数字摄像法测量气象能见度

谢兴生 陶善昌 周秀骥④

(中国科学技术大学七系, 合肥 230026; ④中国气象科学研究院, 北京 100081)

摘要 数字摄像法自动测量能见度的仪器系统(DPVS), 通过数字化摄像机(CCD-CAMERA)直接摄取选定目标物及其背景的图象, 然后将图象从图象采集卡传到计算机, 通过对所获取的图象进行分析处理, 自动获取能见度的数值. 现介绍并给出本系统探测能见度的原理和方法之后, 最后介绍了DPVS与激光雷达同时进行野外能见度观测的对比试验情况, 结果表明, 两者的均方偏差为0.927 km, 相对均方偏差小于6.68%.

关键词 数字摄像 图象处理 能见度 对比试验

气象能见度是一个对航空、航海、陆上交通以及军事活动等都有重要影响的气象要素, 但至今, 国内、外对能见度的观测大都还是以人工目测为主, 规范性、客观性较差. 在器测能见度方面, 采用的设备主要有大气透射仪和激光能见度自动测量仪; 前者通过光束透过两固定点之间的大气柱直接测量气柱透射率, 以此来评估能见度值, 这种方法要求光束通过足够长的大气柱, 测量的可靠性受光源及其他硬件系统工作稳定性的影响, 只适用于中等以下能见度的观测, 而在雨、雾等低能见度天气, 又会因水汽吸收等复杂条件造成较大误差, 因此局限性很大. 后者则是通过激光测量大气消光系数的方法来推算能见度, 相对而言, 较为客观和准确, 但这种方法的使用目前还仅限于少数研究部门, 难以推广, 这是因为, 激光雷达不仅成本昂贵、维护费用高、操作复杂, 而且, 在雨、雾天也难以进行正常观测, 还存在如何考虑多次散射影响的问题, 因此, 改进乃至革新能见度探测技术仍是一个有重要意义的研究课题.

早在本世纪40年代[1], 已经有人用照像法来测量能见度, 它通过用照相机拍摄黑色目标物, 然后设法从图片求得目标物与背景的相对亮度比, 并以此来推算能见度值. 但由于当时从拍照、冲洗照片到测定目标物与背景物的亮度对比, 全是手工操作, 不仅操作繁琐、耗费时间, 而且难以实现真正定量化, 后来这种方法并未付诸实际运用. 但是与计算机技术的高速发展同步, 数字摄像技术及其应用近年来已得到迅猛发展, CCD数字摄像技术目前已经开始被用于航空航天、卫星图象、资源与环境遥感等方面. Thomas Legal 等人[2]于1994年, 用数字化像机实时测量能见度的简单试验结果, 但并未对所获结果的可靠性及测量中所采用计算公式的适用条件做严格说明. 因而从能见度测量的基本理论出发, 阐明用数字摄像技术测量气象能见度的原理, 将该方法与目前较可靠的能见度测量方法——Lidar方法同时进行对比试验, 以严格检验这一方法的可行性是至关重要的. 至于在技术上, 研制从取图到目标的定位和相对亮度计算全部自动化, 并适合在复杂甚至恶劣的气象和场地条件下应用的仪器系统更是有待努力.

本文将从理论推导入手, 阐明摄像法测量气象能见度的原理, 并将简要论述基于此方法的设计试制的一套初步实验系统. 然后, 将给出该实验系统与激光雷达进行对比实验的结果, 以及对实验结果的一些初步分析和讨论.

1 摄像法测量能见度的基本原理

能见度是标度人眼视程的一个物理量, 显然, 它不仅与大气的光学特性有关, 而且与人眼的视觉生理有关. 为了使能见度能单纯反映大气的物理状况, 气象上规定: 标准视力的人眼在当时天气条件下, 能够从天空背景中看到和辨认出(视角约为 0.5~ 5°的) 黑体目标物的最大距离称为气象能见度. 由于人眼在观察极限能见距离附近的目标物时, 起着决定作用的是亮度差异, 所以, 在下面推导中, 也从定义亮度对比开始.

以观察者为基点, 设目标物视亮度为 B_t, 背景的视亮度为 B_g, , 则它们之间的亮度对比 K 定义为

$$K = \left| \frac{B_t - B_g}{B_g} \right|. \tag{1}$$

显然, 随着距离加大, K 值逐渐减小, 目标物将逐渐变模糊; 当 K 小于某一临界值 ε, 人眼将无法把目标物从背景中分辨出来, 这一临界亮度对比 ε 称为亮度对比感阈, $K = \varepsilon$ 就是确定能见距离的条件. ε 是一个与人眼视觉特征有关的物理量, 世界气象组织(WMO) 推荐的 ε 值为 0.02, 而国际民航组织(ICAO) 推荐的 ε 取值为 0.05.

