

基于二维直方图分析的二元子图微光图像增强处理*

孙韶媛¹⁾ 王利平²⁾ 张保民²⁾ 敬忠良¹⁾

¹⁾上海交通大学电信学院航空航天信息与控制研究所,上海,200030;

²⁾南京理工大学电子工程与光电技术学院,江苏,南京,210094)

摘要 提出了基于二维直方图分析的二元子图微光图像增强处理算法.根据原始图像的二维直方图分布特征,依据相邻像素的相关性数据,将图像分割成二元子图像,对每个子图像分别进行直方图均衡增强处理,最后合成得到完整的处理图像.通过用信息容量等图像评价参数对实验结果进行分析.表明此算法克服了对整幅图像进行直方图均衡时难以把握局部细节的缺点,得到了具有较好视觉质量的处理后微光图像.

关键词 图像增强,二维直方图,直方图均衡,微光图像,图像分割.

LOW LIGHT LEVEL IMAGE ENHANCEMENT BASED ON DUALISTIC SUB-IMAGE AND TWO DIMENSIONAL HISTOGRAM ANALYSIS *

SUN Shao-Yuan¹⁾ WANG Li-Ping²⁾ ZHANG Bao-Min²⁾ JING Zhong-Liang¹⁾

¹⁾Institute of Aerospace Information and Control, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China;

Electronic Engineering and Optoelectric College, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China)

Abstract A novel image enhancement technique suitable for low light level image, dualistic sub-image enhancement based on two dimensional histogram analysis and histogram equalization, is presented. Firstly, the low light level image is segmented to two sub-images according to the correlation between the neighboring pixels, which is based on the two dimensional histogram analysis. Then each sub-image is enhanced based on histogram equalization. Finally, the processed sub-images are composed into one image. The result indicates that the algorithm can not only enhance image information effectively but also keep the fine part of original low light level image well. And this algorithm eliminates the drawback of traditional histogram that the fine part is not easy to control and protect. This is meaningful for low light level night vision technology.

Key words image enhancement, two dimensional histogram, histogram equalization, low light level image, image segmentation.

引言

微光电视作为一种特种应用电视,可以在极低照度条件下工作,利用它可以大大提高人眼在微弱光照条件下的观察能力.然而微光电视图像与一般的可见光图像不同,它是经过多次光电转换和电子倍增形成的,尤其是当微光电视系统工作在其可探测照度范围的最低限时,输出图像的信噪比、对比度和分辨率都很低,图像的视觉效果很模糊^[1],因此

如何提高微光图像的质量就显得尤为重要.微光图像的增强处理可以有效地提高微光图像的视觉质量,提高对目标的探测与识别概率,具有重要的现实意义与应用价值.

直方图均衡是一种常用的图像增强技术,其优点是能自动地增强整个图像的对比度,但它的具体增强效果不易控制,处理的结果总是得到全局均衡化的直方图;而且对于某些灰度频数较小的区域,对比度将被削弱甚至消除^[2].为此,研究人员提出了

* 航空科学基金(批准号02D57003)和教育部高等学校博士学科点专项科研基金(20020248029)资助项目

稿件收到日期 2002 - 09 - 23,修改稿收到日期 2003 - 02 - 02

* The project supported by the Aero Science Foundation (No. 02D57003) and china Ph. D Discipline Special Foundation (No. 20020248029)

Received 2002 - 09 - 23, revised 2003 - 02 - 02

许多改进的直方图均衡方法,但都是基于一维直方图分析基础上的^[3-5].一维直方图只是对图像孤立点的统计,不能统计像素间的相关关系.由于微光夜视图像的特殊应用及其图像特征,使得微光图像的每一个细节都很有价值.二维直方图是能够描述图像像素间相关性的频数集合,本文在分析图像二维直方图分布特点的基础上,根据信息熵理论先将图像分割为面积相等的二元子图,然后对子图分别进行均衡增强处理,最后,合成得到完整的处理后图像.用二维直方图信息容量等参数作为评价标准比较了处理前后以及传统均衡处理的图像.结果表明,该处理算法在增强图像的同时较好地保护了图像的细节,对微光图像的进一步目标识别与分割具有重要意义.

