

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2013.06.012

基于LUT的逆半调改进算法

卢永乐, 文志强, 黄丽君, 李建飞

(湖南工业大学 计算机与通信学院, 湖南 株洲 412007)

摘要: 针对误差分散类半调图像, 提出了一种基于查找表的逆半调改进算法。并用实验方法分析了训练样本大小、所选LUT模板与空值率之间的关系, 且对LUT逆半调建表阶段出现空值时所采用的空值估计方法进行了改进; 针对图像客观评价方法, 提出一种寻找最高峰值信噪比的LUT模板选择算法。实验结果表明, 利用所提出的优化LUT算法恢复的逆半调图像在人眼视觉以及峰值信噪比上有明显的提升。

关键词: 图像逆半调; 误差分散; 查找表; 峰值信噪比

中图分类号: TP391.4; TN919.8 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-9833(2013)06-0057-05

An Improved Inverse Halftoning Algorithm Based on LUT

Lu Yongle, Wen Zhiqiang, Huang Lijun, Li Jianfei

(School of Computer and Communication, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: For error-diffusion-halftone images, proposed an improved inverse halftoning algorithm based on LUT. Through experimental methods, analyzed the relationship between the number of training samples, the selected template of LUT and the null value rate, and improved the null-value-estimation method as null value appeared at the step of the LUT construction. In view of the objective assessment method for image, proposed a LUT template selection algorithm of looking for the highest PSNR. Experimental results show that using the improved LUT algorithm, the reconstructed inverse halftoning image in the human visual system and the PSNR has significantly improved.

Keywords: image inverse-halftoning; error diffusion; look-up table; PSNR

0 引言

图像半调技术是将连续色调图像转变为二值图像的过程^[1]。由于人眼的低通滤波特性, 在一定距离范围外, 人眼观测到的半调图像与连续色调图像在视觉效果上基本相似^[2]。目前, 半调技术主要应用于印刷、打印等行业, 解决了打印设备只能打印黑白

两色的问题。逆半调技术是半调技术的逆过程。在某些情况下, 需要将半调图像重构为连续图像, 如纸质图像数字化、压缩、增强等再处理, 此时即需要用到逆半调技术^[2]。

已有逆半调技术主要有低通滤波法、小波变换、MAP (maximum a posteriori) 估计、POCS (projection onto convex sets) 估计、查表法、神经网络等方法^[3]。

收稿日期: 2013-10-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61170102), 湖南省自然科学基金资助项目 (11JJ3070), 湖南省教育厅科学研究基金资助项目 (12A039)

作者简介: 卢永乐 (1989-), 男, 湖南江永人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为智能信息处理和数字图像处理, E-mail: luyongle520@163.com

通信作者: 文志强 (1973-), 男, 湖南湘乡人, 湖南工业大学副教授, 博士, 硕士生导师, 主要从事智能信息处理和数字图像处理方面的教学与研究, E-mail: zhqwen20001@163.com

由于半调图像是一种二值量化操作,存在多对一映射,使得逆半调成为一种不适定(ill-posed)问题。查表法(look-up table, LUT),是一种机器学习法,它通过查表重构逆半调图像。该算法可分区并行操作,空间复杂度较低,处理速度明显优于其它逆半调方法^[4-5]。影响LUT逆半调图像质量的主要因素有空值估计的准确性与模板选择的合理性。因此,本文拟对LUT建表阶段出现空值时的处理方法及模板的选择进行研究,以期提高LUT逆半调图像的质量。

1 传统LUT逆半调

LUT逆半调方法不涉及任何线性滤波器,也不限于半调图像是采用何种算法形成的^[1]。逆半调图像中某个像素点的值是根据半调图中像素的分布及其对应原图的连续像素值确定的^[6]。传统典型的LUT模板主要有16-rect, 16-pels, 19-pels。若所选模板的大小为 M ,则它所占的空间是 2^M 个字节,因此,LUT逆半调算法不仅运算速度快,而且空间复杂度较低。

