

微光图像特征分析及图像融合技术研究*

王利平 孙韶远 陈 钱 张保民

(南京理工大学光电学院光电技术系, 江苏, 南京, 210094)

TN 223

摘要 从微光图像的成像过程、灰度分布和像素空间与时间相关性等几个方面对微光图像特征作较系统的分析, 用信息容量这一示性参数来表征高相关图像灰度层次的丰富程度, 这与视觉效果达到了很好的一致。通过分析这些特性, 对微光多光谱图像融合技术研究具有重要的指导意义。

关键词 微光电视, 直方图, 图像融合。

微光图像

LOW LIGHT LEVEL IMAGE CHARACTERISTICS AND IMAGE FUSION TECHNOLOGY *

WANG Li-Ping SHUN Shao-Yuan CHEN Qian ZHANG Bao-Min

(Elec. Eng. & Optoelec. College, Nanjing University of Sci. & Tech. Nanjing, Jiangsu 210094, China)

Abstract The characteristics of low light level (LLL) image were analyzed in aspects of imaging process gray level distribution and correlativity of picture element in space and time of LLL image. Richness of gray level of highly correlative image was expressed using information capacity, which agrees greatly with the effect of vision evaluation. It is of momentous guidable significance for study on LLL multi-spectrum image fusion technology by analyzing these characteristics.

Key words LLL TV, histogram, image fusion.

引言

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而形成的, 因此它不仅与场景的照明条件和景物的反射率分布有关, 而且还与成像器件的信号转换, 像增强器的增益和系统噪声有关, 对像增强 CCD, 它还与 CCD 空间采样频率及量化有关。由此可见, 描述微光电视图像的特征要从多方面论述。一般分析与阐述微光图像特征主要有: 图像信噪比, 灰度分布, 像素空间与时间相关性等。

关于微光 CCD 电视系统输出信噪比的理论计算, 近几年有人做了专门的估计分析和详细论述^[1~6]; 关于微光图像灰度分布统计, 一般用一维直方图来表征, 这方面我们已经做了大量的实验^[7]; 关于图像像素空间相关性, 早在 1952 年贝尔实验室的克雷茨默^[8]对相邻像素间的差值进行了测定, 给出了分布密度曲线, 说明相邻像素间有较大的相关性。此外还提出了其它许多基于视觉、误差、信噪比等的方法^[9~12], 具有各自的

特点, 但与视觉效果不一致是许多方法的不足。我们在上述理论与实践的基础上, 并根据人的视觉特性^[13], 提出了用信息容量这一示性参数来表征高相关图像灰度层次的丰富程度, 这与视觉评价效果达到很好的一致, 是对上述理论与实验的补充与发展。

夜视图像融合只是图像融合的一个分支, 从多传感器数据融合的观点来看, 图像融合也只是其中的一个层次^[14]。而微光多谱图像融合又是夜视图像融合的一部分, 因此, 通过分析微光图像特征, 对微光多光谱图像融合技术研究具有重要的指导意义。

1 微光电视系统的成像过程

微光电视系统的成像过程实质上就是微光摄像器件对景物的辐射能(或反射能)通过光学系统之后, 在其敏感的光谱范围内积分的过程, 可用下式近似表示:

$$L = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S(\lambda)\rho(\lambda)\tau(\lambda)\tau'(\lambda)R(\lambda)d\lambda, \quad (1)$$

* 兵器科技预研基金(编号 YJ97001)资助项目
稿件收到日期 1999-04-28, 修改稿收到日期 1999-11-10

* The project supported by the Weapons Science and Technology Preliminary Research Fund (No. YJ97001)
Received 1999-04-28, revised 1999-11-10

