

图像逆半调及其质量评价综述

渠星星¹ 张帆^{1,2} 刘斌¹ 张偌雅¹

(河南大学计算机与信息工程学院 开封 475000)¹ (河南大学图像处理与模式识别研究所 开封 475000)²

摘要 数字半调是数字印刷乃至现代印刷的核心技术之一。半调可使连续色调图像转换为二值图像。如需对半调图像作分类识别、图像压缩、图像增强等处理,就应先让半调图像重建为连续色调图像,即进行逆半调处理。首先介绍了半调图像的不同发展阶段,然后对已有的逆半调方法根据不同的图像恢复依据进行了分类介绍,并对重建的逆半调图像的质量进行了客观评价,最后总结了已有逆半调方法的不足,并指出了未来可改进的关键方向。

关键词 图像处理,数字半调,逆半调,质量评价

中图法分类号 TP751.1 文献标识码 A

Survey on Image Inverse Halftoning and its Quality Evaluation

QU Xing-xing¹ ZHANG Fan^{1,2} LIU Bin¹ ZHANG Ruo-ya¹

(School of Computer and Information Engineering, Henan University, Kaifeng 475000, China)¹

(Institute of Image Processing and Patter Recognition, Henan University, Kaifeng 475000, China)²

Abstract Digital halftoning is one of the core technologies in the digital printing and modern printing. Halftoning can be used to convert continuous tone images into binary images. Inverse halftoning is essential in the processing of classification recognition, image compression and image enhancement based on halftoning images. In the paper, different development stages of halftoning images were introduced above all. And then current inverse halftoning methods were classified by different image restoration gist. Next, objective evaluation about the quality of reconstructed inverse halftoning images were carried out. Lastly the deficiency of current inverse halftoning methods were summarized, along with the key directions can be improved in the future.

Keywords Image processing, Digital halftoning, Inverse halftoning, Image quality assessment

1 引言

图像“半调”(halftone)又称为半色调、半影调,是指用二值灰度近似模拟多级灰度的过程。半调技术的发展经历了模拟半调(Analog Halftoning)和数字半调(Digital Halftoning)两个阶段^[1]。模拟半调又叫做“照相半调”,是利用网屏对光线分割的特性将连续图像分解成具有不同大小网点的半调图像的技术,但这种半调技术得到的半调图像效果主要取决于感光介质,且整体效果不太理想。数字半调也被称作“空间抖动”,是利用数字信号处理技术将连续色调图像转变为等观感二值半色调图像的技术^[2],由于人眼感知被测物体的灰度与该物体同人之间的距离相关,而且人眼视觉又具有低通特性,因此在一定观察范围内观察半调图像时,视觉上近似于原始连续色调图像。因此,该项技术被广泛应用于印刷、打印和显示连续色调图像,在降低图像再现的成本的同时提高了图像再现的质量^[3]。

逆半调技术起源于 20 世纪 90 年代初,由半调图像重建为连续色调图像的过程称为逆半调,是一种图像恢复技术。

在传真、印刷图书、数字化文本等情况下,只能获取到半调图像,如需对半调图像进行分类识别、图像压缩、图像增强等操作^[4],只能使用连续色调图像,为了处理这类图像,逆半调技术研究随之逐步展开。

半调过程是量化操作将多级灰度转变为二级灰度的过程,属于多对一映射,因此逆半调过程不存在唯一解,是一种不适定问题^[5-7]。此外,半调处理引入的噪声主要分布在结果图像的中、高频分量当中,和图像的细节、边缘混淆在一起,增加了逆半调问题的解决难度。若要提高逆半调处理图像的质量,就必须掌握足够的半调先验知识,并充分利用半调的先验知识,有针对性地消除半调处理过程中引入的噪声,同时尽可能减少图像细节信息的丢失。

2 逆半调技术

半调处理 H 是引入噪声的过程^[8],因此逆半调处理 H^{-1} 应该是一个去除噪声的过程。若记输入 $x_{i,j} \in [0, g]$ 的原始连续色调图为 x ,输出半调图像为 b ,有序抖动模板或误差扩散核为 $\theta^{[9]}$,则半调系统模型如式(1)所示。

本文受国家自然科学基金(61305042)资助。

渠星星(1992—),女,硕士生,主要研究方向为数字图像处理, E-mail: zhangfan@henu.edu.cn;张帆(1967—),男,博士,教授,主要研究方向为数字图像处理、模式识别;刘斌(1988—),男,硕士生,主要研究方向为数字图像处理;张偌雅(1993—),女,硕士生,主要研究方向为数字图像处理。

$$b = H(x, \theta) \quad (1)$$

其中,

$$x = \{x_{i,j} | x_{i,j} \in [0, g], 1 \leq i \leq M, 1 \leq j \leq N\}$$

$$b = \{b_{i,j} | b_{i,j} \in [0, 1], 1 \leq i \leq M, 1 \leq j \leq N\}$$

因此,逆半调系统 H^{-1} 的求解可有以下两种不同的方法^[10]。

第一种 半调图像 b 经逆半调处理产生连续色调图像 \hat{x} , 要求在一定距离观察两幅图像时, b 和 \hat{x} 是相似的, 即: 寻求映射 H_1^{-1} , 满足式(2)。

$$[\hat{x} = H_1^{-1}(b)] \cap [\hat{x} \approx b] \quad (2)$$

第二种 半调图像 b 经逆半调处理产生连续色调图像 \hat{x} , 要求 \hat{x} 被重新半调处理后, 产生的半调图像仍然是 b , 即: 寻求映射 H_2^{-1} , 满足式(3)。

$$[\hat{x} = H_2^{-1}(b)] \cap [H(\hat{x}, \theta) = b] \quad (3)$$

在半调图像再处理的应用需求驱动下, 逆半调技术研究取得了一定的成果。公开报道的逆半调方法主要分为 3 个子类: 滤波法^[11,12]、机器学习法^[13] 和最优化估计法^[14]。其中, 通常以式(2)为标准求解逆半调图像的方法是滤波法和机器学习法, 以式(3)为标准求解逆半调图像的方法是最优化估计法。

2.1 低通滤波法

连续图像进行半调处理时, 将半调噪声引入到了图像的高频区域, 因此消除半调高频噪声最直接、最简单的方法是进行低通滤波, 单低通滤波虽然能消除多数的半调噪声, 但与此同时也将图像的部分边缘和细节误认为是半调噪声而滤除, 使逆半调图像比原图看起来要模糊许多。

为了解决应用单一滤波器使逆半调图像过于模糊的问题, Kern 通过迭代使用低通滤波器和非线性统计平滑的方法来解决^[15]。先对半调图像进行 K 次迭代处理, 最后再进行一次低通滤波处理来得到最终逆半调结果。该算法框架如图 1 所示。