LUT逆半调过程主要分为建表阶段与逆半调阶段。本文选用如图1所示的19-pels模板进行实验,其中 O 代表待恢复的像素,1~18表示选取的邻域像素。

1	2	3	4	5
6	7	8	9	10
11	12	O	13	14
	15	16	17	
		18		

图1 LUT的19-pels模板

Fig. 1 The 19-pels template of LUT

建表前,选取 P 对图

像 $\{(C_m, H_m) | 1 \leq m \leq P\}$, C_m 表示第 m 副连续灰度图像, H_m 为与之对应的半调图像, $S_0^h, S_1^h, \dots, S_{18}^h$ 表示模板中19个像素的值(0或1),

$$I = \sum_{k=0}^{18} 2^k S_k^h, \quad (1)$$

式(1)中 I ($0 \leq I < 2^{19}$)为LUT表的映射地址。

用 g_0 表示该地址值对应的原图的连续值,则算法描述如下。

1) 建表阶段

Step 1 选定 P 对图像 $\{(C_m, H_m) | 1 \leq m \leq P\}$,选取模板 T (19-pels)。模板 T 置于 C_1 与 H_1 左上方,初始 $m=1$, $L_{ul}[]=0$, $N[]=0$ 。其中 $N[]$ 用于存储同一映射地址出现的次数, $L_{ul}[]$ 用于存储半调图像到多级灰度图像的映射表。

Step 2 用式(1)计算 H_m 中模板 T 覆盖的子窗口 S^h 对应的映射地址,并进行如下操作:

$$N[I]=N[I]+1, \quad (2)$$

$$L_{ul}[I]=L_{ul}[I]+g_0. \quad (3)$$

Step 3 从左到右,由上到下移动模板 T ,重复执行步骤2,直至遍历 C_m 与 H_m 。

Step 4 令 $m=m+1$,读取下一对图像 (C_m, H_m) ,执行步骤2~3,直至遍历所有图像对。

Step 5 对映射地址 I ($0 \leq I < 2^{19}$),执行式(4)所示操作。

$$L_{ul}[I]=L_{ul}[I]/N[I]. \quad (4)$$

Step 6 利用已经存在于LUT表中的半调与逆半调值的映射,估计未出现的 I (即空值)的逆半调值,形成完整的LUT表。

2) 逆半调阶段

用模板 T 在输入的半调图像上进行移动,用式(1)计算每个子窗口所对应的映射地址 I ,根据地址 I 重建连续灰度值 g'_0 。

$$g'_0=L_{ul}[I]. \quad (5)$$

至此,已经完成了LUT表的建立与图像的逆半调恢复。但由于所选的训练图数量有限,因此在LUT表中可能会存在没有连续值与其半调值对应的情况。空值估计所选用的算法在很大程度上影响了逆半调图像的质量,因此需讨论空值估计问题。

2 空值估计算法

在LUT建表阶段,由于训练样本有限,LUT中会存在一些空值,即 $N[I]=0$ 。因此,本文对训练样本数量、所选训练模板与空值出现情况间的关系做了实验分析。实验均采用 256×256 大小的图像,所选模板为16-rect, 16-pels, 19-pels,训练样本大小分别为30, 60, 120对连续-半调图像,所得结果见表1。

表1 空值率与训练样本数量、选用模板间的关系

Table 1 The relations of null-value-ratio, the number of training samples and selected templates

模板类型	样本数量	空值出现率/%
16-rect 模板	30	37.2
	60	24.7
	120	16.5
16-pels 模板	30	34.7
	60	22.4
	120	14.6
19-pels 模板	30	76.0
	60	66.6
	120	57.9

由表1可看出:3种类型的模板均随其样本数量的增加而空值出现率降低,即所选取的训练样本数量与出现空值的概率大小成反比。在同一训练样本下,使用不同模板出现空值的概率也不同,19-pels模板出现空值的概率大于16-rect和16-pels模板的。

为了进一步分析空值率与训练样本大小之间的关系, 选用 16-pels 模板进行实验。将样本数量从 1 逐一加大到 120, 分别求出它们的空值率, 得出样本数与空值率的关系, 如图 2 所示。