式(1)中 L 表示景物成像信号大小(即亮度值); $S(\lambda)$ 表示夜间天空的辐射特征; $\rho(\lambda)$ 表示景物的光谱反射系数; $\tau(\lambda)$ 表示光学系统的光谱透过率; $\tau'(\lambda)$ 表示大气的光谱透过率; $R(\lambda)$ 表示像增强器光电阴极的光谱响应特性; λ_1 、 λ_2 表示光电阴极敏感范围上限和下限波长. 若定义目标与背景之间的亮度对比为 K , 则有:

$$K = \frac{|L_a - L_b|}{\max\{L_a, L_b\}}, \quad (2)$$

式(2)中 L_a 、 L_b 分别为目标和背景的亮度, 由式(1)可知, 上式可表示为:

$$K = \frac{\left| \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S(\lambda)\rho_a(\lambda)\tau(\lambda)\tau'(\lambda)R(\lambda)d\lambda - \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S(\lambda)\rho_b(\lambda)\tau(\lambda)\tau'(\lambda)R(\lambda)d\lambda \right|}{\max\left\{ \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S(\lambda)\rho_a(\lambda)\tau(\lambda)\tau'(\lambda)R(\lambda)d\lambda, \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S(\lambda)\rho_b(\lambda)\tau(\lambda)\tau'(\lambda)R(\lambda)d\lambda \right\}}, \quad (3)$$

式(3)中, $\rho_a(\lambda)$ 、 $\rho_b(\lambda)$ 分别表示目标和背景的光谱反射系数. 由式(3)可见, 微光电视图像景物的对比度不仅与微光电视系统的性能($\tau(\lambda)$ 、 $R(\lambda)$)有关, 还与夜天光的辐射特性($S(\lambda)$)、大气的透明状况($\tau'(\lambda)$)以及目标和背景的光谱反射特性($\rho_a(\lambda)$ 、 $\rho_b(\lambda)$)有关.

2 微光电视图像直方图统计分析

实际上, 图像的随机分布本身就是图像的重要特征, 直方图就是图像的一种宏观统计, 直方图能给出该图像的概貌性描述, 例如图像的灰度范围, 每个灰度级的频数和灰度的分布, 整幅图像的平均明暗及对比度等, 由此可作为进一步处理的重要依据. 一维直方图虽然只对孤立点的统计, 不能统计图像像素间的相关关系, 但图像直方图的形状仍可给出图像特性的许多信息. 为此我们仍做了许多工作.

图像直方图的形状可给出图像特性的许多信息. 例如, 分布狭窄的直方图反映图像的对比度很低, 双峰型直方图反映图中存在两个不同灰度区等等. 我们用自己研制的微光 CCD 摄像机摄取了一组不同照度下 ($10^{-4}lx \sim 10^{-1}lx$) 的图像, 并算出它们的直方图^[7]. 通过大量不同景物的直方图统计分析表明, 微光 CCD 摄取的图像灰度特征有: 微光 CCD 摄像机输出图像的对比度很低, 直方图上表示为灰度范围较集中; 微光 CCD 摄像机输出的图像具有一定的亮度, 直方图上表现为直方图中心保持在中间某一特定的灰度值附近; 照度降低, 输出图像对比度和亮度同时下降, 直方图显示灰度范围变小, 中心向低灰度值方向偏移.

3 微光电视图像空间和时间相关性分析

上述分析的一维直方图是对孤立点的统计, 不能

统计图像像素间的相关关系, 因此必须引入高维直方图, 通过统计像素间的相关性, 来描述视觉对外界刺激的带通选择特性.

3.1 信息容量

定义二维直方图 $\{Num(G_1, G_2)\}$ 为某像素点灰度是 G_1 , 而其邻点灰度是 G_2 像素频数, 能描述相邻像素的相关性质, 同时有利于分析图像的宏观统计性质.

对于灰度数字图像, 灰度分布的随机性和复杂性是其主要特征, 但在这种复杂性的背后, 存在着某种规律性. 分形理论揭示了非线性过程中确定性与随机性的统一, 它认为自然界中普遍存在着自相似性和标度不变性, 即一种结构或过程从不同的空间尺度或时间尺度来看都有相似的特征, 而且其复杂程度不会发生变化, 这是分形的重要特性. 对图像进行多分辨分解和观察图像的直方图可知, 灰度图像的空间分布和直方图统计分布具有统计自相似性. 由于分形维数是描述分形几何体复杂性的重要特征, 因此可以借鉴它来评定图像灰度层次的丰富性程度. 对于一个有确定维数的几何体, 若用与它维数相同的“量度尺”去度量, 则可以得到确定的分形维数, 这个分形维数就描述了这个几何体的复杂程度, 为此定义: 按照频数的最大值 $\max\{Norm(G_1, G_2)\}$ 进行规一化得到的集合为 $\{Norm(G_1, G_2)\}$, 称为二维峰值规一化直方图, 其中

