

用于数字监控系统的图像去噪算法的研究与实现

彭波 崔永普 吕小晴

(中国农业大学 信息与电气工程学院,北京 100083)

摘要 针对数字监控系统因监控环境亮度不足导致监控图像存在大量噪声的情况,分析了图像的主要噪声源及其特点和性质,确定影响图像质量的主导噪声为 CCD 摄像管产生的读出噪声。比较了各种常见的图像去噪算法,在综合考虑图像去噪平滑效果、图像清晰程度和时间复杂度的基础上,提出将数学形态学法与中值滤波法相结合的用于数字监控系统的图像去噪增强算法。仿真试验及对多幅在不同亮度环境下拍摄图像去噪前后效果的对比结果表明,使用数字形态学滤波与 3×3 中值滤波结合的算法去噪,可将压缩后的录像码流数据量降低 $15\% \sim 20\%$,且去噪后的图像比较清晰平滑。由于算法的时间复杂度较低(为 $O(N)$),速度较快,可满足实时性处理的要求,所以可将其直接移植到数字监控录像系统中。试验结果验证了本算法的可行性、实时性和鲁棒性。

关键词 噪声;数学形态学法;中值滤波;去噪

中图分类号 TP 301.6; TP 311

文章编号 1007-4333(2004)05-0062-05

文献标识码 A

Research and implementation of denoising algorithm for digital monitoring system

Peng Bo, Cui Yongpu, Lü Xiaoping

(College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract The main noise sources and characteristics of monitor images for many noises of digital monitoring system were analyzed in the monitoring situation of insufficient illumination. The main noise affecting the qualities of monitor images was read-out noise produced by the charge coupled devices. The common denoising algorithms were compared, and the enhanced denoising method was designed combining mathematics morphology with median filter after balancing image smoothness, clearness and time complexity for digital monitoring system. Through making a lot of emulational experiments and comparing many images of before and after denoising in different illumination environments, it was expressed that the compressed video stream decreased by $15\% - 20\%$, and the images become clearer and smoother using the enhanced denoising method combining with mathematics morphology with 3×3 median filter. This algorithm had lower time complexity ($O(N)$). So it could be used in digital monitoring system without influencing the real-time property. It was also confirmed that the algorithm was feasible, real-time and robust.

Key words noise; mathematics morphology; median filter; denoise

目前,大多数网络数字监控录像系统在光照较强(如白天)的情况下都可以较好地满足监控系统的要求,然而在光照较弱(如夜间)的情况下,系统拍摄的监控图像会含有随机分布的白点噪声,而且光照越弱,图像噪声越大。数字监控录像系统广泛采用 MPEG-4^[1,2]压缩标准对监控录像码流进行编码,而

使用此标准对含有大量噪声的监控图像进行压缩合成时,得到的监控录像码流的数据量会比正常情况下大大增加。统计结果表明,含有噪声的监控录像码流的数据量比正常情况下平均增大 $15\% \sim 20\%$,如果对这样的码流进行存储,会占用更多的存储空间。由此可见,普通的数字监控录像系统并不完善,

收稿日期:2004-04-23

作者简介:彭波,副教授,博士研究生,主要从事多媒体及网络技术应用的研究,E-mail:pengbo@bnu.edu.cn。

需要专门针对亮度不足的监控图像开发一种算法,对图像进行去除噪声的增强处理,从而使得在光照较弱情况下拍摄的监控录像码流也能很好地满足网络数字监控录像系统的要求。为此,笔者研究并实现了用于数字监控系统的图像去噪增强算法。

1 监控图像噪声源分析

数字监控图像中存在各种不同性质的噪声,在不同客观环境下,这些噪声会轮流占据噪声的主要地位,成为影响监控图像质量的主导因素。

数字监控图像中包含的各种噪声大致可以分为以下几类^[3]。

1) 随机噪声。包括客观环境中的干扰噪声和摄像管摄像产生的读出噪声,其中对图像质量起主要影响的是 CCD 摄像管摄像产生的读出噪声。

CCD 摄像管关于读出噪声的输出信噪比公式为^[3,4]

$$S/N = Q_s / (2 kTC) \quad (1)$$

式中: Q_s 为 1 个光敏单元所存储的电荷量, $Q_s = eN_s$, N_s 为 1 个光敏单元所承载的光电子数目, e 为 1 个光电子所存储的电荷量, C 为输入电容, T 为绝对温度。

