点是提供了用于设计滤波器的清晰的、简单的规则,并且由于它们是空间不变的,因此滤波器只需要设计一次。

[0152] 本发明的另一个优点是,由于空间平均,高频高分辨率数据结构  $H_1$  比之使用传统方法所获得的其他的高频高分辨率数据结构对噪声和其他伪像具有更多的鲁棒性。

[0153] 本发明的另一个优点是在于,用于融合内插的低频率高分辨率频带  $L_1$  和外推的高频高分辨率频带  $H_1$  的过程考虑它们之间的频谱相干性(spectral coherence)。这通过对高频高分辨率数据结构的高通滤波器的合理设计而实现。

[0154] 在上述方案中,子索引 0 用于表示低分辨率图像,子索引 1 用于表示超分辨率处理的图像。大写字母 L 和 H 分别对应于低频频带和高频频带。索引 acc、n 和 uf 代表“累加”、“标准化/噪声”和“未滤波”。

[0155] 应当注意,虽然简单地示出为单幅数字图像,但是也可以构建除了数字图像以外的其他类型的数字数据结构,这对于本领域的普通技术人员来说是显而易见的,所有这些

都被认为落在本发明内。类似的原理也可以应用于其他图像处理任务,如图像去噪或其他恢复过程,也可用于获得不同性质和维数的超分辨率处理信号,例如音频信号。此外,尽管在本文描述的实施例中,局部去噪被分别地应用到由去噪掩模所限定的区域中的 HR 图像的 HF 频带和 HR 图像的 LF 频带的像素上,但是当局部去噪应用到 HR 图像的 HF 频带和 LF 频带上的至少一个时,也可实现有利的效果。

[0156] 虽然所公开的方法和装置对单幅图像进行操作,但是有利地不需要数据库以获取足够多包含高频部分(即细节)的实例。

[0157] 虽然这里已经示出、描述和指出了本发明应用于其优选实施例的根本新颖特征所在,但是应当理解,本领域的技术人员可以在不脱离本发明的精神的情况下对所描述的装置和方法、所公开的设备的形式和细节以及它们的操作做出各种省略、替换和改变。示例性地,尽管本发明已经公开为关于正方形块和片,但是本领域技术人员将认识到,本文所述的方法和设备可应用于其他形状和/或尺寸的块和片,例如矩形形状或自由形式的形状、 $4 \times 4$ 、...  $16 \times 16$ 、正方形等。此外,尽管本发明已经公开为关于空间分辨率,但是本领域技术人员则将认识到,本文所述的方法和设备在必要的修改的情况下可以应用于时间分辨率。这里明确表明的是,以基本相同的方式执行基本相同功能获得相同结果的这些元素的所有组合都在本发明的范围内。将一个所述实施方案中的元件用另一个替代也是完全在预期内并可以考虑的。

[0158] 应当理解,本发明已经仅通过示例描述,可以在不偏离本发明范围的前提下进行细节上的修改。

[0159] 本说明书以及(在适用时)权利要求和附图中公开的每一特征可以单独或以任何合适的组合的方式提供。特征可以适当地被实施为硬件、软件或两者的组合,例如,在图形硬件(GPU)上。权利要求中出现的参考标号仅作为示例,而不应对权利要求的范围有任何限制影响。

[0160] 引用的参考文献

[0161] 《Super Resolution from Image Sequences》, M. Irani 和 S. Peleg(Int. Conf. on Pattern Recognition, 1990)

[0162] 《Fundamental Limits of Reconstruction-Based Super resolution Algorithms under Local Translation》, Z. Lin 和 H. -Y. Shum(IEEE Trans. On Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2004)

[0163] 《Example-based super-resolution》, W. T. Freeman, T. R. Jones 和 E. C. Pasztor(IEEE Computer Graphics and Applications, 2002)

[0164] 《Super-Resolution from a Single Image》, D. Glasner, S. Bagon 和 M. Irani(IEEE Int. Conf. on Computer Vision, 2009)

[0165] 《Space-Time Super-Resolution from a Single Video》O. Shahar, A. Faktor 和 M. Irani(IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition, 2011)

