

雨雾天气下的户外场景成像

桑梓勤, 丁明跃, 张天序

(华中理工大学图像识别与人工智能研究所国家教委图像信息处理与智能控制开放实验室, 武汉 430074)

摘要: 本文分析了雨雾天气下大气介质对户外场景成像的影响, 通过输运理论与解析理论相结合, 得出了能见距离与图像对比度及分辨率的理论关系, 给出了图像合成的公式, 并且通过实验把模拟产生的图像与实际拍摄的图像进行了比较。

关键词: 图像合成; 点扩散函数; 调制传递函数; 图像对比度; 图像分辨率

中图分类号: TN911.73 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2000) 03-0131-03

Imaging for Outdoor Scene in Rain and Fog

SANG Zi-qin, DING Ming-yue, ZHANG Tian-xu

(State Commission Laboratory for Image Processing and Intelligence Control Institute for Pattern Recognition and Artificial Intelligence Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The influence of atmospheric media in rain and fog weather on imaging for outdoor scene is analyzed in this paper. We get the theoretical relationship of visibility distance and image contrast and resolution, and present the formulas for image synthesizing. The simulated images are compared with the captured gray level ones for rain weather and color ones for fog weather in our experiment.

Key words: image synthesis; point spread function; modulation transfer function; image contrast; image resolution

1 引言

天气和气候的变化对光强影响很大, 在用相机拍摄户外场景图像时, 灰度图像主要表现出灰度上的差异, 而彩色图像则表现不同的色调、明亮度与饱和度^[1~3]. 大气介质的主要成分可以分成三类^[2,7,9]: “干洁”的空气分子、水汽及气溶胶. 在晴天和阴天时, 大气成分主要是干洁的空气, 其消光特性变化很小. 但对雨雾等恶劣天气来说, 大气湍流、大气对光的吸收和散射、各种天气因素(如气温、气压、风速、风向、相对湿度、云层等)都会对成像产生一定的影响^[4,5]. 具体来说, 大气湍流和背景辐射使图像模糊化, 大气消光引起图像亮度和对比度下降, 气溶胶的前向散射造成图像分辨率下降. 国内外已有很多研究人员对各种大气成分的影响进行了分析和评估^[4,8], 但对于场景最终呈现什么样的图像, 则没有作进一步的研究.

在一般的户外场景图像分析与合成研究中, 往往只考虑晴天与阴天天光照变化, 但对于航测、遥感等实际应用, 图像对比度与分辨率问题则不容忽略. 本文重点分析了雨雾天气下大气介质对于成像的影响, 并且由重要的气象数据“能见距离”及晴天的场景图像来预测雨雾天气下的图像.

2 多次散射与成像质量的关系

在雨雾中, 水汽和气溶胶粒子的浓度大大增加, 大粒子的

多次散射是造成图像对比度下降和分辨率下降的主要原因. 下面采用输运理论(辐射传输理论)^[7,9]来描述大气介质的吸收和散射, 而用解析理论的点扩散函数(point spread function)和调制传递函数(modulation transfer function)来衡量图像的质量.

根据 Bouguer-Lambert 定律^[2], 光在某种介质中的能量损耗与光通过的距离成正比, 即:

$$I(\rho) = I_0(\rho) \exp(-k(\rho, m) \rho) \quad (1)$$

式中 $I_0(\rho)$ 是进入该介质的通量密度, $I(\rho)$ 是通过光程长度 ρ 后辐出的通量密度, $k(\rho, m)$ 称为消光系数或衰减系数. 在一个小的光程内, $k(\rho, m)$ 可以认为是一个常数 μ , 它是吸收系数 μ_a 和散射系数 μ_s 之和. 一般情况下, $\mu_a \ll \mu_s$. 根据能见距离 R_m 可以计算出可见光段的大气介质的散射系数^[9], 即:

$$\mu \approx \mu_s = 3.912/R_m \quad (2)$$

考虑一个成像系统, 物平面 S_0 上物强度为 $I_0(\mathbf{r}_0)$ 的非相干源发出的辐射通过大气随机介质传播了一段距离 L , 然后入射到直径为 D 的透镜上, 在像平面所观测到的像强度为 $I_i(\mathbf{r}_i)$. 对于二维物平面和像平面, \mathbf{r}_0 和 \mathbf{r}_i 是二维矢量. 像强度 $I_i(\mathbf{r}_i)$ 与物强度 $I_0(\mathbf{r}_0)$ 之间满足以下关系:

$$I_i(\mathbf{r}_i) = \int_{S_0} P(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_0) I_0(\mathbf{r}_0) d\mathbf{r}_0 \quad (3)$$

函数 $P(r_i, r_0)$ 代表了整个成像系统的响应,称之为点扩散函数. 采用等效物体向量 r_0 来代替 r_i ,使得物平面与像平面重合,成像系统成为等晕系统,而点扩散函数变为 $r_i - r_0$ 的函数. 求卷积积分的 Fourier 变换,得到:

$$G_i(f) = M(f) G_0(f) \quad (4)$$

式中 G_i 和 G_0 是归一化谱, $M(f)$ 是点扩散函数 $P(r)$ 的归一化 Fourier 变换,称为光学传递函数,它的模 $|M(f)|$ 称为调制传递函数,频率 f 单位是周/毫米,或者用角频率 f 代替 f ,单位是周/弧度. 成像系统的光学传递函数 $M(f)$ 为^[6]:

$$M(f) = \exp(-H(f) + H(0)) \cdot K\left(\frac{f}{D}\right) \quad (5)$$

式中函数 H 是球面波的结构函数,代表了大气介质的影响;函数 K 是圆形孔径的成像系统的调制传递函数.