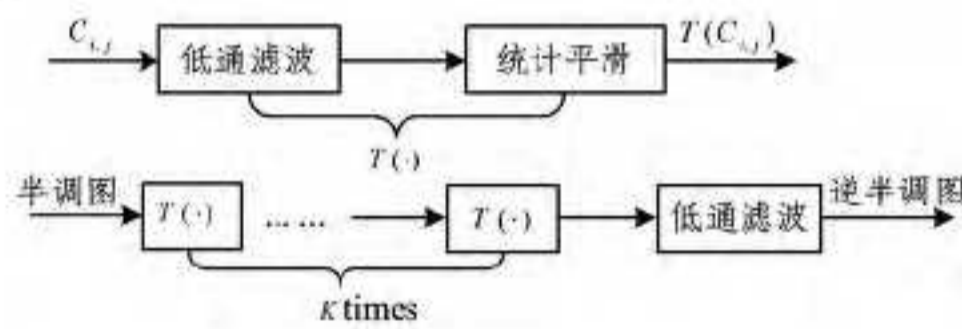


图 1 低通滤波、平滑算法框架

为了消除高频噪声并在一定程度上避免图像过于模糊, 该算法中的低通滤波器采用高斯函数, 其截止频率为图像采样频率的 $1/4$ 。此外, 经过低通滤波处理减少了图像的高频部分, 避免了进行非线性统计平滑时产生不希望的干扰。

非线性统计平滑是在像素点的领域上进行的, 设经低通滤波处理后的图像的像素点为 x^{old} , 假设它的邻域为 $R_{i,j}$, 邻域的像素均值为 $u_{i,j}$, 邻域的像素变化的特征值为 $v_{i,j}$, 可以根据式(4)、式(5)来计算该像素点的统计平滑结果:

$$u_{i,j} = \frac{1}{\|R_{i,j}\|} \sum_{(i,j) \in R_{i,j}} x^{old} \quad (4)$$

$$v_{i,j} = \left[\frac{1}{\|R_{i,j}\|} \sum_{(i,j) \in R_{i,j}} |x^{old} - u_{i,j}|^{\gamma} \right]^{\frac{1}{\gamma}} \quad (5)$$

其中, $\|R\|$ 为集合 R 所包含的元素个数, γ 为调整输出结果的变参。当 $\gamma=2$ 时, $v_{i,j}$ 表示点 (i,j) 在 $R_{i,j}$ 内的标准差。

然后用阈值 $u_{i,j} - \gamma v_{i,j}$ 和 $u_{i,j} + \gamma v_{i,j}$ 与原像素点比较以确定该像素点的输出值 x^{new} 。

$$x^{new} = \begin{cases} u_{i,j} + \gamma v_{i,j} & \text{if } x^{old} > u_{i,j} + \gamma v_{i,j} \\ u_{i,j} - \gamma v_{i,j} & \text{if } x^{old} < u_{i,j} - \gamma v_{i,j} \\ x^{old} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

显然, 逆半色调图像的光滑程度可以由 γ 来控制。对初始迭代输入图像应设最小的 γ 值; 当对输入图像作一次 $T(\cdot)$ 迭代处理后, 图像会变得比较光滑, 为了在平滑图像时尽可能多地保留细节, 进行下一次迭代处理时要适当增加 γ 的值。由此可知, γ 的值会随着迭代次数的增加而增大, 因此 γ 的初始值、取值间隔和最大值的选取就十分重要。经过多次实验, Kern 认为 γ 的值一般不能超过 1, 初始值为 0.25, 终值为 1, 迭代次数为 8 时, 得到的逆半调图像效果最好^[16]。

2.2 快速逆半调算法

由低通滤波算法可知, 若只对半调图像进行简单的低通滤波处理不能有效地消除半调噪声, 还会使图像的边缘和细节部分模糊。为了解决这个问题, 相继出现了各种改进的快速滤波算法^[17-19], 其中, Damera-Venkata 提出了快速逆半调算法^[20], 该算法在高斯低通滤波的基础上, 通过对图像边界信息的提取和修正, 最后合成逆半调图像, 该算法在消除半调噪声的同时, 使逆半调图像结果变得更加清晰, 其算法框架如图 2 所示。

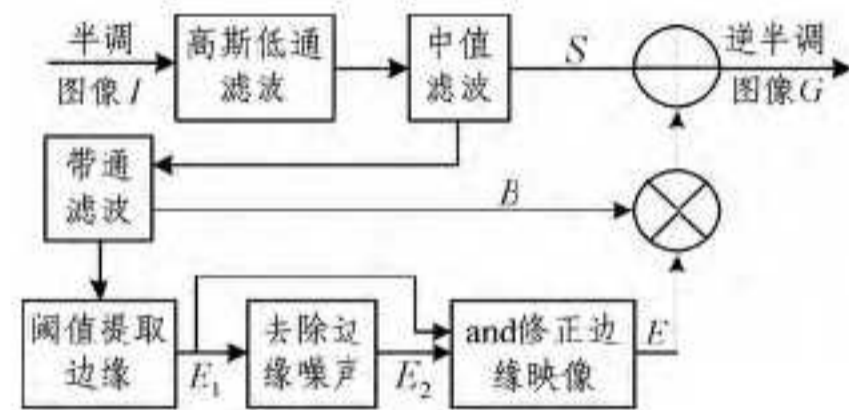


图 2 快速逆半调框架

算法具体步骤可描述如下。

第一步: 依次选取一个线性平滑滤波器和一个非线性平滑滤波器对输入半调图像 I 进行初步去噪处理得到平滑背景 S 。其中选取的线性滤波器是一个 $9 \times 9, \sigma^2 = 1.4$ 的高斯低通滤波器, 这样能在不模糊边缘的前提下消除噪声, 而非线性滤波器采用 3×3 的中值滤波器。

第二步: 提取出图像 S 的边缘信息 B , 引入一个大小为 13×13 的带通滤波器来估计图像 S 的边缘。而该带通滤波器可以用两个方差分别为 $\sigma^2 = 1$ 和 $\sigma^2 = 0.5$ 、大小为 7×7 的高斯滤波器来等价实现。对图像 S 进行带通滤波处理后可以得到两幅图像: 图像 C 和图像 D , 两幅图像的差即是所要提取图像 S 的边缘信息 $B = C - D$ 。

第三步: 利用阈值函数 $t \in \{0, 1, 2, 3\}$ 对 B 进行界限操作, 可得到一个二值的边缘映像 E_1 :

$$E_1(i,j) = T(B) = \begin{cases} 1, & |B(i,j)| > t \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (7)$$

由于 B 中仍存在噪声, 孤立的噪声点可能被误判为边缘, 因此需要再次利用 5×5 的中值滤波器处理边缘 E_1 , 得到修正后的边缘 E_2 。

$$E_2(i,j) = \begin{cases} 1, & n(i,j) \geq M \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (8)$$

其中, $n(i,j)$ 是 $E_1(i,j)$ 中心为 5×5 邻域内“1”的个数。把修正后的边缘 E_2 与原边缘映像 E_1 做“逻辑与”操作得到最后

的边缘映像 E 。

第四步: 将平滑背景 S 与边缘信息 B 按式(9)整合得到逆半调图像 G 。

$$G(i,j) = \begin{cases} S(i,j), & E(i,j) = 0 \\ S(i,j) + G \times B(i,j), & \text{else} \end{cases} \quad (9)$$