[0166] 《Image and Video Upscaling from Local Self-Examples》, G. Freedman 和 R. Fattal(ACM Trans. On Graphics, 2010)

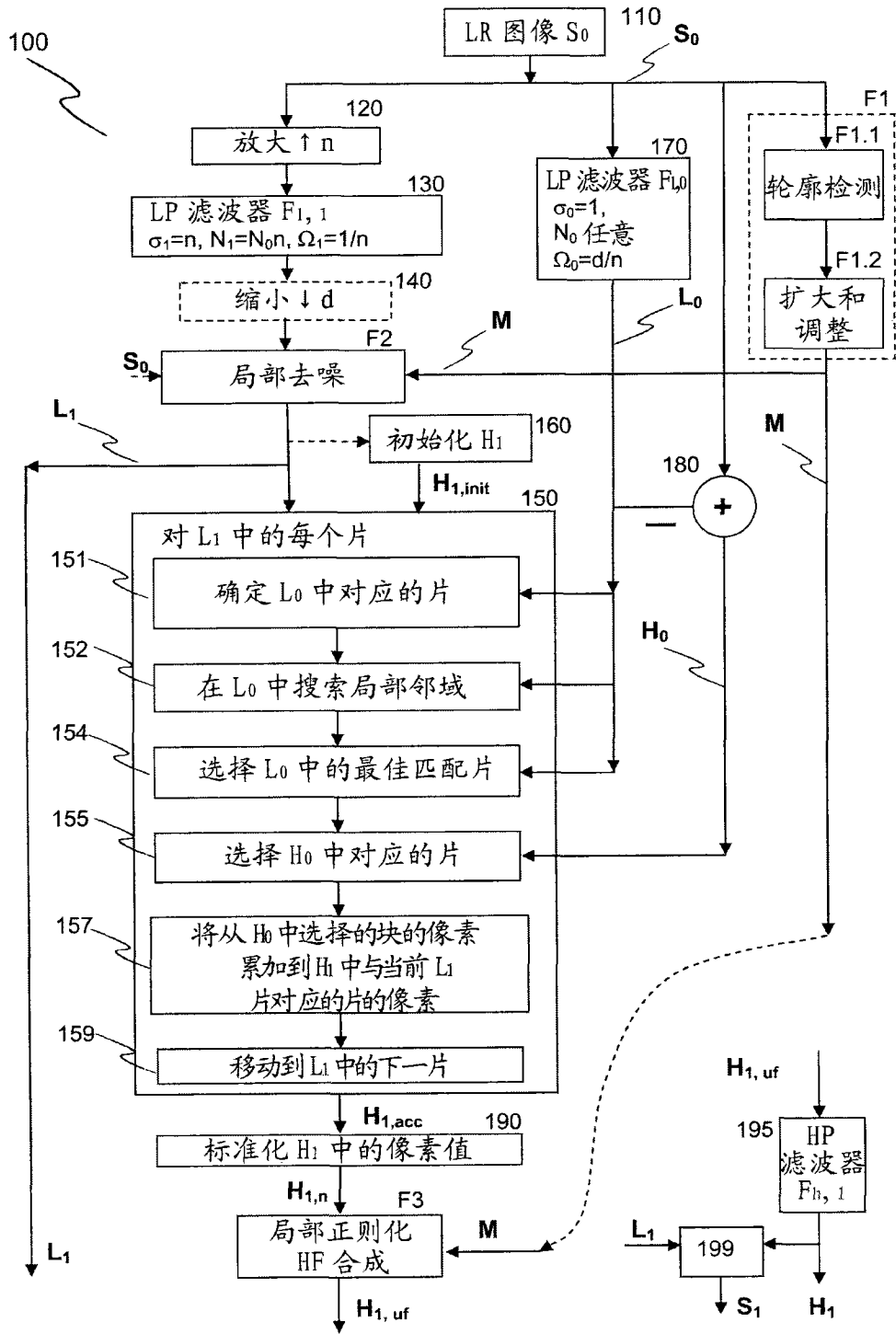


图 1

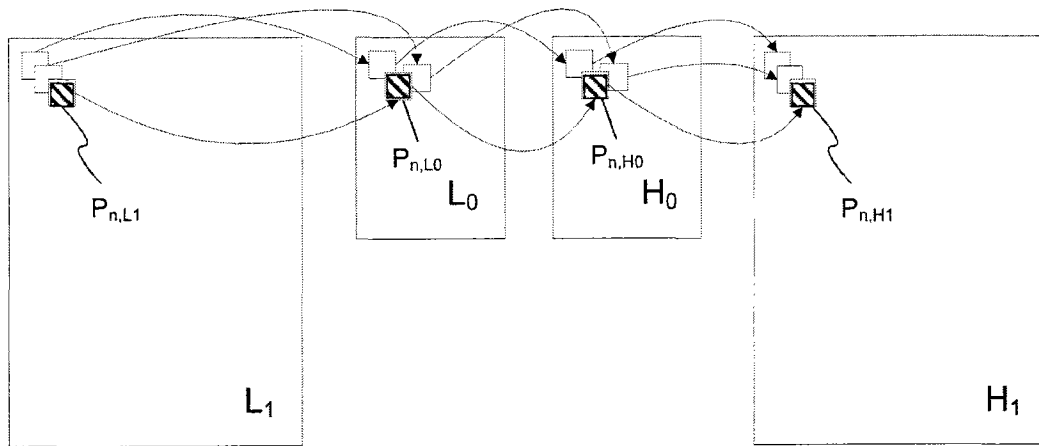


图 2