在一定距离以外的物体所发的或所反射的光, 在进入人眼前要经历从所在位置到观察者之间的一段空气柱的辐射传输, 通过求解辐射传输方程[3], 不难写出离观察者距离 R 处目标物和背景的视亮度表示式

$$\begin{cases} B_t(R) = B_t^* \cdot \exp\left| - \int_0^R \sigma_w(r)\,dr \right| + D(R), \\ B_g(R) = B_g^* \cdot \exp\left| - \int_0^R \sigma_w(r)\,dr \right| + D(R). \end{cases} \tag{2}$$

(2) 式的两个等式中, 前一项可看作是目标物或背景的固有亮度(即 B_t^* (或 B_g^*) , 经厚度为 R 的空气柱削弱(或消光) 后, 对视亮度的贡献, $\sigma_w(r)$ 为大气消光系数; 后一项是空气柱本身的附加亮度对视亮度的贡献, 若假设大气中自然照明强度为 J_v, 则厚度为 R 的空气柱亮度可表示为

$$D(R) = \int_0^R \sigma_w(r) \cdot J_v \cdot \exp\left| - \int_r^R \sigma_w(r) \cdot dr \right| \cdot dr. \tag{3}$$

若仅考虑观察点与目标物处在同一高度的水平能见度问题, 同时假设大气消光系数不随距离变化, 气柱受到的自然照明强度也不随距离变化, 并令 R_t 为目标物离观察者的距离; 在以天空为背景, 取 K 为 ε 时, 从(1) , (2) 和(3) 式推导可得到白天的水平能见度公式

$$V_h = \frac{\ln\left| 1 - \dfrac{B_t^*}{B_g} \right| + \ln \dfrac{1}{\varepsilon}}{\ln\left| 1 - \dfrac{B_t^*}{B_g} \right| - \ln\left| 1 - \dfrac{B_t}{B_g} \right|} \cdot R_t, \tag{4}$$

若假设目标物为绝对黑体, $B_t^* = 0$, 并取 ε 值为 0.02, 可得到

$$V_h = \frac{-3.912 \cdot R_t}{\ln(1 - B_t / B_g)}. \tag{5}$$

(5) 式便是摄像法测量能见度的基本公式, 由该式可知, 在符合目标物为黑体的条件下, 只要知道目标物与观测者之间的距离 R_t, 并测得目标物的视亮度 $B_t(R_t)$ 与天空背景的视亮度 B_g 比

值,即可计算出水平气象能见度 V_h. 而(4)式则可以用于分析目标物为非黑体时,忽略目标物固有亮度 B_t^*,会对结果带来多大的影响.

2 数字摄像法测量能见度的实验系统

图1给出了数字摄像法自动测量能见度系统的原理框图. 镜头及光学系统由若干透镜组成,主要作用是成像,外界景物通过它聚焦在CCD摄像头的感应窗上,本系统所采用的是定焦自动光圈镜头,焦距为12.5 mm.

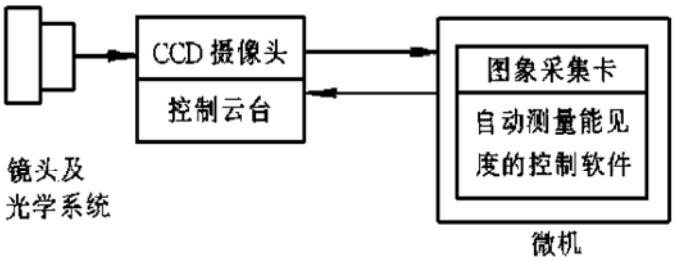

图1 摄像法自动测量能见度系统的原理框图

CCD摄像头的主要部件为一个称为CCD的电容耦合固体板,它是实现光电转化及实现图象数字化的关键器件,其上由一些基本独立的光敏(或光电转化)单元以阵列的方式组成,这些光敏单元受光照时能产生电子,电子的数量与光照强度成比例,每个单元经过一定时间的感光和电荷积累,形成电荷像. 对于行间转移式的CCD,电荷像在驱动时钟电路的驱动下,被逐行转移到垂直位移寄存器中,然后再依次一行行地送到水平移位寄存器输出,本系统所采用的CCD为象素分辨率512×512的彩色摄像板. 而控制云台是一个可以携带摄像头全方位转动的电动装置,通过微机的RS-232异步通讯输出信号,实现云台角度自动化控制. 系统中所采用的图象采集卡是24位真彩色、分辨率最大为512×512的高速图象捕获卡.

处理软件系统实现图象自动采集控制、目标物及背景位置的搜索定标,完成从彩色图象到灰度等级图象变换;并可根据定标位置,识别出目标物及其背景的平均亮度(灰度级)数值[4],及计算显示能见度数值. 软件系统以Windows为运行平台,并采用256色、象素分辨率为800×600的真彩色显示驱动程序.

3 现场对比试验结果

在实验系统设计完成后,与中国科学院安徽光学精密机械研究所的AR300(双波长可移动式)激光雷达联合进行了近20 d(1997_12_20~ 1998-01-10)的能见度观测实验.

AR300激光雷达是一种固体激光雷达, 其口径为300 mm,组合焦距22 m,工作波长为0.532 μm,激光的半宽度为0.1 nm;在太阳光很强时,另加干涉滤光片隔除太阳光;由于本激光雷达波长接近于0.55 μm,就采用它测量的消光系数计算能见度[5]. 数字像实验系统所选取的目标物有中心距离约7.5 km的大蜀山及中心距离约0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 3.5 km的一些树林、村庄,所有目标物均取天空为背景.