大气介质对成像的相当于在光学成像系统的调制传递函数上叠加一个指数函数 $\exp(-H(f))$ 衰减,它可分为相干部分和非相干部分,它们都 μ_a 和 μ_s 的函数^[6,7]. 只要相干强度大于非相干强度,图像分辨率就可近似地由 Airy 斑决定,并且得到清晰的图像. 在较大的光学距离,相干强度显著地小于非相干强度,则像斑不可分辨.

3 实验结果

为了在实际天气情况下检验以上结论,我们在雾天和雨天进行了实验. 根据能见距离 R_m 可以计算出大气介质的散射系数^[9],根据天气情况,也可估计大气粒子之间的互相关距离.

所用 CCD 相机的镜头直径 $D = 35\text{mm}$, 焦距 $f_0 = 50\text{mm}$, 物距 $L = 50\text{m}$, 感光区是 $8\text{mm} \times 8\text{mm}$, 成像分辨率是 512×512 . 由此可以计算出相邻像素之间为 3.1×10^{-4} 弧度. 图 1 给出了三种天气条件下的调制传递函数. 其中光波波长 $\lambda = 0.55\mu\text{m}$ 是人眼最敏感的波长. 晴天的粒子之间互相关距离 $l = 0.35\mu\text{m}$, 散射系数 $\mu_s = 3.9 \times 10^{-5} \text{m}^{-1}$, 雾天 $l = 13\mu\text{m}$, $\mu_s = 0.078\text{m}^{-1}$, 雨天 $l = 110\mu\text{m}$, $\mu_s = 0.0078\text{m}^{-1}$.

从图 1 可以看出,晴天的调制传递函数接近于 1,雾天的截止角频率 $f_c = 60$ 周/弧度,雨天 $f_c = 800$ 周/弧度. 这样可以计算出在一个周期内,雾天的 $1/60$ 弧度的窄峰内有 53 个像素,即一个 Airy 斑的直径

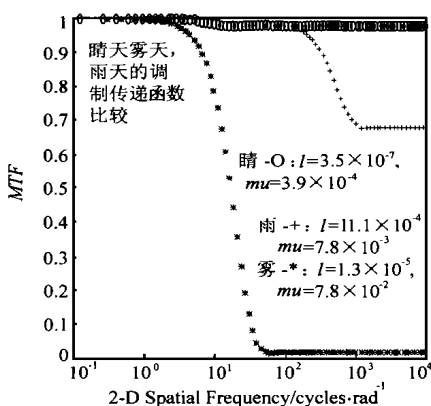


图 1 不同天气条件下的调制传递函数

约为 53 像素. 它说明了,由于大气介质的存在,成像系统会把平面上一个点反射的光子的能量,分配到像平面上一个直径为 53 像素的 Airy 斑上,这样使得图像对比度极大地下降,图像极其模糊化. 同样我们也可得到雨天的 $1/800$ 弧度内有 4

个像素.

假定晴天与雨天、雾天的物强度一样,显然在近距离内可以不用考虑晴天大气消光,其调制传递函数为 1,即 $G_{\text{晴}} = G_0$. 因此,雨天(或雾天)的像强度 $G_i = M * G_0 = M * G_{\text{晴}}$. 再考虑大气衰减,最后得到的雨天(或雾天)的图像为:

$$I = (M * I_{\text{晴}}) \exp(-\mu \cdot L) \quad (6)$$

式中调制传递函数 M 需要归一化. 对于雨天,用一个 5×5 的矩阵来表示雨天的直径为 4 个像素的 Airy 斑,并选中心点距最远点的距离为 e^{-2} . 图 2(b) 是计算出来的雨天的图像. 对于雾天,归一化的调制传递函数是一个 53×53 的矩阵,中心点距最远点的距离仍然为 e^{-2} . 图 3 是我们的实拍图与生成图像的比较.