Damera-Venkata 经过大量实验得出结论, 当 $t=2, M=4, G=0.07$ 时逆半调图像效果最好^[20]。

2.3 基于小波变换的逆半色调算法

小波变换可以有效分离、合并信号的高频和低频信息, 所以可将小波变换应用到半调图像的去噪处理当中。首先用小波变换提取图像的高频细节信息和低频近似信息, 然后对高频细节信息进行去噪处理, 对低频近似图像信息进行保边缘处理, 再利用小波逆变换将处理后的两幅图像重建, 从而得到去噪后的图像。

为了保持图像的边缘信息, 许多学者提出了背景与边缘分离的小波变换域处理方法^[21, 22], 其中 Z. Xiong 提出来的基于小波变换的逆半调算法^[23]去噪保边效果最好, 该方法要对半调图像进行两次小波分解, 初级小波分解是为了使半调图像的高频细节信息与低频近似信息分离, 然后对于低频近似信息, 需要再次对它进行两级小波分解, 并进行保边缘去噪处理, 其次对高频细节信息通过高低通滤波来去除半调噪声, 最后通过小波逆变换进行重构, 就得到了逆半调图像。该算法的框架如图 3 所示。

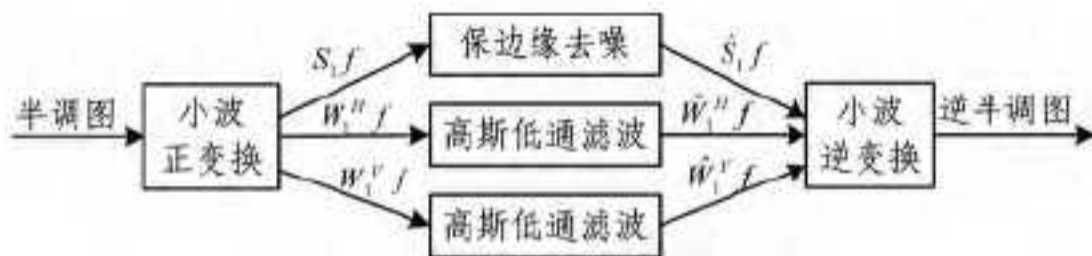


图 3 基于小波变换的逆半调算法框架

算法具体步骤可描述如下。

第一步: 对半调图像作小波一级正变换, 将半调图像分解为一幅低频图 S_1f 、垂直方向高通图 W_1^Hf 、水平方向高通图 W_1^Vf 。

第二步: 采用式(10)所示的高斯函数分别对垂直高通细节图 W_1^Hf 和水平高通细节图 W_1^Vf 进行低通滤波, 消除半调噪声, 得到 \hat{W}_1^Hf 和 \hat{W}_1^Vf 。

$$h(m,n) = ke^{-(m^2+n^2)/2\sigma^2} \quad (10)$$

其中, $m, n \in [3, 3], k$ 为缩放系数, σ^2 为控制滤波器的响应频率。Xiong 经过大量实验证实当 $\sigma^2=2$ 时去噪效果最好^[22]。

第三步: 经过一级小波分解后, 低频近似图像 S_1f 中仍然含有大量半调噪声, 为了有效消除半调噪声, 需要对其进行二级小波变换保边缘去噪处理。即

(1) 对图像 S_1f 再进行两次小波分解, 得到原始输入半调图像的二级、三级小波分解边缘系数 W_2^Hf, W_2^Vf 和 W_3^Hf, W_3^Vf 。

(2) 如式(11)所示, 将图像的二、三级小波分解系数对应相乘, 得到其错级相关积, 并以此判断该点是否为噪声。

$$\begin{cases} E^H(m,n) = W_2^Hf(m,n)W_3^Hf(m,n) \\ E^V(m,n) = W_2^Vf(m,n)W_3^Vf(m,n) \end{cases} \quad (11)$$

其中, $m \in [0, M-1], n \in [0, N-1]$, 图像大小为 $M \times N$ 。

(3) 如式(12)所示, 将求得的错级相关积与输入图像相乘得到水平和垂直方向的两幅边缘提取图像。给定阈值 T , 将

两幅边缘提取图像之和与阈值 T 进行比较, 确定近似图像 S_1f 中的边缘信息 $E(m,n)$, 在 Xiong 的实验取 $T=60$ ^[23]。

$$E(m,n) = \begin{cases} 1, & E^Hf(m,n) + E^Vf(m,n) > T \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (12)$$

(4) 依照式(13)对 S_1f 进行保边缘去噪处理。

$$\begin{cases} \hat{W}_2^Hf(m,n) = 0, & E(m,n) = 0 \\ \hat{W}_2^Hf(m,n) = W_2^Hf(m,n), & E(m,n) \neq 0 \end{cases} \quad (13)$$

(5) 对上述经过小波处理后得到的图像进行小波重构生成图像 \hat{S}_1f 。

第四步: 用小波逆变换将 \hat{S}_1f, \hat{W}_1^Hf 和 \hat{W}_1^Vf 合成逆半调图像。

该算法在众多逆半色调算法中生成的逆半调图像效果最好, 但是由于需要进行 3 次小波变换和 1 次小波逆变换, 因此它的时间、空间复杂度都非常高, 处理速度较慢。

2.4 基于 B 样条小波变换的逆半调算法

在小波变换中, 通常要求小波函数具有紧支性和对称性, 但 Daubechies 的研究已经证明^[24], 具有连续紧支对称的正交小波是不存在的。根据多分辨率分析理论, 可以构造出 B 样条双正交小波尺度函数。本文选择 3 阶 B 样条函数作为小波基, 它满足小波函数的对称性要求, 保证在图像处理过程中不会产生移相。同时, 半调图像被分解后能较好地展示图像细节和局部噪声, 便于分析、处理半调过程引入的噪声及纹理。其函数形式如式(14)所示:

$$G_3(x) = \begin{cases} \frac{1}{2}(x+1)^2, & -1 \leq x \leq 0 \\ -(x-\frac{1}{2})^2 + \frac{3}{4}, & 0 \leq x \leq 1 \\ \frac{1}{2}(x+2)^2, & 1 \leq x \leq 2 \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (14)$$