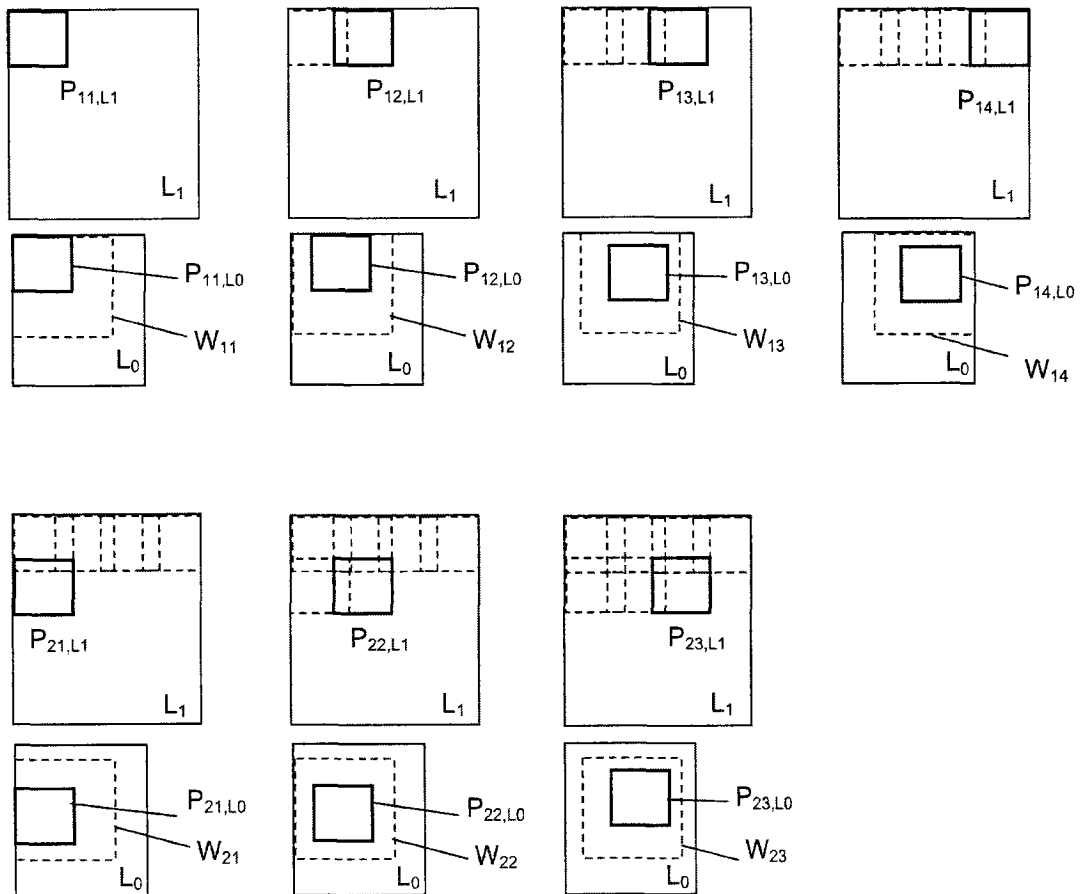


图 3

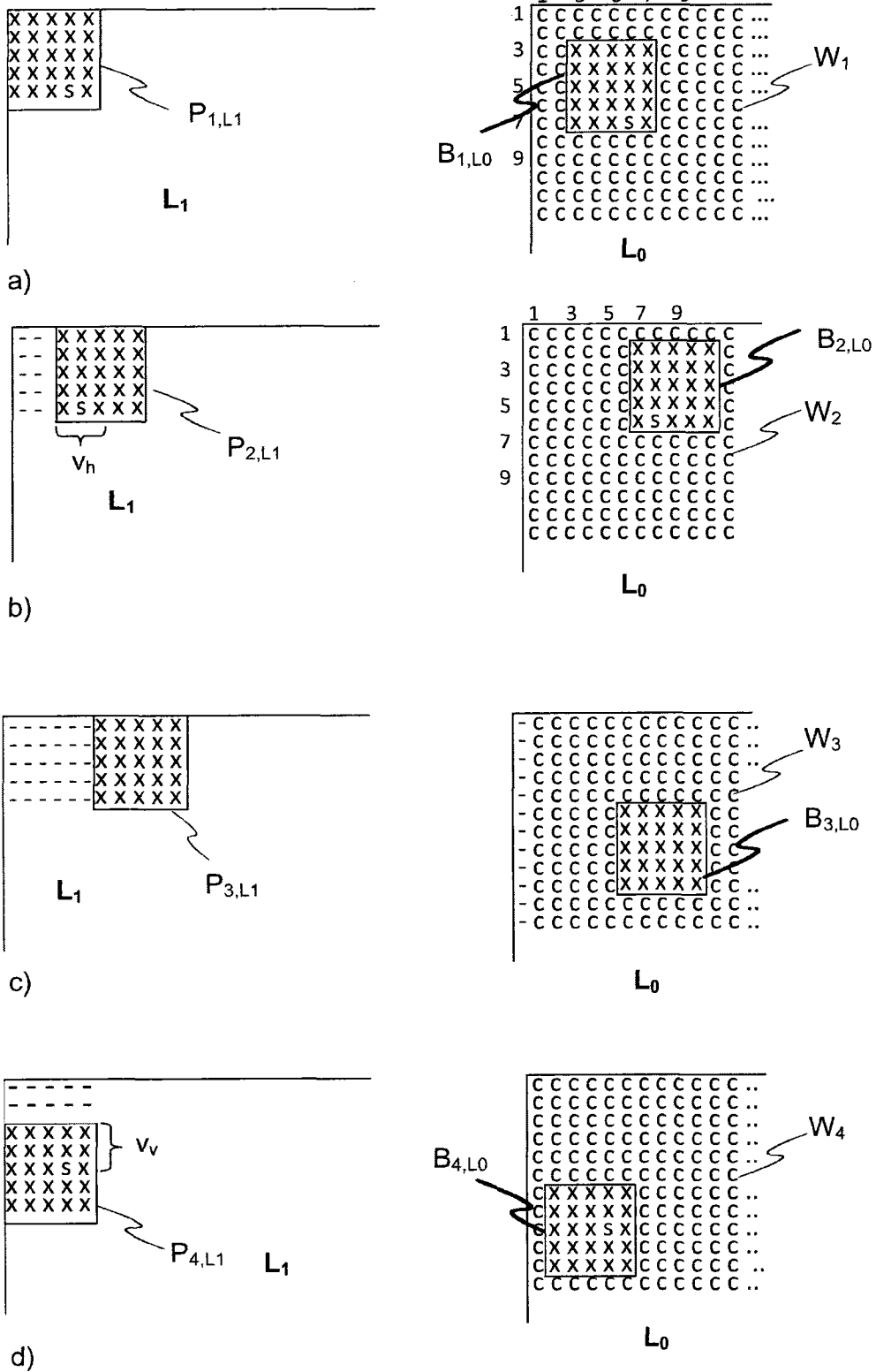


图 4