$$Norm(G_1, G_2) = \frac{Num(G_1, G_2)}{\max\{Num(G_1, G_2)\}}, \quad (4)$$

按频数峰值对数进行规一化得到集合为 $\{Norm_{\log}(G_1, G_2)\}$, 称为二维对数峰值规一化直方图, 其中

$$Norm_{\log}(G_1, G_2) = \frac{\log[Num(G_1, G_2)]}{\log[\max\{Num(G_1, G_2)\}]}, \quad (5)$$

从式(4)和式(5)可见, 关于频数和峰值规一化和对数峰值规一化直方图同时介于区间 $[0, 1]$ 内. 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. 由于多维直方图是描述图像的相关性的, 特别是二维直方图可以描述图像相邻像素灰度的相关性. 那么, 按照分形维数的观点, 这种对数峰值规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.

峰值规一化把不同分布(不同图像)的频数峰值规一到同一基准上, 实质上是把直方图限制在一定的区间内, 这才能够比较和描述不同分布图像灰度层次分布的均匀性. 一般地, 峰值规一化方法可以跟踪图像直方图的变化, 有灰度层次的相对抑制关系. 基于二维对

数峰值归一化直方图,引入信息容量的概念:

对数峰值归一化直方图的约束区域 $\omega \subseteq \Omega$ 上的累积对数变换被称为信息容量,即关于图像灰度层次丰富性的度量.在量化灰度情况下,信息容量为:

$$C_{\text{info}} = \log_2 [1 + \sum_{\omega} \text{Norm}_{LDC}(G_1, G_2)]. \quad (6)$$

累积约束区域 ω 是直方图定义域的测度,应选为足够大和直方图相关性较大的定义域.从而使信息容量具有宏观统计意义和真正的信息意义,以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视觉的对数响应相适应^[13~15].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认为视觉具有对数变换适应性,这与信息熵有同样的道理^[16],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 bit.

3.2 信息容量有关参数的确定

选取二维样本分别为某像素点灰度 G_1 和其右邻像素点灰度 G_2 .那么,由于图像相关性的原因,像质较好的二维直方图,在 G_1 和 G_2 相邻的区域具有较高的统计频数 $\{ \text{Norm}(G_1, G_2) \}$,沿对角线 $G_1 = G_2$ 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 $G_1 = G_2$ 区域没有明显峰值,即相关性差.

设图像的灰度区间为 $G \in [G_{\text{min}}, G_{\text{max}}]$,有 $G_1, G_2 \in [G_{\text{min}}, G_{\text{max}}]$. (1) 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); (2) 沿直方图定义域的对角线 $G_1 = G_2$ 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

$$\omega = \begin{cases} |G_1 - \frac{1}{2}(G_{\text{max}} + G_{\text{min}})| \leq T_1, \\ |G_1 - G_2| \leq T_2; \end{cases} \quad (7)$$

式(7)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 $G_1 = G_2$ 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 $(2T_1+1) \times (2T_2+1)$ (灰度量化的),如图 1 所示.

如果进一步考虑视觉的高斯平滑作用,可以选取二阶可导的高斯函数进行加权累积.在上述区域 ω 内,考虑量化灰度情形,累积对数峰值归一化二维直方图 $\{ \text{Norm}_{LDC}(G_1, G_2) \}$ 和计算二维信息容量为:

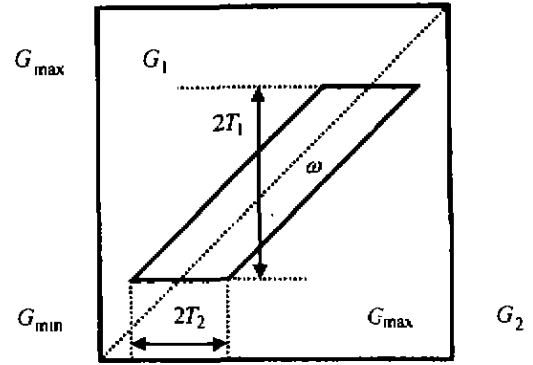


图 1 二维直方图的定义域和累积约束区域
Fig. 1 definition and accumulation domain of 2D histogram

$$C_{\text{info}} = \log_2 [1 + \sum_{\omega} \text{Norm}_{LDC}(G_1, G_2)], \quad (8)$$