基于 B 样条小波变换的逆半调算法处理框架如图 4 所示。

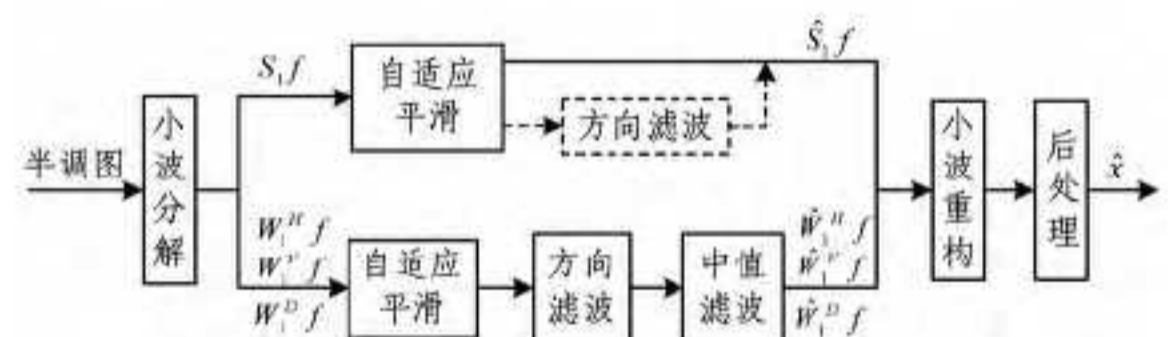


图 4 基于 B 样条小波变换的逆半调算法框架

算法具体步骤可描述如下。

第一步: 首先对半调图像进行一级小波分解, 对水平、垂直、 45° 细节信号采用小区域均值和方差估计相结合的非线性自适应平滑滤波, 去除主要的半调噪声。

第二步: 针对水平、垂直、 45° 细节信号中的方向性纹理噪声, 采用各方向滤波模板。

第三步: 对上述平滑、去纹理后的各方向细节信号, 再进行 3×3 的中值滤波, 以去除颗粒状噪声。

第四步: 针对 S_1f 近似信号中的噪声, 先进行自适应平滑后再附加一次水平、垂直模板的方向滤波。

第五步: 用小波逆变换合成逆半调图像。

2.5 基于 MRF-MAP 估计的逆半调算法

逆半调过程就是估计图像每一个像素点像素值的过

程^[25], 逆半调图像是半调图像求出原连续调图像的一个近似估计, 估值判断依据可使用最大后验概率估计(MAP)^[26]。

基于 MRF-MAP 估计的逆半调算法处理框架如图 5 所示。



图 5 基于 MAP 估计的逆半调算法框架

因逆半调是一个不适定问题, 属于多对一映射, 同一张半调图像可以得到多种逆半调图像, 可先将这些逆半调估计图放到一个集合当中, 再运用 MAP 估计法, 找到最符合条件的逆半调估计图。

基于 MRF-MAP 估计的逆半调算法是在 1997 年由 Steverson 提出的^[27], 该算法首先将贝叶斯估计和随机图像模型化, 然后在逆半调处理过程中应用模型化的马尔可夫随机场最大后验概率估计(MRF-MAP)。

假设半色调图像为 a , 它对应的连续色调图像为 x , \hat{x} 是根据 MAP 对图像 x 的一个估计, 可以用式(15)表示, 其中 S 表示所有逆半调估计图的集合。

$$\hat{x} = \arg \max_{x \in S} L(x|a) \quad (15)$$

由概率和优化的知识可将式(15)简化为式(16):

$$\hat{x} = \arg \min_{x \in S} \{-\log \Pr(a|x) - \log \Pr(x)\} \quad (16)$$

为了求解 MAP 估计, 必须定义条件概率密度 $\Pr(a|x)$ 和概率密度 $\Pr(x)$ 。假设 x, H 已知 (H 为一个半调过程), $\Pr(b|x)$ 由式(17)给出:

$$\Pr(a|x) = \begin{cases} 0, & a \neq H(x) \\ 1, & a = H(x) \end{cases} \quad (17)$$

用 Huber-Markov 随机场得:

$$\Pr(x) = \frac{1}{\Pi} \exp\left(-\frac{1}{\lambda} \sum_i \sum_j \sum_{m=0}^3 \rho_t(d_{i,j,m}^T x)\right) \quad (18)$$

其中, Π 是一个归一化常量, λ 为密度的参数, $d_{i,j,m}^T x$ 是二阶微分算子, T 为矩阵转置运算。 $\rho_t(\cdot)$ 具有凸壳性、非二次方程函数, 其阈值为 t , 可以取 Huber-Markov 随机场的势函数。 $\rho_t(\cdot)$ 的凸壳性表明: 当将概率密度应用在 MAP 算法中时, 可以使凸壳空间最小化。光滑标准 $d_{i,j,m}^T x$ 在图像不连续区域取值较大, 但是背景区域取值较小, 所以经过 $\rho_t(\cdot)$ 的作用, 就可以保护原图像的细节部分。

对上述公式中 MAP 估计、条件概率密度估计和图像模式所描述的模型最小化问题运用 MAP 估计法求解, 就构成了逆半调图像估计系统。MAP 估计可由式(19)得到:

$$\hat{x} = \arg \min_{x \in S'} \left\{ \frac{1}{\lambda} \sum_i \sum_j \sum_{m=0}^3 \rho_t(d_{i,j,m}^T x) \right\} \quad (19)$$

其中 S' 表示所有可能解决上述问题的图像集合。

令 $\Omega[x, t] = \sum_i \sum_j \sum_{m=0}^3 \rho_t(d_{i,j,m}^T x)$, 显然 $\Omega[x, t]$ 是关于 x 和 t 的二元函数。所以基于 MRF-MAP 估计的逆半调算法就是在式(19)的 MAP 估计和 $a = H(x)$ 的约束条件下, 沿着梯度方向反复调整估计图像, 直到获得最优估计图像 \hat{x} 为止。

假设半调图像是连续色调图像通过误差扩散算法得到的, 那么基于 MRF-MAP 估计的逆半调算法可以按照下面步骤执行。

第一步: 将大小 $M \times N$ 连续图像经过误差扩散算法得到半色调图像。

第二步: 为当前半调图像像素点选择一个单位向量 $d^{(n)} = (0, \dots, 0, 1, 0, \dots, 0)_{M \times N}$ 作为下降的方向, 其中 n 为迭代的次数。

第三步: 计算在 $d^{(n)}$ 方向上调整的迭代步长

$$a^{(n)} = \frac{-\nabla \Omega[x^{(n)}, t]^T d^{(n)}}{(d^{(n)})^T \nabla^2 \Omega[x^{(n)}, t] d^{(n)}}$$

从而得到递推公式 $x^{(n+1)} = x^{(n)} + a^{(n)} d^{(n)}$, 其中, ∇^2 表示拉普拉斯算子。

第四步: 在计算时会出现值超出范围, 根据半调算法的形式定义投影函数 $P_e(\cdot)$, 将它们投影回约束空间。对于误差扩散类半调算法, $P_e(\cdot)$ 可以定义为式(20)。

$$x_{i,j}^{(n+1)} = P_e(x'_{i,j}^{(n+1)}) = \begin{cases} 0.5, & b_{i,j} = 1, (x'_{i,j}^{(n+1)} + \sum_{k,l \in S} h_{k,l} e_{i-k,j-l}) < 0.5 \\ 0.498, & b_{i,j} = 1, (x'_{i,j}^{(n+1)} + \sum_{k,l \in S} h_{k,l} e_{i-k,j-l}) \geq 0.5 \\ x_{i,j}^{(n+1)}, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (20)$$