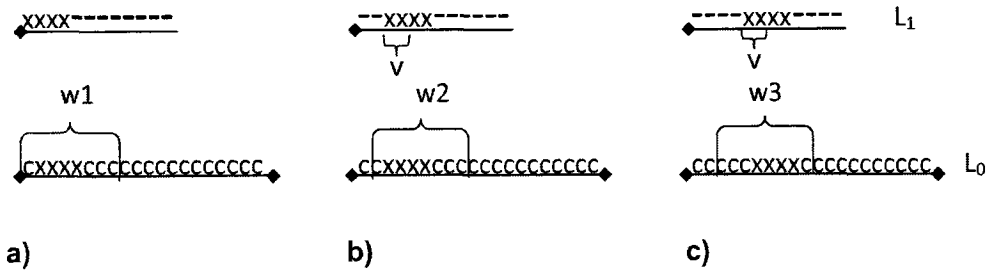


图 5

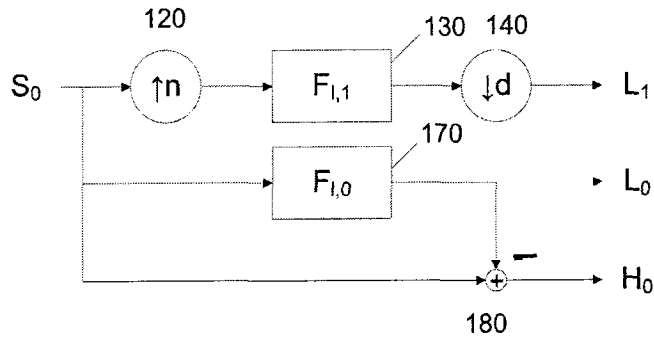


图 6

