

PCB 三维 CT 图像的直方图变权累加增强算法

童 莉, 曾 磊, 李中国, 闫 镔

(解放军信息工程大学信息工程学院, 郑州 450002)

摘 要: 印刷电路板(PCB)在现代工业中发挥着重要作用,通过锥束 CT 对 PCB 进行三维无损检测具有重要意义。但是在 CT 成像过程中,存在金属伪影、射束硬化等诸多影响图像质量的因素,导致低对比度 PCB 三维 CT 图像的出现。针对 PCB 三维 CT 图像中由于对比度低造成电路信息难以分辨的问题,提出一种基于变权直方图的图像增强算法。在基于直方图生成累积概率密度函数时,通过变权累积求和的方式,把灰度值大小、灰度值概率以及灰度值区间附近的概率分布引入到变权策略中,生成一个兼顾提高对比度和扩展灰度范围的灰度映射曲线,实现低对比度图像的增强,提高 PCB 图像中物体的可分辨性。实验结果表明,该算法取得了较好的增强效果和图像质量。

关键词: 图像增强;直方图均衡;低对比度图像;三维图像;印刷电路板;CT 图像

中文引用格式:童 莉,曾 磊,李中国,等. PCB 三维 CT 图像的直方图变权累加增强算法[J]. 计算机工程,2015,41(1):236-239.

英文引用格式:Tong Li,Zeng Lei,Li Zhongguo,et al. Histogram Variable Weight Cumulating Enhancement Algorithm of PCB Three-dimensional CT Image[J]. Computer Engineering,2015,41(1):236-239.

Histogram Variable Weight Cumulating Enhancement Algorithm of PCB Three-dimensional CT Image

TONG Li,ZENG Lei,LI Zhongguo,YAN Bin

(School of Information System Engineering,PLA Information Engineering University,Zhengzhou 450002,China)

【Abstract】 Printed Circuit Board(PCB) is playing an important role in the modern industry, while Cone Beam Computed Tomography(CBCT) is an effective way for PCB imaging and detection. The problem of low contrast of PCB always happens because of the artifacts introduced during the CT imaging. Aiming at the problem of enhancing the three-dimensional PCB low contrast CT image, this paper proposes a method based on variable weight cumulating histogram equalization. The value and probability of the gray and the probability distribution of the span close to the gray are introduced in the strategy of altering the weight when constructing the cumulative density function. A gray transfer curve considering both enhancement effect and gray level expand is produced to promote the metal in the low contrast PCB image, thus enhances the image. Experimental results show that this algorithm can obtain better enhancement effect and image quality.

【Key words】 image enhancement; histogram equalization; low contrast image; three-dimensional image; Printed Circuit Board(PCB); CT image

DOI:10.3969/j.issn.1000-3428.2015.01.044

1 概述

印刷电路板(Printed Circuit Board, PCB)是电子产品的非常重要组成部分,起着至关重要的作用。通过锥束 CT(Cone Beam Computed Tomography, CBCT)对 PCB 进行三维成像和无损检测,具有重要意义。但是由于 PCB 含有大量的金属,在 CT 成像过程中,存在金属伪影、射束硬化等诸多影响图像质量

的因素,导致低对比度 PCB 三维 CT 图像的出现。此时,需要应用图像增强技术来突显 PCB 中的金属物质。直方图增强技术是最基本的图像对比度增强方法^[1],通过改变图像灰度映射关系以改善整体图像灰度的动态分布,其中,很重要的一种方法是直方图均衡(Histogram Equalization, HE)算法。HE 算法通过对已知灰度概率密度的图像进行处理使其变成一幅概率密度服从均匀分布的新图像,通过增加和调节灰

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61372172);国家“863”计划基金资助项目(2012AA011603)。