在极端的情况下,当约束区域 ω 内没有直方图累积,有: $\sum_{\omega} \text{Norm}_{LDC}(G_1, G_2) = 0$, 信息容量 C_{info} 达到最小值 0; 当约束区域内所有像素对频数均达到最大值,有: $\sum_{\omega} \text{Norm}_{LDC}(G_1, G_2) = (2T_1+1) \times (2T_2+1)$, 信息容量 C_{info} 达到最大值,即:

$$C_{\text{info}} = \log_2 [1 + (2T_1+1) \times (2T_2+1)] \approx \log_2(2T_1+1) + \log_2(2T_2+1), \quad (9)$$

一维对数峰值归一化直方图 $\{ \text{Norm}_{LDC}(G_1, G_2) \}$ 和信息容量为:

$$C_{\text{info}} = \log_2 [1 + \sum_{\omega} \text{Norm}_{LDC}(G_1)], \quad (10)$$

与二维情况相比,它不能反映图像的局部相关性.选择 G_1 为像素灰度, ω 为: $|G_1 - \frac{1}{2}(G_{\text{min}} + G_{\text{max}})| \leq T_1$. 极端情况下,一维信息容量 C_{info} 最小值为 0, 最大值为:

$$C_{\text{info}} = \log_2 [1 + (2T_1+1)]. \quad (11)$$

用以上方法计算同一景物在不同照度下的二维灰度直方图与信息容量,可知,具有较高像质的微光图像,其直方图有明显峰值,且信息容量大,低像质的微光图像,其二维直方图分布散乱,无明显的峰值和聚集密度,这说明二维直方图描述了图像的相关性,直方图相关性强的区域对应于视觉低通响应所敏感的缓变信息.

3.3 微光电视图像时间相关性分析

对电视图像信号,除相邻像素间的差值外,还存在帧间差值,变化剧烈的图像与变化缓慢的图像其差值分布是不同的,分布密度大致可用指数函数表示,即

$$f(t) = e^{-\beta t}, \quad (12)$$

式(12)中 t 为帧周期, β 是由图像变化程度所决定的系

数.当图像变化较剧烈时, β 值较小,反之, β 值较大.

电视图像信号的自相关函数可表示为:

$$R(t_1, t_2, \tau) = \exp[-\alpha_1 |t_1|] \cdot \exp[-\alpha_2 |t_2|] \cdot \exp[-\beta |\tau|], \quad (13)$$

式(13)中, $\exp[-\alpha_1 |t_1|]$ 表示行内相关, $\exp[-\alpha_2 |t_2|]$ 表示帧内相关, $\exp[-\beta |\tau|]$ 表示帧间相关.其中 β 是反映时间轴方向上的相关性.研究表明, β 是一个很小的量,一般 $\exp[-\beta |\tau|]=0.99$.也就是说图像信号帧间的相关性接近于1.对于图像噪声来说,其相邻像素之间的灰度差值与帧间对应像素的灰度差值均很大,说明图像噪声的空间和时间相关性很小.

综上所述,微光电视图像最主要的特征是信噪比低,在照度低于 $10^{-3}lx$,噪声几乎把图像淹没,图像的对比度、亮度以及分辨率明显下降.微光图像信号的空间和时间相关性很大,而图像噪声的空间和时间相关性很小.这些特征对微光多光谱图像融合技术研究具有重要的指导意义.