由式(1)可知,当客观环境光线充足时, N_s 相应升高,即 Q_s 增大,信噪比较高;而当客观环境光线不充足时, N_s 下降, Q_s 减小,获得图像的信噪比较低,图像中的读出噪声比较严重。

读出噪声是一种光电流噪声,是由光的统计本质和图像传感器中光电转换过程产生的,在弱光照情况下,其噪声模型可用具有泊松密度分布的随机变量来描述。具有光电流噪声的图像,其信号幅度与噪声幅度无关。

2) 量化噪声。主要指摄像机使用放大和处理电路对信号进行采样/量化处理过程中产生的噪声^[5]。

放大处理电路输出信号的信噪比公式^[6]为

$$S/N = 6.02B + 1.76 + 10 \lg(f_s / f_{\max})$$

式中: B 为模/数转换器分辨率, f_s 为采样速率, f_{\max} 为输入信号的最高频率。

3) 脉冲噪声。包括传输过程中产生的脉冲噪声和存储图像带来的噪声。虽然对于不同的电路分布情况,含有脉冲噪声的信号的信噪比会有所不同,但总体来说,这种噪声主要由电路中电荷的活动情况

决定,而与客观环境中的亮度无关^[5,6]。

由以上的噪声分类可知,数字监控图像所包含的噪声中,信噪比会因图像拍摄客观环境亮度的改变而改变的只有加性噪声类中的 CCD 摄像管摄像产生的读出噪声,其信噪比公式也证明了此噪声会随着客观环境亮度的降低而增大。

综上所述,在亮度不充足的客观环境下,CCD 摄像管摄像产生的读出噪声为影响图像质量的主导噪声。

2 监控图像去噪算法的设计与实现

2.1 数学形态学法与中值滤波法

1) 数学形态学法。该方法起源于岩相学对岩石结构的定量描述,近年来在数字图像处理 and 机器视觉领域中得到了广泛应用,形成了一套独特的数字图像分析方法和理论。

通常形态学图像处理表现为一种邻域运算形式,一种特殊定义的邻域称之为“结构元素”(structure element),在每个像素位置上它与二值图像对应的区域进行特定的逻辑运算,逻辑运算的结果为输出图像的相应像素。形态学运算的效果取决于结构元素的大小、内容以及逻辑运算的性质。常见的形态学运算有腐蚀(erosion)和膨胀(dilation)。

给定二值图像 $I(x, y)$ 和作为结构元素的二值模板 $T(i, j)$, 典型的腐蚀和膨胀运算可表示为:

$$\text{腐蚀} \quad E(x, y) = (I \otimes T)(x, y) = \text{AND} \left[I(x + i, y + j) \& T(i, j) \right];$$

$$\text{膨胀} \quad D(x, y) = (I \oplus T)(x, y) = \text{OR} \left[I(x + i, y + j) \& T(i, j) \right].$$

在定义腐蚀和膨胀运算的基础上,可定义数学形态学 2 个常用运算:开运算(opening)和闭运算(closing)。

a. 开运算。先腐蚀后膨胀的过程称为开运算,用于去除图像中的亮点和毛刺,保留所有的灰度和较大的亮度特征。

$$\text{OPEN}(X, B) = X_B = X \circ B = (X \otimes B) \oplus B$$

b. 闭运算。先膨胀后腐蚀的过程称为闭运算,用于去除图像中较小的暗点,保留原来较大的亮度特征。

$$\text{CLOSE}(X, B) = X^B = X \cdot B = (X \oplus B) \otimes B$$

灰度图像开运算和闭运算可以解释为让结构元素沿 $I(x, y)$ 滚动:开运算沿 $I(x, y)$ 的下沿滚动,

而闭运算沿 $I(x, y)$ 的上沿滚动。经过滚动处理后,所有直径比结构元素小的灰度阶越点都被去除,所以从直观上看,灰度图像的开运算和闭运算具有聚类的功能,即能够把图像中某个范围内灰度相近、数量占优势的点聚到一起。