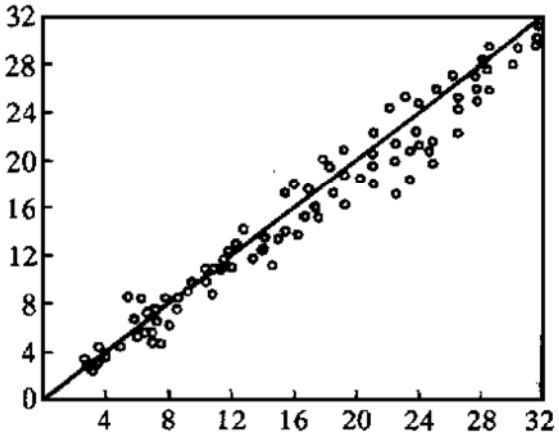

图2 能见度对比观测实验结果示
横坐标为激光雷达所测能见度数值,纵坐标为数字摄像法测量能见度数值;单位:km

图2中表示的是这次联合实验的结果,图中以符号"○"标示的点之横坐标表示的是激光雷达所测的能见度数值,而纵坐标表示同一时间(相差不超过5 min)用数字摄像法所测量的能见度数值. 另外,为了尽可能减少目标物非黑体给结果造成的影响,选取树林、有树林的山体或有足够视角的黑色物体作为目标物. 为

衡量试验点的偏差大小, 定义能见距的均方根偏差 σ_a 和均方根相对偏差 σ_d 分别为

$$\sigma_a = \sqrt{\sum_{i=1}^{N}(a_i - \bar{a}_i)^2/(N-1)}, \quad \sigma_d = \sqrt{\sum_{i=1}^{N}((a_i - \bar{a}_i)/(\bar{a}_i)^2/(N-1)},$$

式中, a_i 和 $\bar{a}_i$ 分别为第 i 个点的 CCD 所测能见距和激光雷达、CCD 同时所测之能见距的平均值, 计算得到能见距的均方根偏差 σ_a 为 0.927 km, 均方根相对偏差 σ_d 为 6.68%, 相关系数为 0.979. 由此可见, 数字摄像法与激光雷达的测量结果吻合的相当好, 但从图 2 中, 也可看到在 18 km 以后, 两者的测量结果偏差有所增大, 数字摄像法所测的能见度值有偏低的倾向.

4 结论与讨论

实验结果证明, 前面阐述的利用数字摄像技术测量气象能见度的方法是可行的和可靠的. 这种方法具有以下优点: ( ) 从原理上, 它类似于人眼的观察方式, 可输出直观图象却避免了人的主观性; 不存在象激光雷达发射强激光探测, 在大气光学厚度很大时, 多次散射效应会影响测量结果的问题; ( ) 可以进行连续的、无人值守式的观测; ( ) 低成本、高可靠性, 有可能使它具备对恶劣气象条件和复杂场地的适应性.

通过实验也发现, 镜头/光学系统、CCD、图象采集卡的性能、尤其是目标物选取适当与否对测量结果有重要影响. 比如当选择较近距离的灰色楼房作为目标物时, 观测所得的能见度值有明显偏低的倾向. 事实上, 当目标物不是绝对黑体, 即目标物的真量度 B_t^* 不为 0 时, 因 B_t^*/B_g 是一个不大于 1 的小值, $\ln(1-B_t^*/B_g) \approx -B_t^*/B_g$, 从(4)式中可得

$$V_h \approx \frac{3.912}{-\ln(1-B_t/B_g) - B_t^*/B_g} \cdot R_t,$$

从此式中可看到, 若 $B_t^* \neq 0$, 如不在分母中减去修正项 B_t^*/B_g, 所得的测量结果将会偏低. 因此, 为使结果能更接近实际情况, 测量中应尽量选择接近黑体的目标物, 以及根据能见度的好坏选择适当远处的目标物. 另外, 由于时间所限, 本实验系统对几百米以内的低能见度及灯光能见度的试验, 还有待于深入进行.

致谢 中国科学院安徽光学精密机械研究所二室为配合这次的对比观测试验, 做了大量的工作, 在此表示衷心的感谢.

参 考 文 献

1 Steffens C. Measurement of visibility by photographic photometry. Industrial Engineering Chemistry, 1949, 41: 2 396~ 2 399
2 Thomas Legal, Louis Legal, Waldemar Lehn. Measuring Visibilty Using Digital Remote Video Cameras. American Meteorological Society, 9th symp on met observ & instr, 1994. 87~ 89
3 周秀骥等编著. 高等大气物理学. 北京: 气象出版社, 1992
4 Steve Rimmer. Windows bitmap graphics. 北京: 学苑出版社, 1994
5 孙景群编著. 激光大气探测. 北京: 科学出版社, 1986

(1998-02-11 收稿, 1998-05-13 收修改稿)