1 微光图像特征及直方图均衡

1.1 基于二维直方图的微光图像特征分析

微光电视图像与一般可见光图像不同,它是经过多次光电转换和电子倍增而形成的,具有对比度低、信噪比低、灰度级有限、瞬态动态范围差、分辨率很低等特征^[1].1952年,贝尔实验室的克雷茨默对相邻像素间的差值进行测定的实验结果表明,相邻像素灰度的差值大部分集中于零差值附近,这说明像素间有较大的相关性.因此,图像信号空间相关性可用相邻像素间的灰度差来表示.相对于一维直方图来讲,二维直方图能够描述相邻像素的相关性质,更有利于分析图像的宏观统计特性.

我们定义二维直方图是一幅图像中相邻像素的2个灰度值对在该图像二维灰度区域内所有灰度值对中所占的频数集合.对于 $m \times n$ 数字图像 $\{X(i, j) | i \in [1, m], j \in [1, n]\}$,统计其频数 $\{P(x_1, x_2) / (x_1, x_2) \in \Omega\}$,它表示在该图像二维灰度区域 Ω 内满足某一像素灰度为 $x_1 = x(i, j)$,而其相邻像素灰度为 $x_2 = x(i+1, j)$ 的像素对个数,称频数集合 $\{P(x_1, x_2) / (x_1, x_2) \in \Omega\}$ 为该图像灰度区域 Ω 上的二维直方图.

选取二维样本分别为某像点灰度 x_1 和其右邻像素点 x_2 .那么由于图像相关性的原因,像质较好的二维直方图在 x_1 和 x_2 相邻的区域内具有较高的统计频数,沿对角线 $x_1 = x_2$ 区域与周边区域比较,前一区域内的频数具有较高的幅度、分布密度和明显的峰值.像质较差的二维直方图,则分布分散,沿对角线 $x_1 = x_2$ 区域没有明显的峰值,即相关性差.

如图1中图(a)与(g)分别为微光图像及其二

维直方图,可以发现二维直方图中沿对角线分布没有明显的峰值,属于像质较差的二维直方图分布.

1.2 直方图均衡方法

图像的灰度统计一维直方图可用式(1)表示:

$$P(x_k) = n_k/n, \quad k = 0, 1, \dots, L-1 \quad (1)$$

这里 $P(x_k)$ 代表原始图第 k 个灰度级的出现概率.以 n_k 为自变量,以 $P(x_k)$ 为函数得到的曲线就是图像的直方图.

直方图均衡化的基本思想是把原始图像的直方图变换为均匀分布的形式,这样就增加了像素灰度值的动态范围从而达到增强图像整体对比度的效果.累积分布函数(CDF)能将直方图分布转换为均匀分布,CDF定义如式(2):

$$C(x_k) = \sum_{i=0}^k P(x_i), \quad k = 0, 1, \dots, L-1 \quad (2)$$

显然 $C(x_{L-1}) = 1$.这样直方图均衡可用式(3)表示:
 $f(x_k) = x_0 + (x_{L-1} - x_0)C(x_k), \quad k = 0, 1, \dots, L-1$ (3)

假设 $Y = \{Y(i, j)\}$ 表示对图像 X 进行均衡处理后的图像,那么:

$$Y = f(x) = \{f(x(i, j)) | \forall x(i, j) \in X\}. \quad (4)$$

直方图均衡化的优点是能自动地增强整个图像的对比度,但它的具体增强效果不易控制,处理的结果总是得到全局均衡化的直方图.而且,直方图均衡化在增强反差的同时也增加了图像的可视粒度^[2].

这种方法实质上是减少灰度等级以换取对比度的加大.当被合并掉的灰度级构成的是重要细节,则均衡后细节损失较大.基于微光图像的特点,这种损失是不可忽视的,为此我们采用局部直方图均衡法来处理,提出了如下所述的基于二维直方图分析的二元子图微光图像增强处理的算法.