2) 中值滤波法。该方法是一种非线性信号处理方法,1971年由J. W. Jukey首先提出并应用在一维信号处理技术中,后来被二维图像信号处理技术所引用。

中值滤波法即用一个含有奇数点的滑动窗口,将窗口正中的那个点的值用窗口内各点的中值代替。假设有一个一维序列 f_1, f_2, \dots, f_n , 取窗口长度为 m (m 为奇数), 对此序列进行中值滤波,就是从输入序列中相继抽出 m 个数 $f_{i-v}, \dots, f_{i-1}, f_i, f_{i+1}, \dots, f_{i+v}$; 其中 f_i 为窗口中心点值, $v = (m - 1)/2$ 。将这 m 个点值按其数值大小排序,取其序号为正中间的那个数作为滤波输出。中值滤波法用数学公式表示为:

$$y_i = \text{Med}\{f_{i-v}, \dots, f_i, \dots, f_{i+v}\} \\ (i = Z; v = (m - 1)/2)$$

2.2 算法设计

2.2.1 设计标准 在针对夜间数字监控图像进行去噪增强算法的设计时,主要考虑以下3个因素:

1) 图像去噪平滑效果。即去噪后图像的信噪比。去噪后监控图像越平滑,压缩后的监控码流数据量越小。

2) 图像的清晰程度。虽然监控图像去噪效果好可以减小监控码流的数据量,但会影响图像的清晰程度;因此,在考虑图像去噪效果的同时也需要保证一定的图像清晰度。

3) 图像去噪的时间复杂度。由于监控系统需要对图像进行实时处理以合成监控码流,所以监控图像去噪的时间复杂度较低才能保证图像与实际拍摄时间相对应,从而保证监控码流的实时性。

2.2.2 设计思想 根据设计标准,通过大量试验对各种常见的去噪算法进行分析和研究,结果表明:

1) 频域去噪增强算法虽然可以对图像起到一定的去噪作用,但其时间复杂度很高,低通梯形滤波和维纳滤波的时间复杂度为 $O(N \log_2 N)$, 小波滤波为 $O(N^2)$;

2) 空域去噪增强算法中的滑动窗口滤波法和直方图均衡法虽然时间复杂度为 $O(N)$, 但对摄像管的随机加性噪声几乎没有去除作用;

3) 空域去噪增强算法中的中值滤波法和邻域平均滤波法可以对图像起到一定的去噪作用,时间复杂度也较低,但去噪后图像变得模糊;

4) 数学形态学法时间复杂度为 $O(N)$, 可以对图像起到一定的去噪作用,且不会使图像变得模糊不清,基本符合图像去噪增强设计标准。

使用数学形态学法进行去噪增强可以去除一部分噪声,而且由于开运算和闭运算具有聚类的功能,能够把监控图像中某个范围内灰度相近且数量占优势的图像信息聚到一起,从而使去噪时图像信息不易丢失,所以可以获得比较清晰的图像。其缺点在于去除噪声不够彻底,去噪增强后的图像不够平滑。

使用中值滤波法进行去噪增强的优点是可以获得很好的去噪效果,使去噪增强后的监控图像变得很平滑,从而使压缩合成后的监控码流数据量大大减小;但由于光照较弱时监控图像中的噪声与周围图像信息的亮度值差别不大,所以去噪后图像不够清晰,会丢失较多的图像信息。

对于亮度不足的含有噪声的监控图像,将2种算法进行综合,即先使用数学形态学法,再使用中值滤波法对图像去噪,会得到很好的效果。原因如下:

首先使用数学形态学法滤除一部分噪声,利用其聚类功能将图像信息相对集中,然后使用中值滤波法对图像进行处理,可以将剩余的噪声滤除,使图像变得比较平滑。这时由于图像信息相对集中,且图像信息部分只含有较少的噪声,所以在去噪过程中不会丢失过多的图像信息,使处理后的图像相对比较清晰。2种算法的时间复杂度都不高,两者相加的时间复杂度为 $O(N)$ 。