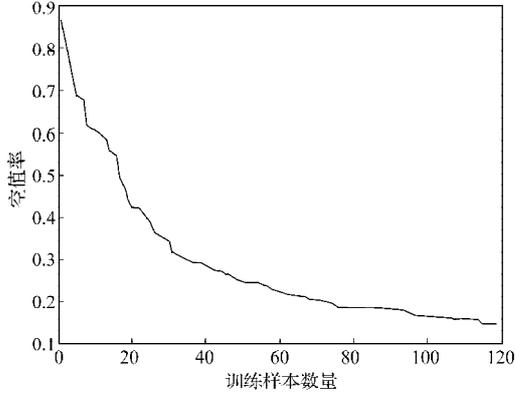


图 2 16-pels 模板的样本大小与空值率关系

Fig. 2 The relation between null-value-ratio and the numbers of training samples for 16-pels template

由图 2 可看出, 对于 16-pels 模板, 其空值率与训练样本大小呈反比例关系, 随着样本数量的增大, 空值率降低。因此选择合适的样本大小有利于提高 LUT 逆半调图像的质量。

上述实验结果表明, LUT 表中存在部分空值, 因此需要对查找表中出现的空值进行估值。本文采用高斯低通滤波法, 对空值所对应模板中的二值像素进行滤波, 从而求得估计值来填充表中空值, 使 LUT 表变得完整。具体的操作步骤如下:

假定模板中的二值像素排列为 $(P_0P_1 \cdots P_{M-1})$, 其中 M 为 LUT 模板的大小, 该空值所对应的连续值为 $Contone(P_0P_1 \cdots P_{M-1})$, 则

$$Contone(P_0P_1 \cdots P_{M-1}) = \sum_{i=0}^{M-1} h(i)p_i \quad (6)$$

式 (6) 中的权值 $h(i)$ 由如下二维高斯公式求得:

$$g(i_0, i_1) = k \cdot e^{-\frac{(i_0^2 + i_1^2)}{2\sigma^2}} \quad (7)$$

式 (7) 中, 参数 σ 的取值可经过多次试验取得, 它能使逆半调图像的峰值信噪比 (peak signal to noise ratio, PSNR) 较高, 本文取 $\sigma^2 = 0.586$ 。 (i_0, i_1) 如图 3 所示。 $h(i)$ 中的 i 是坐标 (i_0, i_1) 对应的值, 例如 $(i_0, i_1) = (-1, 0)$, 则 $i = 11$, 也就是 $g(-1, 0) = h(11)$, 即由式 (7) 可确定 $h(i)$ 的值。常数 k 用来保证 $\sum_i h(i) = 255$,

-2	0	1	2	3	4	
-1	5	6	7	8	9	
0	10	11	12	13	14	
1		15	16	17		
2			18			
i_1	i_0	-2	-1	0	1	2

图 3 19-pels 模板 (i_0, i_1) 与 i 对应表

Fig. 3 The corresponding table of (i_0, i_1) with i in 19-pels template

以使得空值估计的逆半调值在 $[0, 255]$ 范围内。

3 模板选择算法

在 LUT 图像逆半调算法中, 模板的选择对逆半调图像的质量有较大影响。合适的模板可提高逆半调图像的人眼视觉质量和图像的峰值信噪比。本节阐述一种利用贪心算法求取最佳 LUT 模板的方法。

在误差分散图像半调过程中, 当前像素点的半调值与半调模板有着很大的因果关联, 因此 LUT 模板中的半调值与当前计算的像素点逆半调值存在较大的相关性。假设选定模板的像素数量是固定的, 目标是求取尺寸为 M 的最佳模板。现将模板中元素的选择限制在固定邻域内, 即矩形 $N \times N$ 中。定义