2 二元子图直方图均衡

2.1 二元子图直方图均衡的算法

假如图像 X 被分割成二元子图 X_L 和 X_U , $X = X_L \cup X_U$,假设子图 X_L 由灰度级 $\{x_0, x_1, \dots, x_{e-1}\}$ 组成,子图 X_U 由灰度级 $\{x_e, x_{e+1}, \dots, x_{L-1}\}$ 组成,那么原始图像的灰度级分布概率被分割成 $\{P_0, P_1, \dots, P_{e-1}\}$ 和 $\{P_e, P_{e+1}, \dots, P_{L-1}\}$.假设 $P = \sum_{i=0}^{e-1} P_i$,那么子图 X_L 和 X_U 的灰度分布概率分别为 $\{P_i/P, i = 0, 1, \dots, e-1\}$ 和 $\{P_i/1-P, i = e, e+1, \dots, L-1\}$.因此相应的累积分布函数CDF分别为

$$C_L(x_k) = \frac{1}{P} \sum_{i=0}^k P_i, \quad k = 0, 1, \dots, e-1 \quad (5)$$

$$C_U(x_k) = \frac{1}{1-P} \sum_{i=e}^{L-1} P_i, \quad k = e, e+1, \dots, L-1 \quad (6)$$

据累积分布函数, 2 个子图的直方图均衡转换函数分别如下:

$$f_L(x_k) = x_0 + (x_{e-1} - x_0)C(x_k), \quad k = 0, 1, \dots, e-1 \quad (7)$$

$$f_U(x_k) = x_e + (x_{L-1} - x_e)C(x_k), \quad k = e, e+1, \dots, L-1 \quad (8)$$

假如用 Y 来表示处理后的图像, 那么

$$Y = \{Y(i, j) \mid = f_L(X_L) \cup f_U(X_U)\}. \quad (9)$$

其中, $f_L(X_L) = \{f_L(x(i, j)) \mid \forall x(i, j) \in X_L\}$,
 $f_U(X_U) = \{f_U(x(i, j)) \mid \forall x(i, j) \in X_U\}$.

2.2 基于二维直方图的二元子图分割方法

在信息论中, 定义信源的熵为信源所定义的随机变量的数学期望:

$$H(x) = - \sum_i P_i \log P_i, \quad (10)$$

其中 $\sum_i P_i = 1$, 且 $P_i \geq 0$. 对于一幅给定的数字图像来说, 灰度的分布是固定的. 因此作为信源图像的熵可以作为人眼可获得图像信息的量度^[6].

对于一幅图像, 由图像的二维直方图所确定的离散概率空间 $[(x_1, x_2), P_i(x_1, x_2)]$ 表示的信源所定义的随机变量的数学期望可表示为

$$H(X) = - \sum_i P_i(x_1, x_2) \log P_i(x_1, x_2). \quad (11)$$

其中 $(x_1, x_2) \in \Omega, \sum_i P_i(x_1, x_2) = 1$.

根据 2.1 节所给的算法, 现在我们来讨论基于二元子图的二维直方图的分割方法. 因为二维直方图可以描述图像的灰度分布、平均亮度、相邻像素间相关性等等, 因此二元子图由二维直方图分布所确定的熵可以作为对原始图像进行子图分割的原则.

