

# LUT与Elman网络相结合的图像逆半调算法

孔月萍<sup>1,2)</sup> 曾平<sup>1)</sup> 何波<sup>2)</sup> 郑海红<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>(西安电子科技大学外部设备研究所, 西安 710071) <sup>2)</sup>(西安建筑科技大学信息与控制工程学院, 西安 710055)

**摘要** 为改进查找表逆半调算法中“未出现半调模式逆半调值”的估计精度,提出了一种查找表与Elman回归网络相结合的图像逆半调算法。该算法首先通过样本图集生成初步逆半调查找表,然后以Elman型回归网络为工具,构造、训练逆半调逼近模型,最后达到拟合“未出现半调模式逆半调值”的目的,产生完整查找表,支持逆半调处理。实验结果及性能分析表明,应用本文算法生成的逆半调重建图像在视觉效果及PSNR指标上表现良好,具有运行速度快、空间复杂度低的特点。

**关键词** 半调 查找表逆半调 Elman回归网络

中图分类号: TP391.41 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2007)11-1988-04

## Inverse Halftoning Algorithm Based on Look up Table and Elman Network

KONG Yue-ping<sup>1,2)</sup>, ZENG Ping<sup>1)</sup>, HE Bo<sup>2)</sup>, ZHENG Hai-hong<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>(Research Institute of Computer Peripherals, Xidian University, Xi'an 710071)

<sup>2)</sup>(College of Information and Control, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055)

**Abstract** In order to improve the estimation precision of inverse halftoning values whose halftone patterns don't appear in image training set, an inverse halftoning method based on look up table(LUT) and Elman recurrent network is proposed. Firstly the preliminary LUT is built from image training set. Then the Elman recurrent network is used to approximate the mapping between halftoning and inverse halftoning. After studying, training and optimizing the structure, layers and nodes of the Elman network are established appropriately. With this network the continuous-tones of non-existent halftone patterns are estimated. And the complete LUT is generated. Experiments show that the proposed algorithm can generate inverse halftoning images of good in both visual effect and PSNR while having low memory requirement and inexpensive computation than some of existing algorithms.

**Keywords** halftoning, look up table, inverse halftoning, Elman recurrent network

## 1 引言

将连续色调图像变换为等感观半色调图像的技术称为数字半调(Halftoning)<sup>[1,2]</sup>。而由半色调图像重建连续色调图像则称为逆半调(inverse halftoning),在印刷、打印图像的扫描输入、传真、部分网上查询等应用中,人们只能获得半色调图像,此

时,如需对图像进行识别、压缩、增强、缩放等处理,必须先进行图像逆半调<sup>[3]</sup>。

目前的图像逆半调算法主要有3大类:估值法<sup>[3-5]</sup>、滤波法<sup>[6-8]</sup>和基于机器学习<sup>[9-11]</sup>的方法。估值类算法通常以误差分散半调核(简称半调核)为先验知识进行系统迭代,运算量过大;大部分滤波算法复杂度较低,但图像细节的保持能力较差;而基于机器学习的算法是通过一定数量的参考图像样本

基金项目:国家部委预研基金项目(51416050205DZ0144);陕西省自然科学基金项目(2004F32);陕西省教育厅专项基金项目(04JK244)

收稿日期:2005-12-05; 改回日期:2006-08-14

第一作者简介:孔月萍(1965-),女,副教授。1996年获西安建筑科技大学计算机应用硕士学位,现为西安电子科技大学博士研究生。主要研究方向为图形图像处理、网络数据库技术,发表论文10余篇。E-mail: kongyp@mail.xidian.edu.cn

集对系统进行训练, 获得半调-逆半调对应转换数据实现逆半调, 因此, 该算法执行速度快、空间复杂度低。

查找表(简称 LUT)逆半调是典型的机器学习算法之一, 它从一组半调图及其连续色调图构成的样本训练集入手, 通过分析它们之间的统计特征, 生成 1 组半调模式到逆半调值的映射 LUT; 由于样本训练集的有限性, LUT 中会存在某些“空值”, 即未出现半调模式的逆半调值, 该类逆半调值的估计方法及准确性, 决定了逆半调重建图像的效果, 是 LUT 逆半调算法的难点之一<sup>[9,10]</sup>。本文在文献[10]的基础上, 运用 Elman 回归网络构建、训练逆半调逼近模型, 并利用该模型拟合未出现半调模式的逆半调值, 从而得到完整半调-逆半调 LUT, 支持 LUT 逆半调。此方法较好的模拟了逆半调系统的非线性特性, 获得的逆半调效果优于文献[10]中提到的估值方法。

