

鲁棒图像去雾的大气光校正与透射率优化算法

沈逸云, 刘春晓*, 张金栋, 邵雅琪, 赵锦威

(浙江工商大学计算机与信息工程学院 杭州 310018)
(cxliu@mail.zjgsu.edu.cn)

摘要: 针对已有单幅图像去雾方法中存在的天空灰暗和对比度增强不足等问题, 提出基于大气光自适应校正与透射率鲁棒性优化的高可见度图像去雾算法. 该算法采用白平衡和伽马校正对输入图像进行预处理, 以提升亮度、增强对比度并避免出现严重的偏色现象. 为了防止大气光值估计过高, 提出一种基于天空检测的大气光自适应校正方法, 以获得更明亮的天空区域复原效果. 最后通过检测光晕像素和透射率上下文一致性推断来识别透射率不可靠的像素, 并在可靠透射率保持项、不可靠透射率插值项以及相似像素透射率关联项的约束下设计了透射率鲁棒性优化模型, 以对不可靠透射率进行校正. 实验结果表明, 文中算法获得的透射率更符合场景中的深度变化趋势, 使得去雾结果具有较高的清晰度、对比度与色彩饱和度, 且天空区域也显得更为自然.

关键词: 图像去雾; 暗通道先验; 大气光; 透射率
中图分类号: TP391.41

Atmospheric Light Correction and Transmission Optimization Based Robust Image Dehazing

Shen Yiyun, Liu Chunxiao*, Zhang Jindong, Shao Yaqi, and Zhao Jinwei

(School of Computer and Information Engineering, Zhejiang Gongshang University, Hangzhou 310018)

Abstract: To address the dusky sky and the insufficient contrast enhancement of the existed single image dehazing methods, we propose a high visibility image dehazing algorithm with adaptive atmospheric light correction and robust transmission optimization strategies. The input image is preprocessed with white balance and gamma correction in this paper to increase brightness, enhance contrast and avoid the color cast problem. In order to prevent the atmospheric light from over-estimation, an adaptive atmospheric light correction strategy based on sky detection is put forward, which is beneficial to brighter restoration of the sky regions. Finally, we recognize those pixels with unreliable transmission by the detection of halo effect and the inference of transmission context consistency. And, we design a robust transmission optimization model to correct the unreliable transmissions, under the constraint of the reliable transmission maintenance term, the unreliable transmission interpolation term and the transmission correlation term among the similar pixels. Experimental results show that our transmission consists with the depth variation better, and the haze-free images possess high definition, contrast and color saturation, as well as natural restoration of sky regions.

Key words: image dehazing; dark channel prior; atmospheric light; transmission

收稿日期: 2016-10-08; 修回日期: 2017-03-13. 基金项目: 国家自然科学基金(61003188,61379075); 国家科技支撑计划项目(2014BAK14B01); 浙江省自然科学基金(LY14F020004); 浙江省公益性技术应用研究计划项目(2015C33071); 浙江工商大学青年人才基金项目(QZ13-9); 北京航空航天大学虚拟现实技术与系统国家重点实验室开放基金课题(BUAA-VR-13KF-2013-3); 浙江省智能交通工程技术研究中心开放课题(2015ERCITZJ-KF1). 沈逸云(1995—), 男, 在校学生; 刘春晓(1979—), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, CCF会员, 论文通讯作者, 主要研究方向为图像视频处理与理解、智能视觉监控、计算机视觉、模式识别与智能系统; 张金栋(1996—), 男, 在校学生; 邵雅琪(1996—), 女, 在校学生; 赵锦威(1995—), 男, 在校学生.

雾是近地表空间常见的天气现象, 户外图像摄影工作经常受到雾的影响. 雾天环境中悬浮有大量气体小液滴, 对空间中的光线具有散射作用, 严重削弱了到达成像系统的物体表面反射光质量, 导致图像对比度与色彩饱和度受损. 大量计算机视觉方法要求输入高对比度图像, 例如, 目标识别、图像分类等, 降质图像难以达到输入要求, 因此图像去雾具有重要实用价值, 已成为计算机视觉和计算机图形学等多学科交叉领域的热门研究课题.

已有图像去雾方法主要存在 2 个技术难点: 1) 大气光估计容易受到天空等高亮区域的干扰, 导致其估值过高; 本文基于天空检测对大气光进行自适应校正, 能够得到明亮且干净的天空复原结果. 2) 透射率计算容易产生不合理的纹理性波动, 导致其可靠性降低; 本文基于能量方程对透射率进行鲁棒性优化, 大大提升了无雾图像的对比度与色彩饱和度.

1 相关工作

单幅彩色输入图像只有 RGB 三通道的色彩信息, 然而图像去雾还需要场景深度这一未知数据, 信息不足是单幅图像去雾技术面临的挑战. 因此, 许多需要额外输入的去雾方法被提出, 包括以多幅相同场景下不同天气条件^[1-2]或者多幅不同角度的偏振图像^[3-4]作为输入的方式, 以及要求直接输入深度信息^[5]的方法. 此类方法^[1-5]在获取输入数据时可操作性差, 实用性较低. 另一类方法直接通过图像增强的方式^[6-7]达到去雾的目的, 但是由于其未考虑不同深度处的降质程度差异等因素, 易造成颜色失真和噪声放大等问题.