$$N_L = \{(i, j) | i \in \{0, 1, \dots, N-1\} \& j \in \{0, 1, \dots, N-1\}\}$$

当模板中有 a 个像素时, 命名该模板为 T_a 。使用 P 对图像 (大小为 $x_1 \times y_1, x_2 \times y_2, \dots, x_p \times y_p$) 作为 LUT 表的训练样本。训练图集中 $C_l(n_1, n_2)$ 为连续色调图, $H_l(n_1, n_2)$ 为 $C_l(n_1, n_2)$ 对应的半调图像, 其中 $l=1, 2, \dots, P$, (n_1, n_2) 表示像素的位置。定义图像 $\{C_l\}$ 与 $\{F_l\}$ 的峰值信噪比为:

$$PSNR(C, F) = \sum_{l=1}^P \left[10 \cdot \log_{10} \frac{x_l \cdot y_l \cdot 255^2}{\sum_{i=1}^{x_l} \sum_{j=1}^{y_l} (C_l(i, j) - F_l(i, j))^2} \right]$$

大致可将算法描述为以下 4 个步骤:

Step 1 初始化 $a=0$, 且 $T_a = \emptyset$;

Step 2 令 $a=a+1$, 定义 $T_{a,i,j} = T_{a-1} + (i, j)$, 任意 $(i, j) \in N_L$, 将 $T_{a,i,j}$ 作为 LUT 模板, 对连续图 $\{C_l\}$ 和半调图 $\{H_l\}$ 进行训练、建表与逆半调恢复, 利用模板 $T_{a,i,j}$ 进行逆半调恢复的图片用 $\{\hat{C}_{a,i,j}\}$ 表示 (共 P 张逆半调图);

Step 3 计算 P 对图像的平均峰值信噪比 $\overline{PSNR}(C, \hat{C}_{a,i,j})$, 其中 $(i, j) \in N_L$,

$$\overline{PSNR}(C, \hat{C}_{a,i,j}) = PSNR(C, \hat{C}_{a,i,j}) / P$$

$$\text{令 } (p, r) = \max_{(i,j) \in N_L} \overline{PSNR}(C, \hat{C}_{a,i,j}),$$

即 T_{a-1} 新增 (p, r) 点能使逆半调图像的峰值信噪比比新增其它点的要高。将 (p, r) 添加到模板 T_a 中, 即 $T_a = T_{a-1} + \{(p, r)\}$;

Step 4 若 T_a 的元素小于 M ($a < M$), 则转至步骤 2, 否则结束。

算法流程图如图 4 示。

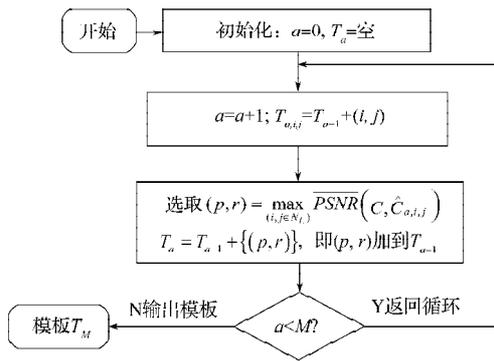


图4 模板选择流程图

Fig. 4 Template selection flowchart

4 实验结果

本文实验在 VC 6.0 的 MFC 与 Matlab 7.0 中进行。空值估计算法中，对空值率与训练样本数量、所选模板之间关系的实验结果已在前节列出。模板选择算法实验中，选取 70 幅训练图。针对该 70 幅图，使用本文最佳模板选择算法进行模板选择，求取的最

佳 LUT 模板如图 5 和图 6 所示。因为该实验目的是求取针对该训练样本的最佳 LUT 模板，所以该实验所求得的最佳 LUT 模板因训练样本不同而不同。

	1	2	3	
4	5	6	7	
8	9	0	10	11
12	13	14	15	

图5 最佳 16 邻域模板

Fig. 5 Optimal 16-pels template

1	2	3	4	
5	6	7	8	9
10	11	0	12	13
14	15	16	17	18

图6 最佳 19 邻域模板

Fig. 6 Optimal 19-pels template

前节已给出了基于高斯低通滤波的空值估计算法。结合最佳模板选择算法的实验结果，利用求得的最佳模板（图 4）进行训练、建表、逆半调恢复，其中建表阶段运用高斯低通滤波进行空值估计。将本文算法的实验结果与文献[7]和[8]中的进行比较，实验结果图及客观评价对比见图 7 和表 2。