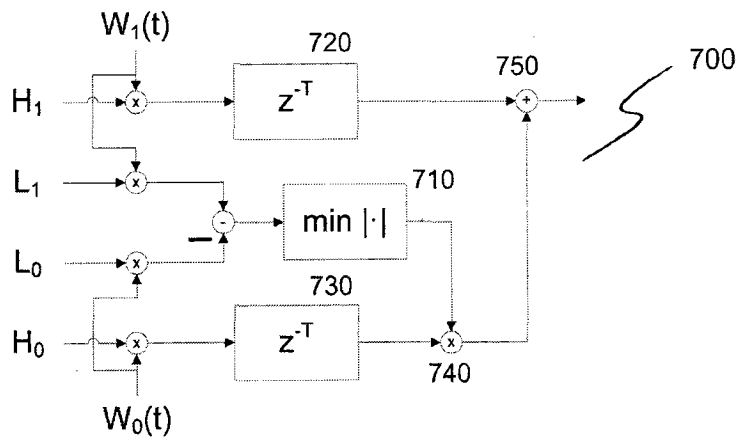


图 7

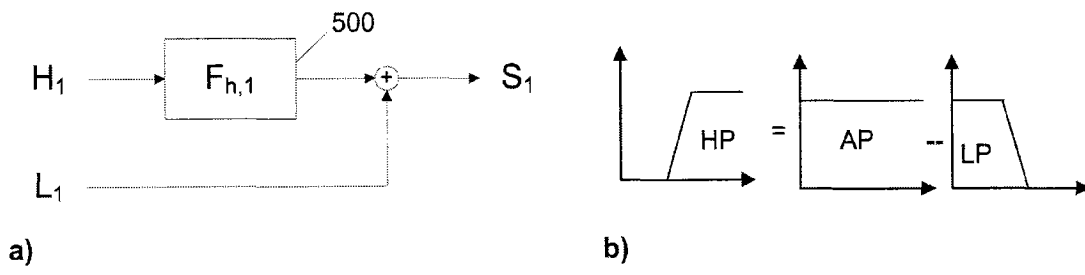


图 8

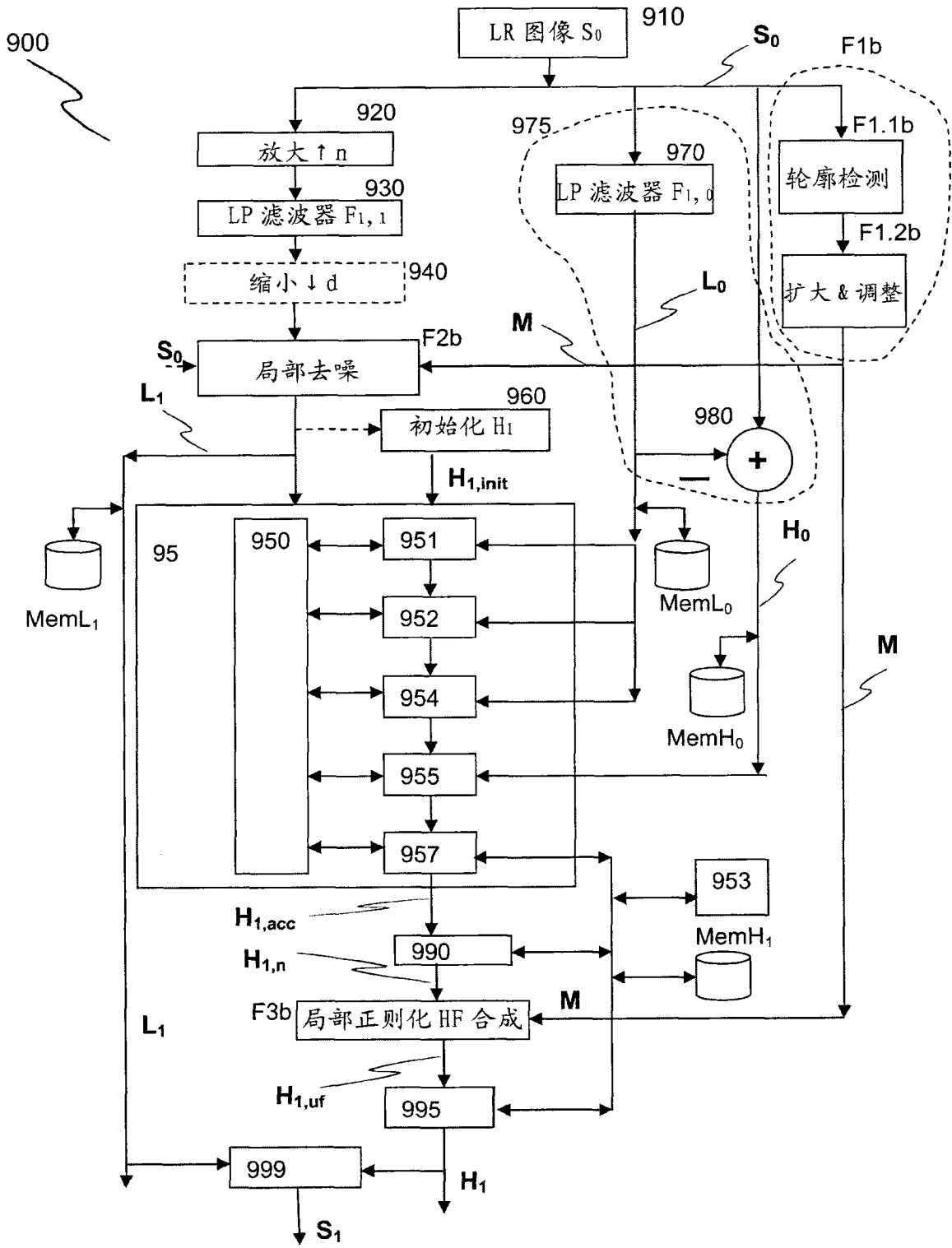