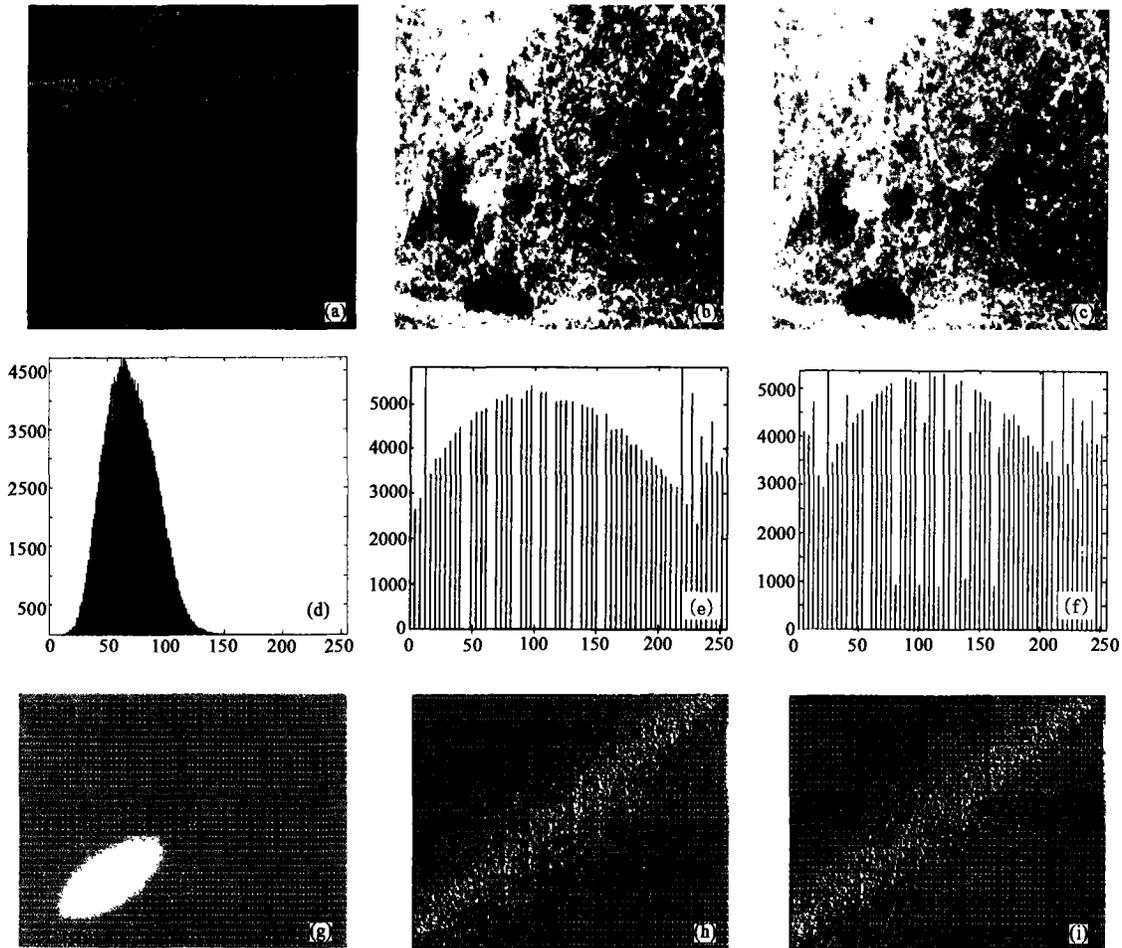


图 1 图像及其直方图, (a) 原始微光图像, (b) 直方图均衡处理图像, (c) 二元子图均衡处理图像, (d) 图 (a) 的一维直方图, (e) 图 (b) 的一维直方图, (f) 图 (c) 的一维直方图, (g) 图 (a) 的二维直方图, (h) 图 (b) 的二维直方图, (i) 图 (c) 的二维直方图.

Fig. 1 images and histograms, (a) original low light level image, (b) histogram equalizing image, (c) dualistic sub-image processing image, (d) histogram of image (a), (e) histogram of image (b), (f) histogram of image (c), (g) two dimensional histogram of image (a), (h) two dimensional histogram of image (b), (i) two dimensional histogram of image (c)

假如原始图像的二维直方图被分成两部分子图, $\{P_0, P_1, \dots, P_{e-1}\}$ 和 $\{P_e, P_{e+1}, \dots, P_{L-1}\}$, 那么仙农熵理论所描述的子直方图的熵为

$$h = P \log P - (1 - P) \log(1 - P) \leq \log 2. \quad (12)$$

当 $P = 1/2$ 时等号成立, 也就是说当 2 个子图像面积相等时分割熵将达到最大值. 那么基于二维直方图分析, 该以什么原则来划分出等面积的 2 个子图像呢? 由二维直方图的定义可知, 它描述的是相邻像素的相关性, 如果相邻像素灰度值相差较大, 那么通常代表边缘细节, 如果灰度值相差较小, 则通常代表整体轮廓. 基于此, 我们可以求得一阈值 $T = |x_2 - x_1|$, 以 $|x_2 - x_1| > T$ 和 $|x_2 - x_1| < T$ 作为分割后的两部分子图, 且这两分子图面积相等. 当然, 也可以改变阈值 T 的大小来确定细节与轮廓的分界, 而把信息熵最大的原则作为其次.