作者简介:童 莉(1978-),女,博士,主研方向:图形图像处理、模式识别;曾 磊,博士;李中国,硕士研究生;闫 镔,博士。

收稿日期:2014-03-10 **修回日期:**2014-04-08 **E-mail:**tom.yan@gmail.com

度的动态分布范围的方式来增强图像的对比度,从而实现图像增强^[2]。HE 算法具有原理简单、计算速度快的优点,是一个常用的图像增强方法。但是 HE 算法使用全局直方图信息,这限制了图像中某些局部区域的对比度拉伸力度,使某些细节与背景之间的对比度难以得到有效增强,增强效果不易控制,甚至出现退化^[3]。并且输出图像的灰度级有可能被过多地合并,产生灰度级丢失和不连续,导致图像的一些细节信息丢失。针对这些问题,一些研究者采取的策略是分区进行增强,在缓解传统直方图均衡算法的过增强问题的同时尽可能多地保留图像的一些细节信息,采取的方法是先对原图像的全局直方图的灰度范围进行分段形成子区间,然后分别在每个子区间进行直方图均衡增强处理,最后再在全局直方图上进行灰度合并。这些改进算法包括亮度保持的双直方图均衡 (Brightness Preserving Bi-histogram Equalization, BBHE)^[4]、递归均值分离直方图均衡 (Recursive Mean-separate Histogram Equalization, RMSHE)^[5]、双面积均等子图像直方图均衡 (Dualistic Sub-image Histogram Equalization, DSIHE)^[6]、最小灰度均值误差双直方图均衡 (Minimum Mean Brightness Error Bi-histogram Equalization, MMBEBHE)^[7]、加权均值分离子直方图均衡 (Weighting Mean-separated Sub-histogram Equalization, WMSHE)^[8]、递归分离加权直方图均衡算法 (Recursively Separated and Weighted Histogram Equalization, RSWHE)^[9] 以及加权定限直方图均衡算法 (Weighted and Thresholded Histogram Equalization, WTHe)^[10] 等算法。

但是对于低对比度 PCB 三维 CT 图像来说,由于成像时的种种原因,在其灰度直方图上有时会出现 0 值附近集中的现象,很难用肉眼看清楚切片中的导线等金属信息。由于图像的对比度低,并且整体的灰度表现也非常低,因此在实施增强算法时需要灰度进行急剧拉伸才能有效凸显金属物质,同时,还要兼顾灰度的动态范围。此时,增强算法的灰度转换曲线应该要陡峭,以最快的速度把图像从低灰度值区间拉伸到高灰度值区间。但是上述采用对直方图的区间进行分割得到子区间并在各个子灰度区间进行直方图均衡的方法,得到的最左侧子区间对应于原灰度直方图的波峰区间,虽然其累积概率密度函数会很大,但是其灰度映射的区间则只是灰度值的低端区间,使得在后续的灰度拉伸过程中即使有了很宽的灰度拉伸空间,但是拉伸的速度或者幅度却提不起来,因为此时不用原图位于低灰度值附近的波峰区间的大概率密度函数进行灰度拉伸,不能明显突出 PCB 图像中的金属物质。针对该问题,本文提出一种基于变权直方图的增强算法 (VWCHE),以有效凸显 PCB 图像中的金属物质信息。

2 变权直方图增强算法

不同于 HE 算法,本文算法所定义的累积概率密度函数为:

$$C(I_k) = \sum_{j=0}^k (I_k^\alpha \times (p(I_j) \times d(I_k, I_j))) \quad (1)$$

其中, $d(I_k, I_j)$ 表示灰度级 I_k 和 I_j 的距离; I_k^α 是一个控制常数,由 I_k 和 α 决定其大小,且 $\alpha > 0$ 。

把 $C(I_k)$ 做如下的变形:

$$C(I_k) = I_k^\alpha \times \sum_{j=0}^k (p(I_j) \times d(I_k, I_j)) \quad (2)$$

令:

$$\hat{C}(I_k) = \sum_{j=0}^k (p(I_j) \times d(I_k, I_j)) \quad (3)$$

$$\hat{p}(I_j) = p(I_j) \times d(I_k, I_j) \quad (4)$$

则有:

$$C(I_k) = I_k^\alpha \times \hat{C}(I_k) = I_k^\alpha \times \sum_{j=0}^k \hat{p}(I_j) \quad (5)$$

而直方图均衡算法中的累积概率密度函数的表达式为:

$$C(I_k) = \sum_{j=0}^k p(I_j) \quad (6)$$

对比两者发现,除了前面多了一个常数之外,本文算法的 $C(I_k)$ 在形式上与直方图均衡算法一样,不过此时的概率密度函数由 $p(I)$ 变成了 $I_k^\alpha \times \hat{p}(I_j)$ 。

对式(1)进行变形:

$$C(I_k) = \sum_{j=0}^k (I_k^\alpha \times (p(I_j) \times d(I_k, I_j))) = \sum_{j=0}^k (p(I_j) \times (I_k^\alpha \times d(I_k, I_j))) \quad (7)$$