第五步: 如果还没有到达图像的最后一个像素, 那么转到第二步, 否则继续下一步。

第六步: 如果所有的梯度模长之和 $\sum \|a^{(n)} d^{(n)}\|$ 的平方大于某给定阈值, 则转到第二步, 否则, 终止估计算法并且令 $\hat{x} = x^{(n)}$, 输出结果 \hat{x} 。

基于 MRF-MAP 估计的逆半调算法能较好地保持图像边缘, 得到的逆半调图像质量也较好。但是该算法时间、空间复杂度都较高, 并且要求半调算法中的误差扩散核已知, 因此在实际应用中受到了很大限制。

2.6 查找表(LUT)逆半色调算法

查找表即 Look Up Table(LUT), 是由 Murat Mese^[28]提出的一种根据查表完成图像处理的方法, 能够并行运算, 处理速度很快。之后, Mese 又给出了该方法的最优模板选择原则^[28]、彩色图像逆半调 LUT 构建方法^[29]。为了进一步提高逆半色调图像质量, 并减小查找表所占用的空间, 又建立了树型结构 LUT 逆半调算法^[30]、LMS-MMSE 逆半调算法^[31]、基于边缘的 LUT 逆半调算法^[32-35]等。查找表逆半调算法基本思路如图 6 所示。

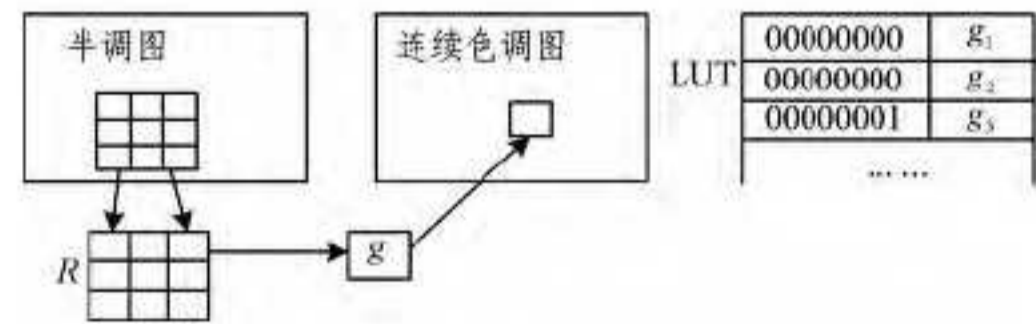


图 6 LUT 逆半调算法框架

其中, R 是一个对半调图像进行采样的模板, 模板中共有 $\|R\|$ 个像素点, 可能产生 $2^{\|R\|}$ 种样本半调模式。若制定一个包含模板可能产生的所有样本半调模式和与该样本对应的连续像素值 g 的查找表, 就可以根据查询此表来完成图像的逆半调处理, 即 $\hat{x}_{i,j} = LUT(g, b_{i,j} \in R)$ 。

整个基于查找表的逆半调过程分为两大阶段实现。

第一阶段: 提前收集一定数量的连续色调图像和对应的半调图像, 然后根据半调图像“领域内像素点的分布”和“对应像素的连续色调值”来建立一张逆半调查找表, 并将该查找表

存储起来。

第二阶段,分析待处理半调像素点所在采样邻域 R 的半调模式分布情况,在已经建立好的查找表中查寻该半调模式所对应的连续像素值,即为该像素点的逆半调像素值。依次对半调图像中的所有像素点执行以上过程,即可得到逆半调图像。

查找表方法通过查表方式生成逆半调图像,算法可以分区并行操作,很大程度上缩减了半调处理需要的时间,处理速度优于其它逆半调算法。另一方面该方法对半调方法也没有特殊的要求,所以应用比较广泛。

2.7 LUT 与神经网络相结合的逆半调算法

在使用查找表算法建立训练集阶段时,选取什么样的训练图集、多大尺寸以及何种形状的采样模板,对逆半调图像质量影响都很大。另外,在训练查找表时,由于训练图集的限制,采样样本出现的频率是不一样的,有些样本在训练时找不到与其对应的连续像素值,如何估计未出现样本的连续色调值,也将影响逆半调图像重建的质量。以上述分析结果为基础,本节结合神经网络对原有 LUT 方法进行了以下优化和改进:

(1)在不扩大内存且模板大小不变的前提下,分类训练逆半调 LUT 表,从而提高不同类型半调图像的重建质量。

(2)遵从模拟系统的非线性特征,引入 Elman 回归型神经网络,构建逆半调逼近模型,以此模型拟合 $k=0$ 半调模式的 LUT 值,以提高估值精度。

LUT 与 Elman 网络相结合的逆半调算法框架如图 7 所示。

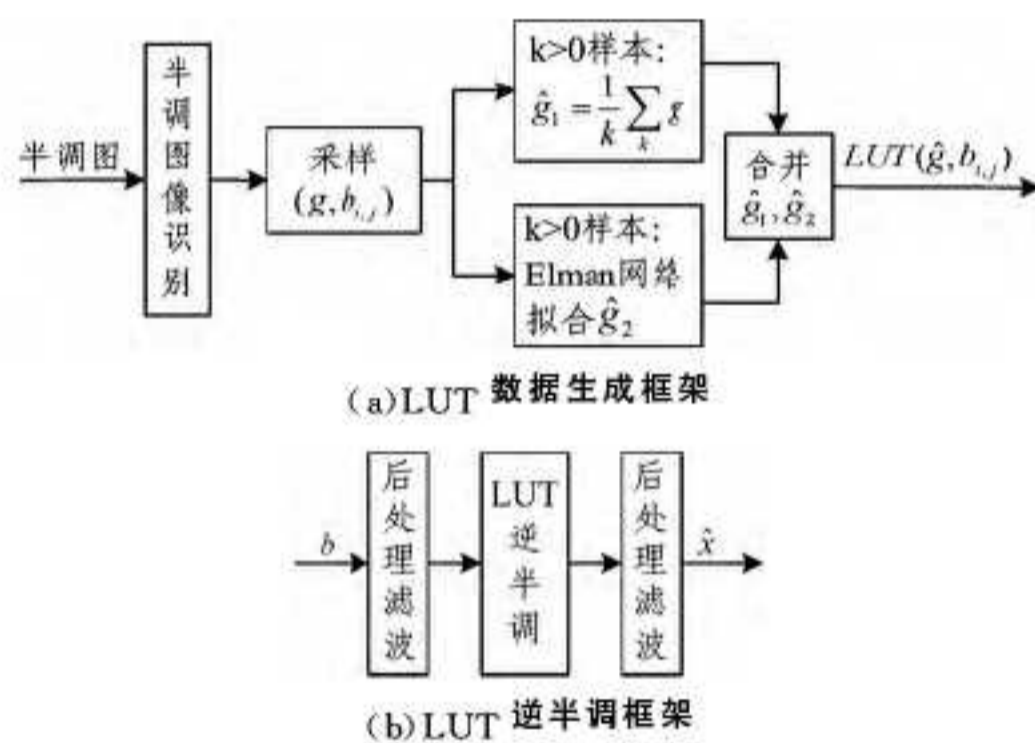


图 7 LUT 与 Elman 网络相结合的逆半调算法框架

算法的具体步骤可描述如下。

第一步,从已获得的半调模式 LUT 值中,选取出现频率 k 大于阈值 k_i 的数据 g 作为学习样本;