2.3 实验结果

图 1 所示为一组实验的原始图像、用传统的直方图均衡方法以及本文提出的基于二维直方图分析的二元子图处理方法处理后的图像. 由于原始微光图像噪声较强, 在实验处理中发现直方图均衡后的噪声比处理前明显, 这是因为均衡时并不区分有用信号和噪声, 当原始图像中噪声较多时, 噪声将被增强, 因此我们先对原始微光图像进行了中值滤波去噪处理, 然后再进行均衡增强处理. 图 1 中图 (b) 和 (c) 分别为传统直方图均衡方法和二元子图均衡方法处理后的图像. 可以看出, 图 (c) 的视觉效果要优于图 (b), 尤其图 (b) 右下部分有一些较暗的区域细节仍不太清楚, 而在图 (c) 中此部分细节得到了增强.

3 基于信息容量概念的图像质量评价

3.1 信息容量概念

我们进一步定义: 按照频数的最大值 $\max\{P$

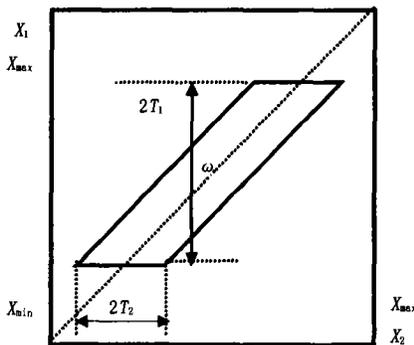


图 2 二维直方图的定义域和累积约束区域
Fig.2 field of definitions and cumulation limit of 2D histogram

$(x_1, x_2)\}$ 进行归一化后得到的集合 $\{Norm(x_1, x_2)\}$, 称为二维峰值归一化直方图, 其中按照频数峰值的对数进行归一化得到的集合 $\{Norm_{LOG}(x_1, x_2)\}$, 称为二维对数峰值归一化直方图. 对数变换体现了分形维数的复杂性量度思想, 这里用直方图的峰值作为“量度尺”去度量直方图的复杂性, 能够反映直方图的细节变化. 经过对数变换, 可以减弱峰值变化对直方图其它灰度的过激影响. 由于多峰直方图是描述图像相关性的, 特别是二维直方图可以描述图像相邻像素灰度的相关性. 所以按照分形维数的观点, 这种对数峰值归一化直方图就描述了图像的各种灰度层次的相对复杂性或丰富程度.

对数峰值归一化直方图在约束区域 $\omega \subseteq \Omega$ 上的累积对数变换被称为信息容量^[7]. 在量化灰度情况下, 信息容量为

$$C_{info} = \log_2 [1 + \sum_{\omega} Norm_{LOG}(x_1, x_2)]. \quad (13)$$

累积约束区域 ω 是直方图定义域的测度, 该区域应在直方图相关性较大的定义域内选取足够大的面积. 从而使得信息容量具有宏观统计意义和真正的信息意义, 以便反映出视觉响应具有全局适应性和对局部灰度跃变的敏感性等特点. 因为在视觉响应的第一步, 首先是对低频信息进行响应. 所以, 在信息容量公式中, 首先对峰值归一化直方图进行累积, 来反映视觉响应的低通性质. 然后, 关于直方图累积的对数变换是与人类视觉的对数响应相适应. 视觉主观亮度是客观光强的对数函数, 在宏观频数的统计上可以认为视觉具有对数变换适应性. 这与信息熵同理, 即表征信息的概念具有对数的形式. 在上述的定义和设计原则限制下, 信息容量就表征了高相关的图像灰度层次的丰富程度. 直方图累积按底 2 对数变换时, 定义 C_{info} 的单位为比特.

3.2 信息容量约束区域参数的确定

累积约束区域 ω 的合理确定使得信息容量具有宏观统计意义和真正的信息意义. 设图像的灰度区间为 $x \in [x_{min}, x_{max}]$, 有 $x_1, x_2 \in [x_{min}, x_{max}]$. 第一, 考虑到视觉适应性, 高灰度和低灰度均引起不良的视觉效果 (刺眼和黑暗); 第二, 沿直方图定义域的对角线 $x_1 = x_2$ 附近区域是有意义的高相关区, 图像具有较高的局部空间相关性. 所以, 选择

$$\omega = \left\{ \begin{aligned} & \left| x_1 - \frac{1}{2}(x_{min} + x_{max}) \right| \leq T_1 \\ & |x_1 - x_2| \leq T_2 \end{aligned} \right. \quad (14)$$