对式(6)进行变形:

$$C(I_k) = \sum_{j=0}^k p(I_j) = \sum_{j=0}^k (p(I_j) \times 1) \quad (8)$$

把式(8)中的常数 1 换成 $I_k^\alpha \times d(I_k, I_j)$, 就由直方图均衡算法变成了本文所提的 VWCHE 算法。在直方图均衡算法中,在灰度值 I_k 处的累积概率密度函数 $C(I_k)$ 是图像中所有的小于 I_k 的灰度 I_j 的概率 $p(I_j)$ 的等权求和累积,且权值都是 1。而在本文算法中,则采取了非等权求和累积的策略,在灰度值 I_k 处的累积概率密度函数 $C(I_k)$ 是图像中所有的小于 I_k 的灰度 I_j 的概率 $p(I_j)$ 和一个大小为 $I_k^\alpha \times d(I_k, I_j)$ 的权值相乘得到。

对于不同的 I_k 来说,其对 $C(I_k)$ 的加权幅度也会不一样,由于 $\alpha > 0$, I_k 越大,则 I_k^α 会越大,其对 $C(I_k)$ 的加权幅度也会越大,相对于传统的直方图均衡算法来说,本文算法会提升大灰度值的权重。同时,对于不同的 I_j 来说,其和 I_k 的距离函数 $d(I_k, I_j)$

是不一样的,距离越近,其加权值越大。

由于采取了变权累积的方式,累积概率密度函数的最终结果不再为 1,因此需要对最终的结果进行归一化,得到一个最终结果为 1 的累积概率密度函数 $\tilde{C}(I_k)$:

$$\tilde{C}(I_k) = C(I_k) / \sum_{j=0}^{L-1} C(I_j) \quad (9)$$

然后以 $\tilde{C}(I_k)$ 为基础进行灰度映射,实现图像增强。由于 $C(I_k)$ 是 $p(I_j)$ 、 I_k^α 和 $d(I_k, I_j)$ 3 个因素综合考量的结果,对于那些灰度值较大,但是其概率很低的灰度值,此时,由于 $p(I_k)$ 很低,一般会伴随着其附近区间的灰度值的概率也会很低的现象,也就意味着从其附近区间得到的 $p(I_j) \times d(I_k, I_j)$ 也会很小,即使有 I_k^α 加权,其得到的累积概率密度函数值结果也未必比那些灰度值比其小但是概率却比其大得多的灰度所得到的累积概率密度函数值大。所以, $\tilde{C}(I_k)$ 并不能保证其像直方图均衡那样在全部的灰度区间具有单调递增特性。因此,在本文算法中需要对那些灰度值较大,但是其概率很低的灰度值的最终结果进行补偿,虽然有 I_k^α 能起到部分的补偿作用,但是有时还不够,需要采取其他措施。

本文算法根据低对比度 PCB 三维 CT 图像所反映出来的灰度直方图的特点以及人们的视觉习惯特性,运用灰度切割的方法来进行补偿:把所有大于 $\tilde{C}(I_k)$ 中最大值所对应的灰度值的灰度都映射到 255。即有 $\{f(I_b) = 255, \forall I_b > I_a, \tilde{C}(I_a) = 1\}$ 成立。

3 实验结果与分析

选取一个数据规模为 $518 \times 425 \times 56$ 像素的低对比度 PCB 三维 CT 图像进行实验。该三维图像包含 56 个大小为 518×425 像素的切片,其灰度直方图如图 1 所示。