图 9

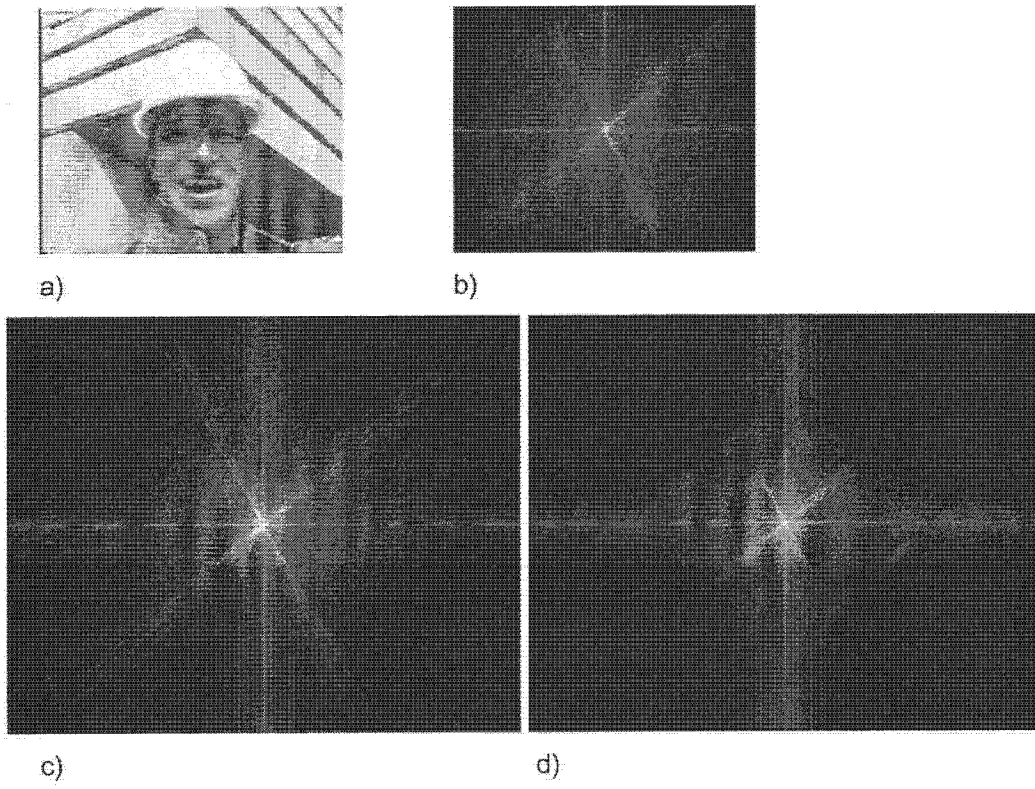


图 10

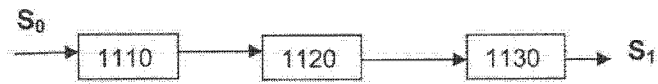