其中, T_1 和 T_2 是非负约束阈值, 从而所构成的区域

ω 是一个围绕对角线 $x_1 = x_2$ 的平行四边形, 其面积为 $(2\sqrt{2}T_1) \times (2\sqrt{2}T_2)$ (灰度连续) 或 $(2T_1 + 1) \times (2T_2 + 1)$ (灰度量化), 如图 2 所示。

3.3 实验图像参数分析

表 1 中以信息容量、图像平均亮度、信息熵作为评价标准, 分别列出了原始图像及 2 类处理后图像的参数比较。其中 C_{info} 为没有约束区域时图像的信息容量, $C_{\text{info}}(\omega)$ 为有约束区域时图像的信息容量。可以看出, 图像的平均亮度在进行均衡前后有很大的增强, 这主要是因为直方图均衡算法将原图像的灰度进行了拉伸; 而传统均衡和二元均衡后图像的亮度并没有太大的差别。以信息熵 (Entropy) 作为评价参数时, 传统均衡与二元均衡在数据上只有万分位上很小的变化。在用信息容量 (C_{info}) 作为评价参数时, 从表格中的数据可以看出, 在没有约束区域时, 二元均衡的数据相对于传统均衡增大的量不是很明显, 而在有约束区域时, 这两种均衡算法的信息容量数据有了较明显的差别, 可以表明二元均衡较传统均衡算法在图像视觉效果上有一定的提高。这里的约束区域范围为 $T_1 = 127, T_2 = 30$ 。

表 1 图像评价参数比较
Table 1 Evaluating parameter of image

	Mean	Entropy	C_{info}	$C_{\text{info}}(\omega)$
原始图像	69.7466	12.4063	11.495	11.457
去噪图像	69.2881	11.1273	10.802	10.801
传统均衡	127.4491	14.5260	12.669	12.260
二元均衡	127.5175	14.5268	12.685	12.359

4 结束语

本文针对微光图像的特点, 提出一种基于二维直方图分析的二元子图微光图像增强处理算法。传统的

直方图均衡算法主要是整图对比度的增加, 但在一些较暗的区域有些细节仍不太清楚。对于某些灰度频数较小的区域, 对比度将被削弱, 甚至消除。而基于二维直方图分析的二元子图增强算法克服了此缺点, 保护了图像的局部细节, 得到了具有较好视觉质量的处理后微光图像。这对于微光夜视图像的增强处理以及进一步的目标识别分割具有重要意义。

REFERENCES

- [1] WANG Li-Ping. Theory and technology of low light level night vision with instantaneous laser assistant vision and image fusion. Ph. D dissertation, Nanjing University of Science and Technology (王利平. 微光夜视瞬态激光助视及其图像融合的理论和技术研究. 博士论文, 南京理工大学), 2000
- [2] ZHANG Yu-Jin. *Image Engineering*. Beijing: Tsinghua University Press (章毓晋. 图像工程. 北京: 清华大学出版社), 1999
- [3] SHEN Jia-Li, ZHANG Yu, WANG Xiu-Tan. A new algorithm for low light level image processing. *Journal of Image and Graphics* (沈嘉励, 张宇, 王秀坛. 一种夜视图象处理的新算法. 中国图象图形学报 (A 版)), 2000, 5(A)(6): 479—483
- [4] Kim Yeong Taeg. Contrast enhancement using brightness preserving bihistogram equalization. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 1997, 43(1): 1—8
- [5] Kim Tae Keun, Paik Joon Ki, Kang Bong Soon. Contrast enhancement system using spatially adaptive histogram equalization with temporal filtering. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 1998, 44(1): 82—87
- [6] WANG Yu. On the analysis and processing techniques for low light level image. Ph. D dissertation, Nanjing University of Science and Technology (王钰. 微光图像分析和处理的方法与技术研究. 博士论文, 南京理工大学), 2000
- [7] WANG Li-Ping, SUN Shao-Yuan, CHEN Qian, et al. Low light level image characteristics and image fusion technology. *J. Infrared Millim. Waves* (王利平, 孙韶媛, 陈钱, 等. 微光图像特征及图像融合技术研究. 红外与毫米波学报), 2000, 19(4): 289—292