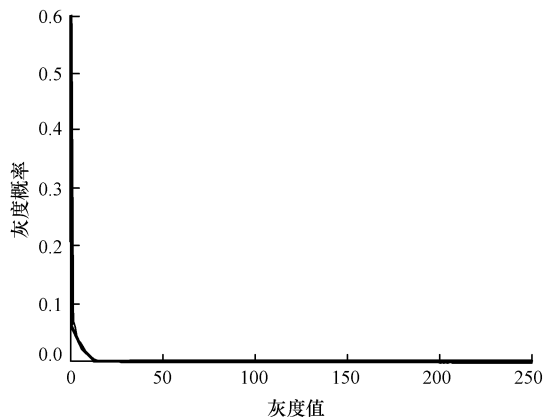


图 1 原图的灰度直方图

图 2 给出了不同算法得到的灰度映射变换曲线。

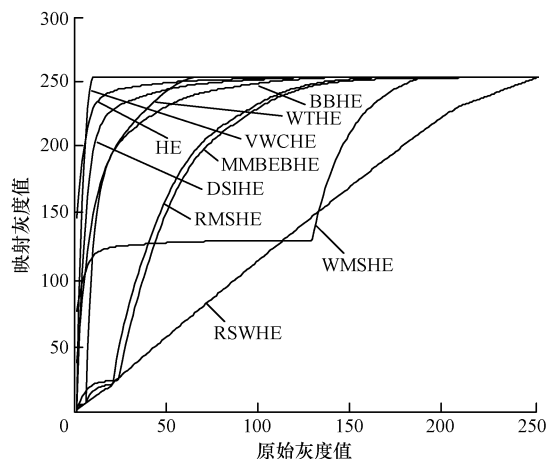


图 2 不同算法得到的灰度映射变换曲线

由图 2 可知,本文算法在灰度值 0 附近的区间对灰度进行急速拉伸,尽快把灰度值拉离低灰度,以更快地凸显金属,使其增强效果更明显。图 3 给出了不同增强算法结果中的第 10 层切片。

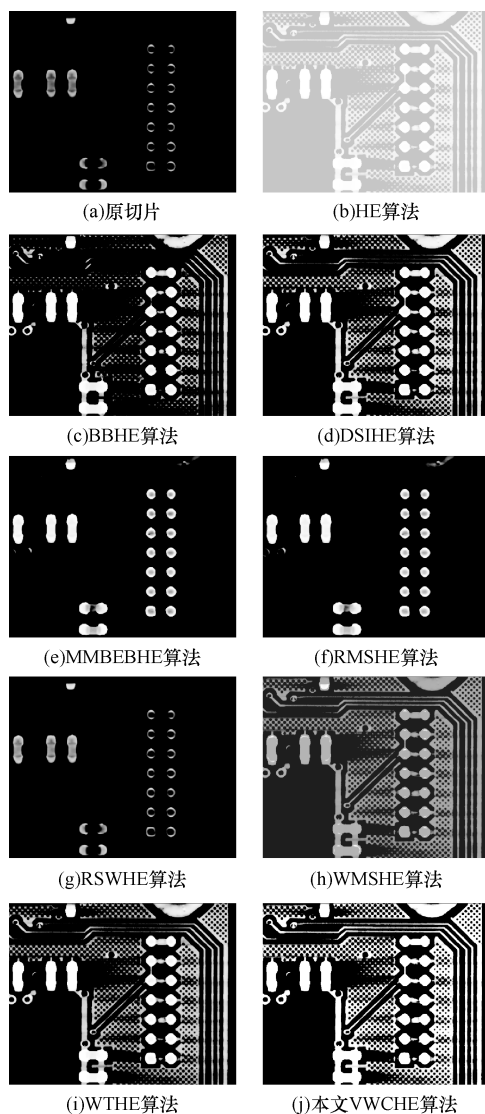


图 3 不同增强算法结果中的第 10 层切片结果

相关算法中的一些参数的设置:WTHE 算法中 $\alpha=0.5$;RSWHE 和 RMSHE 中 $r=2$;WMSHE 算法中 $r=1$,本文 VWCHE 算法中距离函数设为:

$$d(I_i, I_j) = e^{-\frac{(I_i - I_j)^2}{2\sigma^2}}$$

其中,设置 $\sigma=10, \alpha=0.5$ 。表 1 给出了各个不同算法的增强性能的衡量指标,其中,灰度分布方差指标 δ^2 、对比度指标 C 反映的是图像的整体增强效果;EME (Entropy Measure of Enhancement)、MEME (Michelson law Entropy Measure of Enhancement)、PEME (Power function of Entropy Measure of Enhancement)、PAME (Power function of Amplitude Measure of Enhancement)

等指标反映的是图像局部细节的增强效果^[11-12],也就是局部细节保持能力。在计算指标时是对各个具有同样大小规模的局部三维区域进行累加得到最终的指标值。由于小的局部区域比大的局部区域更能体现细节,因此在计算指标时选择的局部区域的大小为 $3 \times 3 \times 3$ 像素。这些指标都是越大说明增强效果越好。由表 1 可知,本文算法的所有增强性能衡量指标都要比其他算法要大,并且指标 δ^2 、 C 和 PEME 的值要远远大于其他算法,说明本文算法在低对比度图像增强方面具有非常强的优势,能够对低对比度 PCB 三维 CT 图像的增强取得更好的效果。