## 2 LUT 图像逆半调算法

分析典型数字图像的半调模型<sup>[1,2]</sup>可以发现, 对一个连续色调像素点而言, 其半调值的产生均与其邻域像素的连续色调值相关。因此, 若在一对连续色调图及其半调图之间, 选择一定大小、形状的邻域模板, 对两幅图像进行分块, 研究并提取半调邻域和其对应连续色调邻域之间的结构、灰度值统计特征, 形成“半调特征模式”到“连续色调值”之间的映射关系, 逆半调问题将迎刃而解。因此, 基于 LUT 的图像逆半调算法<sup>[10]</sup>将分 4 步实施。

(1) 选择合适邻域构成 LUT 模板, 以此模板为基准确定逆半调 LUT 的数据及存储结构。

(2) 以  $n$  对半调图及其连续色调图作为逆半调 LUT 表的训练图集, 用所选模板对训练图集中的所有图像进行分块, 统计半调特征模式的种类, 抽取各模式与其连续色调值之间的映射关系, 产生初始 LUT 表。

(3) 用已出现半调特征模式及其对应逆半调 LUT 值, 估计未出现半调特征模式的逆半调值。

(4) 应用第(2)、(3)步合成的完整逆半调 LUT 表, 对半调图像进行 LUT 逆半调。

文献[10]给出了 4 种常用 LUT 逆半调模板, 本文以其中的 16-rect 为例,  $a = 4 \times 4 = 16$ , 在此半调邻域中, 因  $b(i, j) \in \{0, 1\}$ , 故其所有可能半调特征模

式  $B(k)$  共  $2^a$  个, 可表示为式(1)。若它们对应的当前处理像素逆半调值记为  $T(B(k))$ , 则逆半调 LUT 表应由  $2^a \times (a + 1)$  个数据组成。为节省存储空间并加快查找速度, 可只按  $B(k)$  的升序存储其对应  $T(B(k))$  值作为逆半调 LUT 表, 因此, 仅需  $2^a$  个单元。

$$B(k) = \{b(i, j) \mid 1 \leq i, j \leq a/4, k = 2^i, a = 4 \times 4\} \quad (1)$$

## 3 基于 Elman 网络的逆半调逼近模型

在 LUT 逆半调算法中, 由于训练图集的有限性, 必有某些半调模式  $B(k)$  从未出现在训练图集中, 其对应的逆半调 LUT 值  $T(B(k))$  为“空”, 需用 Low-pass filtering、Hamming distance、Best Linear estimator<sup>[9,10]</sup> 等近似原则估计。Low-pass filtering 方法认为, 逆半调 LUT 值  $T(B(k))$  与其对应半调模式  $B(k)$  呈线性低通关系, 因此可运用 Gaussian 低通滤波器作用于未出现半调模式, 产生估计值。Hamming distance 方法则直接从已出现半调模式中选择与未出现模式 Hamming 距离最小者的逆半调值作为估计值。Best Linear estimator 方法则认为, 半调模式及其逆半调值之间构成线性矩阵关系, 因而运用最小二乘法解矩阵方程得出估计值<sup>[10]</sup>。上述估计原则均假设了半调模式与其对应像素的逆半调值之间为线性关系。

但典型误差分散半调系统如图 1 所示, 输入  $z_{i,j}$  是灰度为  $g$  的原始连续色调图像, 输出  $y_{i,j}$  为半调图像,  $Q(\cdot)$  为量化函数,  $h_{m,l}$  为误差分散核, 则系统响应为式(2)~(3)。

$$y_{i,j} = Q(z_{i,j} + \sum h_{m,l} e_{i-m,j-l}) \quad (2)$$

$$Q(u) = \begin{cases} 1 & \text{if } u \geq g/2 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

由于量化因子  $Q(\cdot)$  的存在, 显然半调是一个非线性系统<sup>[2]</sup>, 它仅将量化半调噪声引入到了图像的中高频区域<sup>[1,2]</sup>, 因此, 其逆问题的求解如采用简

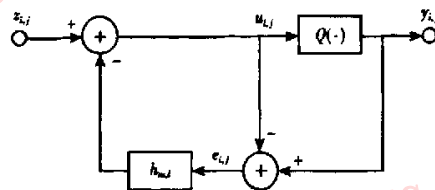


图 1 误差分散半调模型  
Fig. 1 The model of error diffusion halftoning

单线性低通会带来边缘信息的大量损失,为弥补此缺陷,一些现有的逆半调算法采取了非线性滤波、自适应迭代、边缘增强<sup>[3-4]</sup>等手段提高图像重建质量。