图 11

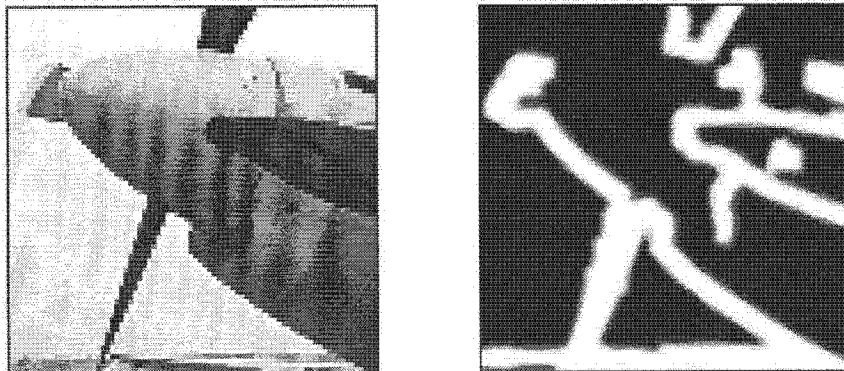


图 13

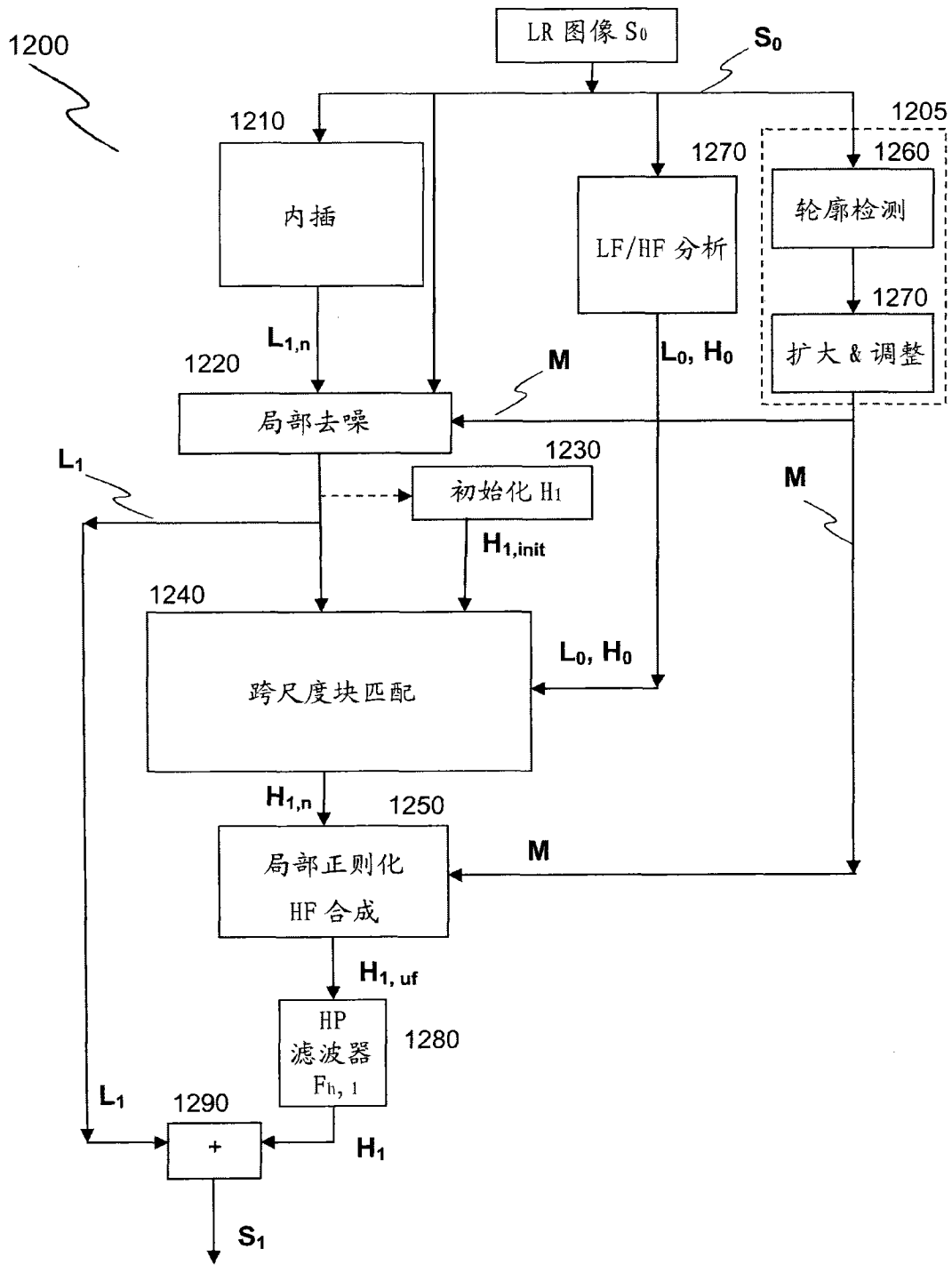


图 12