综上所述,将数学形态学法与中值滤波法结合起来对亮度不足的监控图像进行去噪增强处理,理论上可以获得较好的效果。

2.3 算法实现

亮度不足的数字监控图像去噪增强算法的具体实现可以分为以下6个步骤:

1) 读取图像 RGB 表示系统。监控图像在被拍摄下来后,一般以24位DIB(设备无关点)位图的形式存储在内存中,每一个像素使用 R (红)、 G (绿)、 B (蓝)3个分量描述,其中每个分量使用8位即一个字节表示。可将监控图像看作1个一维字节型数组,每相邻的3个数组分量的值分别描述一个像素点的 R, G, B 值,则此数组共有“图像高度 \times 图像宽度 $\times 3$ ”个数组分量。算法先将监控图像的一维数组

分解成3个二维数组,这3个二维数组的每一个分量分别表示每1个像素的 R, G, B 值。

2)将图像的 RGB 数组转换为 YUV 数组。实际的图像处理是对图像每个像素的灰度值进行处理,所以要将图像的 RGB 表示系统转换为 YUV 表示系统,转换公式为:

$$\begin{bmatrix} Y \\ U \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.299 & 0.587 & 0.114 \\ -0.148 & -0.289 & 0.437 \\ 0.615 & 0.515 & -0.100 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}$$

3)对 Y 分量进行数学形态学法去噪。得到图像的 YUV 表示系统后,就可以对图像像素的灰度值即 Y 分量进行数学形态学法去噪^[7,8]。

a. 由于监控图像的噪声表现为随机的亮点和毛刺,所以根据数学形态学的性质,选用开运算进行滤波,即先对图像进行腐蚀运算,再对其进行膨胀运算;

b. 由于监控图像的噪声信号直径较小,所以选用 3×3 的结构元素窗口即可。

4)对经过数学形态学法去噪的 Y 分量进行中值滤波。对图像像素的 Y 分量进行数学形态学法去噪后,消除了一部分噪声,并把图像的细节聚合在一起。这时再使用中值滤波法可以消除图像中剩余的噪声,使图像平滑,并且不会严重丢失图像细节。本算法中,为了保持图像的细节,在进行中值滤波时选用 3×3 的二维滑动窗口。

5)将经过滤波的 Y 分量与图像原有的 U, V 分量合成,并将其转换为 RGB 表示系统。在对图像的灰度分量 Y 进行处理后,为了将处理后的数据重新写入图像中,要将图像的 YUV 表示系统转换为 RGB 表示系统,转换公式为:

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1.140 \\ 1 & -0.395 & -0.581 \\ 1 & 2.032 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y \\ U \\ V \end{bmatrix}$$

6)将 RGB 数组的值写入图像中。得到图像的 RGB 表示系统后,最后一步工作就是将 R, G, B 分量数组中的值写到监控图像的24位DIB位图中,即将这些数组的值写入表示监控图像的一维字节型数组中。

3 试验结果

1)分别使用 3×3 中值滤波算法、数学形态学算法和数学形态学开运算与 3×3 中值滤波相结合的算法分别对亮度不足的单帧图像去噪,结果表明:

使用 3×3 中值滤波算法去噪增强后的图像非常平滑,但变得模糊不清,图像信息丢失严重;使用数学形态学算法处理的图像比较清晰,但残存较多的噪声,图像不够平滑;使用数学形态学开运算与 3×3 中值滤波相结合算法处理后的图像中只存在较少的噪声,比较平滑,同时图像信息丢失很少,所以图像也比较清晰。

2)对压缩前后的录像码流进行比较,结果见表1。使用符合MPEG4视频编码标准的Divx Pro 5.02 Codec(32)编码器对码流进行压缩,压缩设置:编码速度为 $780 \text{ bit} \cdot \text{s}^{-1}$,图像质量为fastest,输出大小为 $352 \times 288 \text{ pix}$,输出帧频为 $25 \text{ 帧} \cdot \text{s}^{-1}$ 。结果表明:在亮度不足环境下拍摄的录像码流由于画面中含有随机加性图像噪声,所以在经过MPEG4编码器压缩后,其码流数据量要比在亮度充足环境下拍摄压缩的录像码流数据量大 $15\% \sim 25\%$ 。