本文在文献[10]算法的基础上,从模拟逆半调系统的非线性特性着眼,引入 Elman 型回归网络,构建、训练逆半调逼近模型,以此模型拟合未出现半调模式的 LUT 值,提高未出现半调模式 LUT 估计值的精度,支持 LUT 逆半调。

Elman 网络是在 BP 网基础上增加反馈信号及偏差单元后构成的内部回归神经网络,这种内部状态反馈较好地描述了系统的非线性行为,便于系统在学习过程中引入经验知识,从而提高训练速度和精度<sup>[12]</sup>。从 16-rect 模板的半调特征模式与逆半调值之间的映射关系出发,结合 Elman 网络的基本设计原则,本文构建了如图 2 所示的 LUT 逆半调逼近网络,其隐层节点不仅接收来自输入层的信号,还接收隐层节点自身的一步延时信号(即图 2 中的关联节点),延时信号的个数与隐层节点数相同。设  $m$ 、 $n$  为 Elman 神经网络的输入节点数和隐层节点数,  $A$ 、 $B$ 、 $C$  分别为从输入层到隐层、隐层到延时信号、隐层到输出层的权重系数矩阵,则该网络中各层神经元的输出为式(4)~(7),其中,  $x_i$  表示输入层第  $i$  个神经元;  $z_j$  表示隐层第  $j$  个神经元。

$$y(t) = \sum_{j=1}^n c_{i,j} z_j(t) \quad (4)$$

$$z_j(t) = f(S_j(t)) \quad (5)$$

$$S_j(t) = \sum_{i=1}^m B_{i,j} z_j(t-1) + \sum_{i=1}^m A_{i,j} x_i(t) \quad (6)$$

$$f(S_j(t)) = \frac{1}{1 + e^{-S_j(t)}} \quad (7)$$

综上所述,基于 Elman 回归网络的 LUT 数据拟合算法如下:

(1) 从已获得半调模式 LUT 值中,选取出现频率大于阈值  $K$  的数据作为学习样本;

(2) 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  $A$ 、 $B$ 、 $C$ ;

(3) 用训练好的 Elman 网络拟合未出现半调模式的 LUT 逆半调值  $Q(i)$ 。由于  $Q(i)$  代表像素的连续色调,因此还需依照式(8)将  $Q(i)$  投影到整数区间  $[0, 255]$ 。

$$P(i) = \begin{cases} 0 & \text{if } Q(i) < 0 \\ 255 & \text{if } Q(i) > 255 \\ \text{round}(Q(i)) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

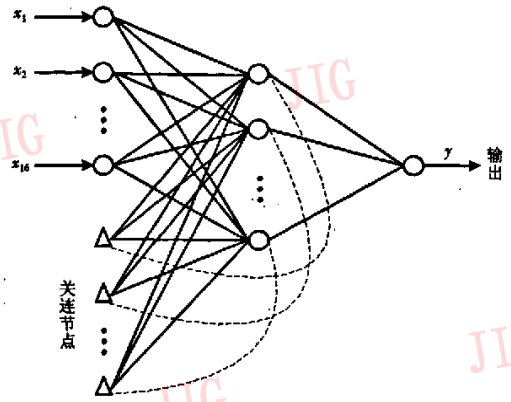


图 2 Elman 型逆半调网络

Fig. 2 Elman recurrent network for inverse half-toning

### 4 实验结果

依据文献[10]提出的样本图集选择原则,以及前述算法训练,拟合了灰度逆半调 LUT 表,实验中设定 Elman 网络的学习误差为  $e = 10^{-4}$ ,并针对不同隐层节点数提取、记录多组 LUT 数据,分别进行逆半调试验;当  $n = 25$  时,结果较为理想。因逆半调图像在视觉效果上仍有少量“点状”噪声,故使用常规中值滤波器对其进行后处理,仿真结果及其 PSNR 值分别如图 3、表 1 所示。

表 1 LUT 逆半调结果的 PSNR 值

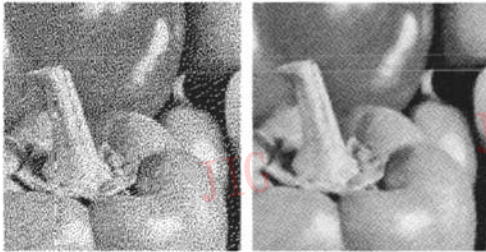
Tab. 1 The PSNR for LUT inverse half-toning