图7 试验原图与本文算法及文献算法的逆半调图比较

Fig. 7 Comparison of original image, the image from the proposed algorithm and the image from the reference algorithm

表2 实验结果分析

Table 2 Analysis of experimental results

图像名称	逆半调图像峰值信噪比	
	LUT	Proposed
Lena	22.717 5 ^[7]	28.613 2
Pepper	22.359 3 ^[7]	29.511 0
Tree	27.672 3 ^[8]	27.819 2

根据图6和表2所示实验对比结果可以得出, 使用文献[7]和文献[8]中的算法恢复的逆半调图像 b, e, h 含有较明显的噪声。这可能是由于其采用的空值估计算法对LUT表中空值的估计偏差较大引起的。其主观评价结果较差, 略微有颗粒感。在客观评价结果中, 其峰值信噪比也较低。图6中的图 c, f, i 为采用本文的空值估计算法与最佳模板选择算法求得的模板所恢复的逆半调图。由于采用的是最高峰值信噪比这一约束条件下选择出来的模板进行LUT逆半调, 因此逆半调恢复的图像的PSNR值较高, 即该算法在客观评价中可靠有效。视觉主观方面, 本文所提算法在抑噪声、保边缘上也有较好的效果。

5 结语

本文在传统LUT算法基础上对该算法进行了完善与改进, 阐述了求取LUT最佳模板的算法, 并解决了LUT建表阶段所产生的空值问题, 从而形成完整的LUT表。

实验结果表明: 本文所提出的算法具有较高的有效性与可靠性, 并且具有较低的空间和时间复杂度; 不仅对误差分散半调图像的恢复有很好的效果, 而且对其它各种算法产生的半调图像的恢复有很高的PSNR值。

参考文献:

[1] Mese M, Vaidyanathan P P. Tree-Structured Method for LUT Inverse Halftoning and for Image Halftoning[J]. Image

Processing, IEEE Transactions on, 2002, 11(6): 644-655.

- [2] 王娜. 扫描图像逆半调恢复研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2008.
Wang Na. Research of Inverse Halftoning for Scanned Image [D]. Xi'an: Xidian University, 2008.
- [3] 郑海红, 王义峰, 曾平. 一种自适应误差分散逆半调算法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2009, 41(11): 235-237.
Zheng Haihong, Wang Yifeng, Zeng Ping. An Adaptive Error Diffusion Inverse Halftoning Algorithm[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2009, 41(11): 235-237.
- [4] 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.
Kong Yueping. A Study of Inverse Halftoning and Quality Assessment Schemes[D]. Xi'an: Xidian University, 2008.
- [5] 黄丽君, 文志强. 基于色彩分类的查找表图像逆半调方法[J]. 湖南工业大学学报, 2013, 27(5): 95-99.
Huang Lijun, Wen Zhiqiang. Image Inverse Halftone Method of Look-Up Table Based on Color Block Storage[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2013, 27(5): 95-99.
- [6] 黄丽君, 文志强, 胡柳. 一种基于LUT的图像逆半调改进算法[J]. 计算机技术与发展 ISTIC, 2013, 23(6): 35-37.
Huang Lijun, Wen Zhiqiang, Hu Liu. Inverse Halftoning Improved Algorithm Based on the Look-Up Table Method [J]. Computer Technology and Development, ISTIC, 2013, 23(6): 35-37.
- [7] Atamena N, Tifedjadjine Z, Dibi Z, et al. A Fast Inverse Halftoning Algorithm Using LUT Approach for Grey-Level Images[C]//Information and Communication Technologies: From Theory to Applications, 2008. ISCAS 2008. 3rd International Conference on. [S.l.]: IEEE, 2008: 1-4.
- [8] Siddiqi U F, Sait S M. Algorithm for Parallel Inverse Halftoning Using Partitioning of Look-Up Table (LUT)[C]//Circuits and Systems, 2008. ISCAS 2008. IEEE International Symposium on. [S.l.]: IEEE, 2008: 3554-3557.

(责任编辑: 廖友媛)