第二步,设定 Elman 网络隐层节点数 n 及学习误差 e ,对网络进行样本学习,确定权重系数矩阵 A, B, C ;

第三步,用训练好的 Elman 网络拟合未出现半调模式的 LUT 逆半调值 \hat{g} ; 由于 \hat{g} 代表像素的连续色调,因此依照式(21)将网络输出 y 投影到整数区间 $[0, 255]$ 。

$$\hat{g} = \begin{cases} 0, & \text{if } y < 0 \\ 255, & \text{if } y > 255 \\ \text{round}(y), & \text{otherwise} \end{cases} \quad (21)$$

3 逆半调图像质量评价

根据不同的图像处理技术可以得到不同的图像处理结果,逆半调算法的选择很大程度上依赖于对逆半调图像质

量的有效评价,因此图像质量评价的研究就显得尤为重要,图像质量评价的实际意义就是对图像处理技术的质量评价^[36]。图像质量评价的主体是人,但若对处理结果的好坏仅凭人眼主观感受做出评价,会受到观察人员自身知识水平、情绪等各方面因素的影响^[37, 38],在实际应用中可操作性差。因此许多学者开始研究使用客观方法来描述人眼对图像的主观感受。

客观质量评价的出现弥补了主观评价的局限性,使图像质量评价有明确的数学依据。基于 MSE 的客观评价方法是比较常用的一类评价方法。

设原图像为 $f(x, y)$, 恢复图像为 $\hat{f}(x, y)$, 两者图像的大小均为 $M \times N$, 则均方误差 (MSE) 的定义为式 (22):

$$MSE = \frac{\sum_{0 \leq i \leq M} \sum_{0 \leq j \leq N} (f_{ij} - \hat{f}_{ij})^2}{M \times N} \quad (22)$$

其中, M, N 分别代表图像的长和宽, f_{ij} 代表原始图像的像素值, \hat{f}_{ij} 代表恢复图像的像素值。

峰值信噪比 (PSNR) 的定义为式 (23):

$$PSNR = 10 \times \lg_{10} \frac{f_{\max}^2}{MSE} \quad (23)$$

其中, f_{\max} 表示灰度图像的最大灰度值。

表 1 给出了 Lena、Peppers 的 Floyd 半调图像采用低通滤波器 (POCS)、快速逆半调 (Fast)、小波算法 (Wavelet)、B 样条小波算法、估值算法 (MAP)、LUT 算法和 LUT 与 Elman 网络相结合等现有逆半调算法生成结果的 PSNR 值,其数据来自文献^[39, 40]。

表 1 不同逆半调算法对 Floyd 半调图像逆半调的 PSNR 值

逆半调算法	Lena 图	Peppers 图
POCS	28.64	27.59
Fast	31.26	28.96
Wavelet	31.50	29.91
B 样条小波	31.61	30.91
MAP	31.00	29.30
LUT	30.41	29.91
LUT-Elman	31.54	30.11

表 2 以 $M \times N$ 图像为例比较了不同逆半色调算法的时间、空间复杂度,其计算方式参考了文献^[38],其中, O_{memory} 表示算法处理一行像素需要的最少存储空间; O_{time} 表示算法处理单个像素所需的运算次数, $O_{\text{time}} > 2000$ 为“High”, $500 \leq O_{\text{time}} \leq 2000$ 为“Median”, $O_{\text{time}} < 500$ 为“Low”。

表 2 不同逆半调算法的空间、时间复杂度比较

逆半调算法	O_{memory}	O_{time}
POCS	$8N^2$	High
Fast	$28N$	Low
Wavelet	$9N^2$	Median
B 样条小波	$20N$	Low
MAP	$8N^2$	High
LUT	$16^2 \sim 21^2$	Low
LUT-Elman	2^{16}	Low

另外,针对彩色逆半调图像质量评价还应该重点考虑重建图像与原图的视觉色彩差异程度和人工纹理的抑制效果,可以采用基于 HVS (Human Visual System) 的彩色逆半调色差预测及可视化算法,其算法框架如图 8 所示。

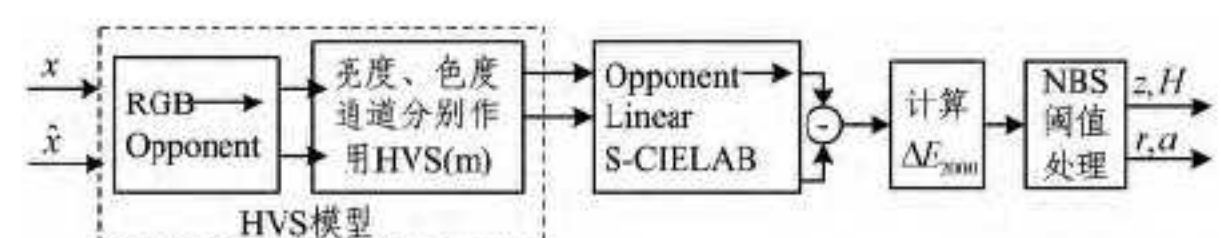


图 8 基于 HVS 的彩色逆半调色差预测及可视化算法框架

其中, x, \hat{x} 分别表示原图和逆半调图。依据美国国家标准局公布的“NBS 色差单位与人眼视觉颜色差别感知关系”(见表 3) 确定色差阈值, 记为 t_c , 再依据此阈值分别按照式(24)和式(25)生成 HVS 色差图 $z(i, j)$ 、杂色直方图 H 。

表 3 NBS 单位与人眼视觉颜色差别感知关系

NBS 单位色差值	感觉色差程度
0.0~0.5	微小色差, 感觉极微
0.5~1.5	小色差, 感觉轻微
1.5~3.0	较小色差, 感觉明显
3.0~6.0	较大色差, 感觉很明显
6 以上	大色差, 感觉强烈

$$z(i, j) = \begin{cases} \Delta E_{2000}(i, j) - t_c, & \Delta E_{2000}(i, j) > t_c \\ 0, & \Delta E_{2000}(i, j) \leq t_c \end{cases} \quad (24)$$

其中, $\Delta E_{2000}(i, j) = \frac{1}{M \times N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \Delta ne_{i,j}$, $\Delta ne_{i,j}$ 为 CIE DE2000 色差, $M \times N$ 为图像大小。

$$H = \{ \Delta E_{2000}(i, j) \mid \Delta E_{2000}(i, j) > t_c \} \quad (25)$$

此外, 还从统计意义上计算重建图像的“HVS 杂色比率 r 、色差均值 a ”(见式(26)和式(27)), 达到预测逆半调图像视觉色彩差异程度和虫状纹理抑制的可视化效果, 并获得定量评价数据。

$$r = \frac{1}{M \times N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N b(i, j) \quad (26)$$

$$b(i, j) = \begin{cases} 1, & \Delta E_{2000}(i, j) > t_c \\ 0, & \Delta E_{2000}(i, j) \leq t_c \end{cases}$$

$$a = \frac{1}{M \times N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N z(i, j) \quad (27)$$