图像名称	PSNR 值 (512 × 512 图像)	
	LUT <sup>[10]</sup>	Proposed
Zelda	31.82	31.98
Lena	28.39	28.81
Peppers	28.22	28.75
Boat	27.93	28.34

观察图 3 及表 1 的评价数据可以看出,用 LUT 和 Elman 网络相结合的逆半调效果优于文献[10],尤其是重建图像中 Zelda 的眼睛、Peppers 的根部和 Boat 的桅杆等细节处信息恢复较好,视觉效果令人满意。此外,运用文献[8]提出的算法复杂度计算原则,以  $N \times N$  图像为例将本文算法与现有逆半调算法<sup>[3,5,7]</sup>进行了性能分析和对比,结果如表 2。



(a) Zelda 误差分散半调图像(左)及其逆半调图像(右)



(b) Peppers 半调图像(左)及其逆半调图像(右)



(c) Boat 误差分散半调图像(左)及其逆半调图像(右)

图 3 半调图像及其隐层节点数为 25 的 Elman 网络拟合生成 LUT 逆半调图

Fig. 3 Error diffusion halftoning and its inverse halftoning for Elman recurrent network on  $n = 25$

表 2 逆半调算法性能分析

Tab. 2 Performance analysis for different algorithms

逆半调算法	内存占用(Bytes)	每像素运算次数 $A$
POCS <sup>[3]</sup>	$8N^2$	$A \geq 2000$
MAP <sup>[5]</sup>	$8N^2$	$A \geq 2000$
Wavelet <sup>[7]</sup>	$36N^2$	$A \geq 500$
Proposed	$2^{16}$	$A < 50$

## 5 结 论

本文在分析误差分散半调系统特性,以及线性估计 LUT 逆半调算法中“未出现半调模式逆半调

值”缺陷的基础上,提出了一种运用 Elman 回归网络逼近非线性逆半调模型的方法,达到拟合全部图像逆半调 LUT 数据的目的,从而提高该算法中“未出现半调模式逆半调值”的估计精度。实验结果表明应用本文算法生成的逆半调图像在视觉效果及 PSNR 指标上表现良好;由于该算法进行图像处理时仅需分块及查表操作,且只占用有限空间存储 LUT 数据,因此运行效率较高,适合于并行计算和硬件实现。

## 参考文献 (References)

- 1 Ulichney R A. Digital Halftoning[M]. Cambridge, MA, USA: MIT Press, 1987: 233 - 331.
- 2 Kite T D, Evans B L, Bovik A C. Modeling and quality assessment of halftoning by error diffusion [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2000, 9(5): 909 - 922.
- 3 Hein S, Zakhor A. Halftoning to continuous-tone conversion of error-diffusion coded images[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1995, 4(2): 208 - 216.
- 4 Wong P W. Inverse halftoning and kernel estimation for error diffusion [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1995, 4(4): 486 - 498.
- 5 Stevenson R L. Inverse halftoning via MAP estimation [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1997, 6(4): 574 - 583.
- 6 Venkata N D, Kite T D, Venkataraman M, et al. Fast blind inverse halftoning[A]. In: Proceedings of International Conference on Image Processing[C], Chicago, Illinois, USA, 1998: 64 - 68.
- 7 Xiong Z, Orchard M T, Ramchandran K. Inverse halftoning using wavelet[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1999, 8(10): 1479 - 1483.
- 8 Shen Mei-yin, Kuo Jay C C. A robust nonlinear filtering approach to inverse halftoning[J]. Journal of Visual Communication and Image Representation, 2001, 12: 84 - 95.
- 9 Mese M, Vaidyanathan P P. Look up table inverse halftoning[A]. In: Proceedings IEEE International Symposium on Circuits System [C], Geneva, Switzerland, 2000: 517 - 520.
- 10 Kong Yue-ping, Zeng Ping. Inverse halftoning for error diffusion based on pattern recognition and look-up table[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2004, 25(4): 177 - 181. [孔月萍, 曾平. 模式识别与 LUT 相结合的误差分散类逆半调方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2004, 25(4): 177 - 181.]
- 11 Kim H Y, Queiroz R L. Inverse halftoning by decision tree learning [A]. In: Proceedings IEEE International Conference on Image Processing[C], Barcelona, Spain, 2003, 2: 913 - 916.
- 12 Xie Qing-guo, Wan Shu-yun, Zhao Jin. A systemic design for Elman recurrent network[J]. Journal Huazhong University of Science and Technology (Nature Science Edition), 2003, 30(3): 22 - 24. [谢庆国, 万淑芸, 赵金. 一种 Elman 回归网络的设计方法[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2003, 30(3): 22 - 24.]