表1 不同亮度环境下拍摄的录像码流

码流长度/s	亮度充足		亮度不足	
	压缩前	压缩后	压缩前	压缩后
5	37 130	243	37 130	295
10	74 255	489	74 255	595
20	148 505	1 016	148 505	1 270

3)先对在亮度不足环境下拍摄的监控录像码流进行分解,再对每一帧分解后的图像使用不同去噪增强算法处理,最后使用MPEG4编码配置将去噪增强后的图像合成压缩成新的录像码流(表2)。结果表明:使用低通滤波法或小波滤波法去噪,可将录像码流数据量降低 $10\% \sim 20\%$,但算法速度过慢,无法保证实时性;使用维纳滤波法、滑动窗口滤波法或直方图均衡法去噪,无法降低录像码流数据量,反而会使数据量增大 $1\% \sim 7\%$;使用数学形态学滤波法去噪,可将录像码流数据量降低 $10\% \sim 15\%$,算法速度较快,可满足实时性处理的要求,但去噪后的图像仍然含有一些噪声,使画面不够清晰;使用中值滤波法去噪,降低码流数据量的效果最好,可将录像码流数据量降低 $30\% \sim 35\%$,且算法速度较快,但去噪后的图像丢失了大量的图像信息,所以画面模糊不清;使用数学形态学滤波与中值滤波结合的算法去噪,可将录像码流数据量降低 $15\% \sim 20\%$,算法速度较快,可满足实时性处理的要求,且去噪后的

图像比较清晰平滑。

表2 不同去噪方法处理及压缩后的录像码流

Table 2 The comparison of video stream by different methods and compression kbit

去噪方法	录像时间/s		
	5	10	20
低通梯形滤波	270	545	1 120
小波滤波(第1层分解)	273	552	1 175
小波滤波(第2层分解)	245	503	1 056
维纳滤波	306	598	1 297
直方图均衡化	313	624	1 351
滑动窗口滤波	310	632	1 363
邻域平均滤波	269	547	1 158
中值滤波	221	446	939
数字形态学滤波	264	530	1 132
数字形态学滤波与3×3中值滤波结合	251	507	1 056

注:表内数据为采用MPEG4编码配置将去噪增强后的图像合成压缩后的录像码流数据量。

4 结论

使用数学形态学法与中值滤波法相结合的算法对亮度不足的数字监控图像进行去噪增强处理,兼顾了图像去噪平滑效果、图像清晰程度和去噪算法时间复杂度3方面的标准,主要优点是:

1) 去噪后监控图像比较清晰平滑;

2) 去噪后的监控图像压缩合成的码流数据量比未经处理的码流数据量明显降低;

3) 由于此算法的时间复杂度比较低,所以可以将此算法直接移植到数字监控录像系统中,而不会影响数字监控录像系统的实时性。

参 考 文 献

- [1] 钟玉琢,王琪,贺玉文. 基于对象的多媒体数据压缩编码国际标准——MPEG4及其校验模型[M]. 北京:科学出版社,2000,37~87
- [2] 马小虎,张明敏,严华明. 多媒体数据压缩标准及实现[M]. 北京:清华大学出版社,1996. 272~557
- [3] 何斌,马天予,王运坚,等. Visual C++数字图像处理[M]. 北京:人民邮电出版社,2001. 335~394,556~561
- [4] 伯连发,周建勋,张保民. 微光CCD噪声测试研究[J]. 南京理工大学学报,1994(3):54~56
- [5] 阮秋琦. 数字图像处理学[M]. 北京:电子工业出版社,2001,63~152,180~204,317~330,429~456
- [6] Castleman K R 著. 数字图像处理[M]. 朱志刚,林学闫,石定机译. 北京:电子工业出版社,18~22,346~348
- [7] 杨雪荣,康戈文,任文伟. 数字视频图像噪声特征分析[M]. 实用测试技术,2002.
- [8] Marpe D, Cycon H L, Zander G, Barthel K U. Context-based denoising of images using iterative wavelet thresholding[J]. Proc SPIE,2002,4671:907~914
- [9] Donoho D. De-noising by soft-thresholding[J]. IEEE Trans Inform Theory,1995,41:613~627