生成的色差图 $z(i, j)$ 直观地反映了人眼能够感知到的逆半调图像与原图像之间的色彩差异, 同时 r, a 与 H 又分别从定量的角度描述了逆半调图像与原图像 HVS 色差及其杂色分布的情况。

结束语 本文讨论了现有常见逆半调算法的原理、基本模型及其分类, 重点介绍了其中的低通滤波器、快速算法、小波算法、B 样条小波算法、估值算法、LUT 算法和 LUT 与神经网络相结合的算法, 分析了它们的优点和缺陷, 并对逆半调图像质量进行了有效评价。现有逆半调技术还存在很多不足之处, 如何在现有算法的基础上设计新的逆半色调算法, 以提高重建图像的质量, 是我们今后研究的方向。

参考文献

[1] Ulichney R. A Digital Halftoning[M]. Cambridge: MIT Press, 1987: 233-331

[2] 文志强, 胡永祥, 朱文球. 基于统计量模板的半调图像特征提取与分类[J]. 计算机科学, 2013, 40(12): 94-97, 112

[3] Floyd R W, Steinberg L. An adaptive algorithm for spatial grey-scale[C] // Proceedings of International Symposium of SID, 1975: 36-37

[4] Stevenson R. Inverse Halftoning via MAP Estimation [J]. IEEE Trans. on Image Processing, 1997, 6(4): 574-583

[5] Bakushinsky A, Goncharsky A. Ill-Posed Problems: Theory and Applications[M]. Netherlands: Mathematics and Its Applications, 1994: 4-258

[6] Miceli C M, Parker K J. Inverse halftoning[M]. United States: Journal of Electronic Imaging, 1992: 143-151

[7] Bertero M, Bocacci P. Inverse problems in imaging[M]. Italy: CRC Press, 1998: 1-351

[8] Fan Z, Eschbach R. Limit cycle behavior of error diffusion [C] // Proceeding IEEE Conference on Image Processing, 1994: 1041-1045

[9] Mese M, Vaidyanathan P. Recent advances in digital halftoning and inverse halftoning methods [J]. IEEE Trans. on Circuits and Systems: Fundamental Theory and Applications, 2002, 49(6): 790-805

[10] 孔月萍. 图像逆半调及其质量评价技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2008

[11] Hein S, Zakbor A. Halftone to continuous-tone conversion of error-diffusion coded images [J]. IEEE Trans. Images Processing, 1995, 4(2): 208-216

[12] Cheung Shi-fun. Low-Memory Low-Complexity inverse Dithering [J]. Proc. of SPIE, 1999, 36(48): 529-540

[13] Mese M, Vaidyanathan P. Look up table (LUT) inverse halftoning [J]. IEEE International Symposium on Circuits and Systems, 2000, 4(4): 517-520

[14] Wong P W. Inverse halftoning and Kernel estimation for error diffusion [J]. IEEE Trans. Images Processing, 1995, 4(4): 486-498

[15] Kern R S, Stockham J T G, Strong D C. Descreening via linear filtering and iterative techniques [J]. Proc. of SPIE, 1993, 19(13): 209-309

[16] Damera-Venkata V N, Kite T D, Venkataraman M, et al. Fast Blind inverse halftoning [C] // Proceeding of International Conference on Image Processing. Vol. 2, 1998: 64-68

[17] Shen M Y, Kuo C C J. A robust nonlinear filtering approach to inverse halftoning [J]. Journal of Visual Communication and Image Representation, 2001, 12(1): 84-95

[18] Au O C. Fast ad-hoc inverse halftoning using adaptive filtering [J]. IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1999, 6(6): 3461-3464

[19] Kite T D, Evans B L, Bovik A C, et al. A fast, high quality inverse halftoning algorithm for error diffused halftones [J]. IEEE Trans. on Images Processing, 2000, 9(9): 1583-1592

[20] Dantera-Venkata V N, Kite D. Fast blind inverse halftoning [J]. Proc. of International Conf. on Image Processing, 1998, 2(2): 64-68

[21] Zixiang X, Orhardl M T, Ranchandran K. A wavelet-based Approach to Inverse Halftoning [J]. Proc. of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 1997, 30(18): 89-100

[22] Neelamani R, Nowak R, Baraniuk R. Model-based inverse halftoning with wavelet-vaguelette deconvolution [J]. Proc. of International Conf. on Image Processing, 2000, 3(3): 973-976

[23] Xiong Z, Orchard M T, Ranchandran K. Inverse halftoning using wavelet [J]. IEEE Transactions On Image Processing, 1999, 8(10): 1479-1483

[24] Donovan G, Geronimo J, Hardin D, et al. Construction of orthogonal wavelet using fractal interpolation functions [J]. SIAM Math Anal, 1996, 27(4): 1158-1192

[25] 章毓晋. 图像工程(第 3 版)[M]. 北京: 清华大学出版社, 2012

[26] Wong P W. Inverse halftoning and Kernel estimation for error diffusion [J]. IEEE Trans. Images Processing, 1995, 4(4): 486-498

[27] Stenvenson R L. Inverse halftoning via MAP estimation [J].

IEEE Transactions on Image Processing, 1997, 6(4): 574-583

- [28] Mese M, Vaidyanathan P P. Look up table Method for inverse halftoning[J]. IEEE Trans. on Images Processing, 2000, 10(10): 1566-1578
- [29] Mese M, Vaidyanathan P P. Template selection for LUT inverse halftoning and application to color halftones[J]. IEEE International Conf. on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 2000, 4(4): 2290-2293
- [30] Mese M, Vaidyanathan P P. New methods for digital halftoning and inverse halftoning[J]. Proc. of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 2001, 46(63): 278-292
- [31] Kong Y P, Zeng P. Inverse Halftoning for Error Diffusion Based on Pattern Recognition and Look-up Table[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2004, 25(S4): 177-181
- [32] Chang P C, Yu C S, Lee T H. Hybrid LMS-MMS inverse halftoning technique[J]. IEEE Trans. on Images Processing, 2001, 10(1): 95-103
- [33] Mese M, Vaidyanathan P P. Tree-structured method for LUT inverse halftoning and for image halftone[J]. IEEE Trans. on Images Processing, 2002, 11(6): 644-655
- [34] Mese M, Vaidyanathan P P. Recent advances in digital halftoning and inverse halftoning methods[J]. IEEE Trans. on Circuits and Systems Fundamental Theory and Applications, 2002, 49(6): 790-805
- [35] Chung K L, Wu S T. Inverse halftoning algorithm using edge-based look up table approach[J]. IEEE Trans. on Images Processing, 2005, 14(10): 1583-1589
- [36] Glen W E, et al. Image system based on psychophysical data[J]. SID, 1985, 26(1): 71-78
- [37] 周景超, 戴汝为, 肖柏华. 图像质量评价研究综述[J]. 计算机科学, 2008, 35(7): 1-4
- [38] Damera-Venkata N, Kite T D, Geisler W S, et al. Image quality assessment based on a degradation model[J]. IEEE Signal Processing Society, 2000, 9(4): 636-650
- [39] Damera-Venkata V N, Kite T D, Venkataraman M, et al. Fast blind inverse halftoning[J]. Proceeding of International Conference on Image Processing, 1998, 2(2): 64-68
- [40] Shen M Y, Kuo C C J. A robust nonlinear filtering approach to inverse halftoning[J]. Journal of Visual Communication and Image Representation, 2001, 12(1): 84-95