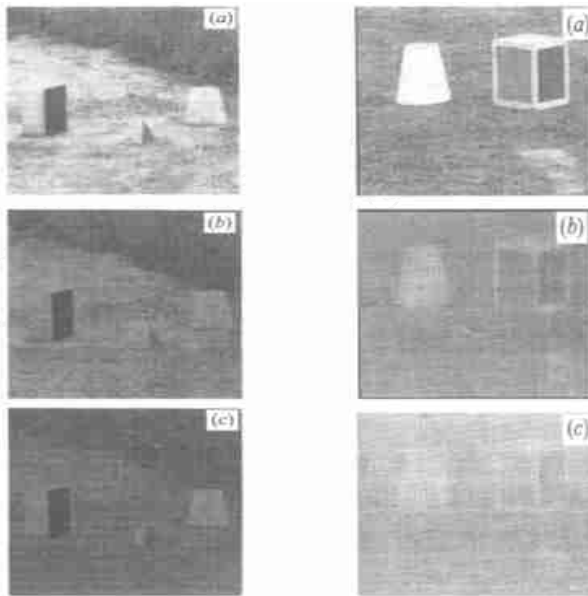


图 2 图像比较:(a)晴天实拍图像;(b)雨天生成的图像;(c)雨天实拍图像
图 3 图像比较:(a)晴天实拍图像;(b)雾天生成的图像;(c)雾天实拍图像

从图 2 和图 3 的比较可以看到,对于雨天的灰度图像,图像亮度与对比度的衰减效果非常明显,但晴天图像中地面的反光很强烈且不均匀,使得合成图像中地面部分不很理想. 而雾天的彩色合成图像基本模拟了实拍图像,图像对比度下降与分辨率下降都得到了反映,但图像的明亮度有一定差距,这说明还要对光照强度进行进一步的分析. 本文的工作还有待与我们以前的工作^[3]结合起来,可以达到更好的模拟效果.

4 总结

由于天气变化的复杂性,我们只考虑了影响成像的主要效应,即大气消光产生的图像亮度和对比度下降、前向散射与吸收引起的分辨率下降. 而大气变化是非常快的,不同地方的大气成分也不同,沙漠地区、海洋上空与陆地上又有不同的成像目标特性.

我们的研究也有一个非常重要的出发点,那就是气象参数常见、易获取,使得我们的计算易于进行. 但易用性与准确性往往是不可兼得的,在我们的讨论中,只考虑主要效应不能

不影响到准确性。

参考文献

- [1] IES Daylight Committee. Recommended practice of daylight. Lighting Design and Application, 1979, 9(2) :45 ~ 58
- [2] M. Iqbal. An Introduction to Solar Radiation. Toronto:Academic Press, 1983
- [3] 桑梓勤,丁明跃,张天序. 利用线性插值合成图像. 中国图像图形学报, 1999, 4(4) :270 ~ 274
- [4] N. S. Kopaika, A. N. Seidman, I. Dinstein, C. Tamasha, R. Amir, and Y. Biton. How weather affects seeing through the atmosphere. Optical Engineering, 1986, 25(3) :505 ~ 512
- [5] N. S. Kopaika. Imaging through the atmosphere for airborne reconnaissance. Optical Engineering, 1987, 26(11) :1146 ~ 1154
- [6] Akira Ishimaru. Limitation on image resolution imposed by a random medium. Applied Optics, 1978, 17(3) :348 ~ 352
- [7] Akira Ishimaru. Wave propagation and scattering in random media. Academic Press, 1978, 黄润恒, 周诗健等译. 随机介质中波的传播和散射. 科学出版社, 1986
- [8] L. Bissonnette. Imaging through fog and rain. Optical Engineering, 1992, 31(5) :1045 ~ 1052

- [9] 吴健, 乐时晓. 随机介质中的光传播理论. 成都电讯工程学院出版社, 1988



桑梓勤 1969 年出生, 现为华中理工大学图像所博士研究生, 主要研究方向为算法与计算复杂性、光照模型与图像合成、图像相似性。

丁明跃 1961 年出生. 华中理工大学图像所副所长, 教授, 博士生导师. 1991 年至 1993 年获德国洪堡研究基金在德国不伦瑞克工业大学机器人研究所从事博士后研究工作. 主要研究领域包括计算机视觉、路径规划、目标识别与跟踪等. 《电子学报》与《宇航学报》编委。

张天序 1947 年出生. 华中理工大学图像所所长, 教授, 博士生导师. 中国人工智能学会计算机视觉与智能控制学会理事, 国际应用人工智能协会会员. 主要研究领域包括智能图像信号与分析、成像与计算机视觉应用、智能控制与制导。

(上接第 136 页)

- [2] 盛骤等. 概率论与数理统计. 北京:高等教育出版社, 1989
- [3] Rudolph G. , Convergence analysis of canonical genetic algorithms. IEEE Trans. Neural Networks Jan, 1994, 5(1) :96 ~ 101
- [4] Michalewicz Z. , Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs. 3rd ed, Springer-Verlag, 1996
- [5] 余春峰. 十进制遗传算法的理论分析及其应用. 清华大学硕士学位论文, 1998, 6
- [6] 杨华中, 汪蕙, 胡冠章. 双极晶体管模型参数提取的组合优化算法. 电子学报, 1997, 25(11) :18 ~ 21