表 1 不同增强算法的性能指标

算法	δ^2	C	EME	MEME	PEME	PAME
BBHE	3 468.900 0	276.044 2	37.610 4	-38.473 3	0.680 6	-0.243 9
HE	1 155.900 0	81.198 1	6.181 8	-93.184 8	0.065 5	-0.508 3
DSIHE	5 896.100 0	424.740 4	76.233 4	-35.745 5	1.786 0	-0.221 4
MMBEBHE	861.012 5	37.373 2	47.559 8	-34.363 0	0.758 2	-0.233 4
RMSHE	954.318 1	39.188 6	40.467 4	-31.139 8	0.605 8	-0.232 1
RSWHE	187.478 6	7.024 7	35.757 7	-34.509 3	0.502 0	-0.259 0
WMSHE	308.644 1	22.415 5	6.191 7	-91.721 3	0.065 6	-0.505 3
WTHE	2 811.800 0	155.166 7	20.103 0	-52.430 8	0.242 9	-0.354 6
VWCHE	10 320.000 0	891.052 2	307.825 5	-29.651 3	131.307 0	-0.177 3

4 结束语

由于传统直方图均衡算法在生成累积概率密度函数时采取各个灰度概率等权值累积求和的方式,因此在采用传统直方图均衡算法提升 PCB 三维 CT 低对比度图像中的金属物质信息时,存在过增强或者未能充分扩展、拉伸灰度区间等问题。为此,本文提出一种基于变权累积的低对比度图像直方图增强算法。低对比度 PCB 三维 CT 图像在灰度直方图上表现出在低灰度区间集中的特性,通过变权累积求和的方式,把灰度值大小、灰度值概率以及灰度值区间附近的概率分布引入到变权策略中。实验结果表明,该算法生成的灰度映射曲线能兼顾增强效果和灰度扩展范围,有效提升图像中金属物质信息,取得了更好的增强效果和图像质量。本文算法涉及到的灰度方差 σ 和加权幂指数 α 2 个参数是根据经验值来设定,在大多数情况下能够获得不错的效果。在接下来研究工作中,将寻求一种根据不同图像来自适应设定这 2 个参数的算法,以获取更好的增强效果。

参考文献

[1] 马 旭,张 晋.数字牙 X 线图像常用增强方法比较研究[J]. 辽宁大学学报:自然科学版,2009,36(2):154-156.
[2] Gonzalez R C, Richard E W. Digital Image Processing[M]. [S.l.]:Prentice Hall Press,2002.
[3] 胡正平,刘 博,王成儒.基于极大灰度频数抑制结合动态直方图均衡的图像增强算法[J]. 电子与信息学报,2009,31(6):1327-1331.
[4] Yeong-Taeg K. Contrast Enhancement Using Brightness Preserving Bi-Histogram Equalization[J]. IEEE Transac-

tions on Consumer Electronics,1997,43(1):1-8.
[5] Chen S D, Ramli A. Contrast Enhancement Using Recursive Mean-Separate Histogram Equalization for Scalable Brightness Preservation[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics,2003,49(4):1301-1309.
[6] Wang Yu, Chen Qian, Zhang Baomin. Image Enhancement Based on Equal Area Dualistic Sub-image Histogram Equalization Method[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics,1999,45(1):68-75.
[7] Chen S D, Ramli A. Minimum Mean Brightness Error Bi-histogram Equalization in Contrast Enhancement[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2003, 49 (4): 1310-1319.
[8] Wu Peichen,Cheng F C,Chen Y K. A Weighting Mean-separated Sub-histogram Equalization for Contrast Enhancement [C]//Proceedings of International Conference on Biomedical Engineering and Computer Science. Wuhan, China:[s. n.],2010:1-4.
[9] Kim M,Chung M G. Recursively Separated and Weighted Histogram Equalization for Brightness Preservation and Contrast Enhancement[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics,2008,54(3):1389-1397.
[10] Wang Qing, Ward R K. Fast Image/Video Contrast Enhancement Based on Weighted Thresholded Histogram Equalization [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics,2007,53(2):757-764.
[11] Agaian S S, Panetta K, Artyom M G. A New Measure of Image Enhancement [C]//Proceedings of IASTED International Conference on Signal Processing & Communication. Marbella, Spain:[s. n.],2000:19-22.
[12] Agaian S S, Panetta K, Artyom M G. Transform Based Image Enhancement with Performance Measure[J]. IEEE Transactions on Image Processing,2001,10(3):367-381.

编辑 刘 冰