(上接第 86 页)

推论 1 设 (F_0, F_1', F_2', F_3) 是由算法 1 中的 F_0, Q 决定的四元组, 令每一个 $(R, q) \in Q, C_{R,q}$ 是由 q 决定的概念, 那么 $C = F_0 \sqcup \bigsqcup_{(R,q) \in Q} \exists R. C_{R,q} D$ 决定四元组 (F_0, F_1, F_2', F_3) 。

对于算法的复杂性, 假设 $T_1 \cup T_2$ 不是 T_1 的保守扩充, 由定理 1 存在出度不超过 $|T_1 \cup T_2|$ 的概念 C 及 $D \in \text{sub}(T_1 \cup T_2)$ 使得 $T_1 \cup T_2 \models C \sqsubseteq D$, 但是 $C \not\models D$ 。如果 C 是角色深度为 0 的 $\varepsilon\text{VL-sig}(T_1)$ 中的概念, 那么算法的 Step1 输出 $T_1 \cup T_2$ 不是 T_1 的保守扩充。下面考虑 C 是角色深度为 $n \geq 1$ 的情形, 由定理 3 及推论 1, 容易给出由角色深度小于 i 的概念 C 的子概念决定的所有四元组的集合 N_i , 因此, 当计算到某个 $N_i, i \leq n$, 那么可以判断并输出 $T_1 \cup T_2$ 不是 T_1 的保守扩充。

对于算法 1 的计算复杂度, 由定理 3, 在 $\varepsilon\text{VL-sig}(T_1)$ 中角色深度为 0 的概念 $\varepsilon\text{VL-sig}(T_1)$ 中概念名的并能够在多项式时间内计算, 因此算法的 Step1 及 Step2 均可在指数时间内完成, 对于 Step3 中四元组 (F, Q_1, Q_2, Q_3) 的数量被 $2^{4|T_1 \cup T_2|}$ 限制, 其中 F_0 是 $\varepsilon\text{VL-sig}(T_1)$ 中角色深度为 0 的概念, $Q_i \subseteq \text{sub}(C)$ 。对某些 $i \leq 2^{4|T_1 \cup T_2|}$, 有 $N_i = N_{i+1}$, 因为对 N_{i+1} 检测在 N_i 的指数时间内完成, 首先二元组 (F_0, Q) 的数量、角色深度为 0 的概念的长度及集合 Q 的势都不超过 $|T_1 \cup T_2|$; 其次计算由 F_0 和 Q 决定的四元组 (F_0, F_1, F_2, F_3) 和 (F_0, F_1', F_2', F_3) 也是 $|T_1 \cup T_2|$ 的多项式时间内完成的, 因此算法在指数时间内停机。

结束语 本文主要研究了描述逻辑 εVL 在非循环 T_{box} 下的推理及其相应的保守扩充问题, 将 εVL 中的包含推理问题转换为典范模型的模拟问题, 由典范模型之间的最大模拟是多项式时间复杂的这一性质, 给出了包含推理问题的复杂性。进一步构建了的典范模型, 提出描述逻辑 εVL 的保守扩充, 并证明了 εVL 的保守扩充的判定算法是指数时间复杂的。不同形式的 T_{box} , 比如空 T_{box} 、非循环的概念定义式 T_{box} 、循环的概念定义式 T_{box} 、一般概念包含 T_{box} 和混合 T_{box} 等, 会影响推理问题的算法结构及相应的推理复杂性。 εVL 含循环 T_{box} 和混合 T_{box} 下的保守扩充问题将是我们的下一步的工作。

参考文献

- [1] 唐素勤, 蔡自兴, 王驹, 等. 基于最大不动点模型的描述逻辑系统 FLE 的有穷基[J]. 计算机研究与发展, 2010, 47(9): 1514-1521
- [2] 孙晋永, 古天龙, 常亮. 基于描述逻辑的事例推理综述[J]. 计算机科学, 2014, 41(11): 1-6, 39
- [3] 蒋运承, 唐素勤, 王驹, 等. 带传递关系和存在量词的描述逻辑 MSC 推理[J]. 计算机研究与发展, 2009, 46(6): 979-987
- [4] Antoniou G, Kehagias A. On the refinement of ontologies [J]. International Journal of Intelligent System, 2000, 15(7): 623-632
- [5] Lutz C, Wolter F. Deciding inseparability and conservative extensions in the description logic EL [J]. Journal of Symbolic Computation, 2010, 45(2): 194-228
- [6] Ghilardi S, Lutz C, Wolter F. Did I damage my ontology? [C]// Int Conf on Principles of Knowledge Representation and Reasoning. Menlo Park, CA: AAAI Press, 2006: 187-197
- [7] Lutz C, Walther D, Wolter F. Conservative extensions in expressive description logics [C]// Proc of the 20th Int Conf on Artificial Intelligence. San Francisco, CA: Morgan Kaufmann Publishers, 2007: 453-458
- [8] Lutz C, Wolter F. Deciding inseparability and conservative extensions in the description logic EL [J]. Journal of Symbolic Computation, 2010, 45(2): 194-228
- [9] 聂登国. 描述逻辑系统 VL 的保守扩充[D]. 桂林: 广西师范大学, 2012
- [10] 聂登国, 康旺强, 曹发生, 等. 描述逻辑 $\text{FL}_{-\theta}$ 的包含推理及其保守扩充[J]. 计算机研究与发展, 2015(1): 221-228
- [11] 康旺强. 轻量级描述逻辑 FL 的保守扩充[D]. 桂林: 广西师范大学, 2012
- [12] 申宇铭, 王驹, 唐素勤. 描述逻辑 εLU 概念及术语公理集的表达力刻画[J]. 软件学报, 2014(8): 1794-1805
- [13] 王驹, 蒋运承, 申宇铭. 描述逻辑系统 VL 循环术语集的可满足性及推理机制[J]. 中国科学信息科学, 2009, 39(2): 205-211
- [14] 申宇铭, 文习明, 王驹. 描述逻辑 $\text{FL}_{-\theta}$ 概念及术语公理集的表达力刻画[J]. 计算机科学, 2014, 41(12): 206-210, 215