4 微光多谱图像融合技术

作为新一代微光 CCD 成像技术的一个重要部分,微光多谱图像融合技术必须解决以下几个关键技术:微光多谱图像的获取、配准及融合算法(硬件化即智能化).微光多谱图像融合的算法是图像融合的关键.从对微光电视图像特征分析及目标(图像)探测理论^[17]的分析中可见,目标的被发现(探测)概率与目标和背景之间的亮度对比(信噪比)成正比,并与图像的信息容量成正比.因此,提高目标和背景之间的亮度对比,即提高图像的信息容量就成为微光多谱图像融合算法的出发点.另外,由于融合后的图像最终是给人看的,因此在设计融合算法时必须考虑到人眼的特性.人眼对于黑白图像级别的观察是不敏感的(只有几十级),但是人眼对于彩色差异的分辨能力却要高得多(约上千级).因此利用人眼的这种特性提高对目标的探测和识别能力也成为微光多谱图像融合的出发点.

本文从微光图像的成像过程、灰度分布和像素空间与时间相关性等几个方面对微光图像特征作较系统的分析.全局累积(统计)、局部相关(敏感)和对数变换反映了人类的视觉响应机理.视觉对灰度图像质量的评价体现为灰度层次丰富性和波动性,其中灰度丰富性可以用图像高相关区域上的灰度复杂度来衡量,而图像相关性和复杂度可分别从多维直方图和分形维数引出.理论分析和实验表明,用二维直方图信息容量这一示性参数来表征高相关图像灰度层次的丰富程度,这与视觉评价

效果达到了很好的一致,通过分析这些特征,对微光多光谱图像融合技术研究具有重要的指导意义.

REFERENCES

- [1] Lemonier M. Low light level TV imaging by intensified CCDs, *SPIE*, 1988, **980**: 27-29
- [2] Fouassier M. Experimental and theoretical evaluations of 2nd and 3rd generation intensifier viewing ranges, *IEEE Conference on Photoelectronic Imaging, London*, 1985: 9-11
- [3] Richard J C. Low light level TV with image intensifier tubes, *Electron Physics*, 1988, **74**: 21-24
- [4] WEI Ze-Bin. Detectability of image intensifier fiberoptics coupled CCD at low light level, *Proceedings of International Conference on Photoelectromics and System, Beijing*, 1990: 21-23
- [5] Sartor M A. Characterization and modeling of microchannel plate intensified CCD SNR variation with image size, *SPIE*, 1992, **1655**: 74-76
- [6] WEI Ze-Bin, ZHOU Yi-Song. Study on sensitive threshold of low light level CCD camera, *Acta Optica Sinica* (魏泽斌, 邹异松. 微光 CCD 摄像器件灵敏度研究. 光学学报), 1990, **12**(8): 1123-1126
- [7] CHEN Qian. Study on real-time digital processing for low light level image. Ph.D dissertation, Nanjing University of Science and Technology (陈钱. 微光图像微型化实量数字处理技术研究, 南京理工大学博士学位论文), 1996
- [8] Shamos M L. Robust picture processing operation and their implementation as circuits, in *Proc. Image Understanding Workshop.*, Pittsburgh, PA, 1978: 129-132
- [9] Huck F O. Information density and efficiency of two-dimensional sampled imagery, *SPIE*, 1981, **310**: 36-42
- [10] Blumenthal A H. An improved electro-optical image quality summary measure, *SPIE*, 1981, **310**: 43-52
- [11] Hall C F. Subjective evaluation of a perceptual quality metric, *SPIE*, 1981, **310**: 200-204
- [12] John S. Information theoretical assessment of digital imaging system, *SPIE*, 1990, **1309**: 53-66
- [13] ZHAO Rong-Chun. *Introduction to Digital Image Processing*, Xi'an: Northwest Industry University Press (赵荣椿. 数字图像处理导论, 西安: 西北工业大学出版社), 1995, 30-50
- [14] WANG Yi-Feng. Advances in the study of night vision image fusion, *Infrared and Laser Engineering* (王忆锋. 夜视图像融合研究进展, 红外与激光工程), 1998, **2**(27): 29-32
- [15] LI Shu-Liang. *Digital Image Processing*, Beijing: Science Press (李叔梁. 数字图像处理, 北京: 科学出版社), 1981: 80-95
- [16] MENG Qing-Sheng. *Information Theory*, Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press (孟庆生. 信息论, 西安: 西安交通大学出版社), 1986, 70-90
- [17] ZHANG Bao-Min. *Introduction to Imaging System Analysis*, Beijing: Defense Industry Press (张保民. 成像系统分析导论, 北京: 国防工业出版社), 1992