目前流行的单幅图像去雾方法^[8-15]大多数基于雾天图像退化模型^[15], 并引入了某种假设或者先验知识. Tan^[8]发现无雾与有雾图像之间的主要差别在于前者具有较高的对比度, 于是使用增强局部对比度的方式进行去雾, 容易使局部对比度增强过度. Fattal^[9]假设入射光强度与物体表面反射特性不相关并据此反求透射率, 然而浓雾区域的去雾效果不佳. 之后其又发现同平面局部图像块内的像素值在 RGB 颜色空间呈线性分布这一规律, 并据此提出一种基于颜色线先验的图像去雾方法^[10]; 但是, 该方法容易出现颜色线样本提取不足的情况, 使部分区域的透射率无法得到有效

估计, 并且部分恢复结果存在颜色失真现象. Xiao 等^[11]使用引导联合双边滤波估计一个边缘保持的平滑大气光幕, 并以此计算透射率, 它对于远景物体的去雾效果较好, 但是在天空区域容易出现颜色失真. Ancuti 等^[12]使用多尺度融合进行图像去雾, 具有较短的计算时间, 但是部分无雾图像也容易产生偏色现象. Gao 等^[13]提出线性拉升有雾图像的逆图像, 能够达到快速去雾效果, 但是它不适用于偏暗的有雾图像, 且会使图像边缘产生模糊. Zhu 等^[14]通过观察有雾图像亮度与色彩饱和度之间的关系, 提出基于色彩衰减先验的图像去雾方法, 但其通过设置与实际物理模型不符的全局散射系数计算透射率, 容易造成局部区域去雾程度不足的问题.

He 等^[15]通过分析大量图像发现, 在无雾图像局部范围内存在某一通道颜色值趋近于零的规律, 即暗通道先验. 与已有的图像去雾方法相比, 基于暗通道先验的图像去雾方法^[15]性能突出, 得到广泛应用. 同时也产生了许多针对暗通道先验的改进方法^[16-20]. He 等^[16]提出使用导向滤波代替软抠图, 能大大提高计算速度; 然而基于滤波的精细化操作容易使相同平面的透射率出现纹理波动, 并不适用于透射率的优化. 赵锦威等^[17]提出基于块偏移的透射率估计策略, 能有效地减少光晕的产生, 但是对于残留光晕以替换形式处理, 在交界处容易出现视觉瑕疵. 文献^[18-20]对不符合暗通道先验的天空部分做出改进, 但它们均是对图像分割得到的天空单独处理, 严重依赖于分割效果.

针对暗通道先验图像去雾方法中存在的问题, 本文对估值过高的大气光进行自适应校正, 检测并优化不可靠的透射率估值, 期望针对单幅图像获得更好的去雾效果.

2 本文算法

在图像去雾领域广泛使用的雾天图像退化模型^[15]为

$$I(x) = J(x)t(x) + A(1-t(x)), t(x) = e^{-\beta d(x)} \quad (1)$$

其中, $I(x)$ 为有雾图像中像素 x 的像素值; J 是场景辐射, 即待恢复的无雾图像; t 是场景透射率; β 是散射系数; d 是场景深度; A 是环境大气光. 图像去雾的目标是在仅已知 I 的情况下, 计算 t 与 A , 最终恢复得到 J .

本文算法首先对输入图像进行预处理, 以提升

复原图像的亮度与对比度,同时避免偏色现象的产生.接着,采用基于支持向量机的大气光校验策略初步估计大气光,并对其进行自适应校正以削减估值过高的大气光.最后,采用基于块偏移的透射率计算策略^[15]初步估计透射率,接着检测不可靠透射率估值,并以能量方程的形式进行优化校正,以得到更可靠的透射率估计结果.图 1 所示为本文算法的流程图.

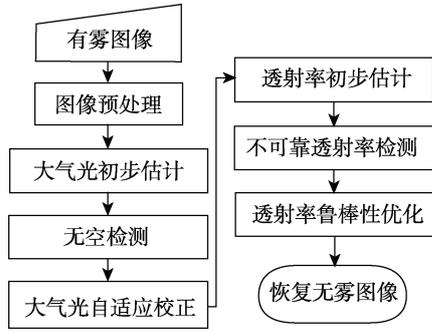


图 1 本文算法流程图

2.1 图像预处理

自然条件下大气环境复杂,部分图像还会受到霾的影响.相较于主要由透明小液滴组成的雾,霾中含有大量具有颜色属性的灰尘、硫酸、硝酸等颗粒物,导致降质图像整体色调偏移,然而图像去雾方法一般都具有增强色彩饱和度的作用,往往会加重色调偏移的程度.因此,本文使用基于白色块的白平衡方法^[21]对输入图像 I 做颜色校正,以避免后续图像去雾过程中出现更严重的偏色现象,并记颜色校正后的图像为 I_{wb} .

此外,由式(1)可知,无雾图像 J 与有雾图像 I 之间存在关系

$$J(x) - I(x) = \frac{(I(x) - A)(1 - t)}{t}$$

当 $I(x) < A$ 时, $J(x) < I(x)$. 而大气光 A 一般大于 I 中大多数像素值,因此无雾图像 J 的总体亮度将低于有雾图像 I ,这将严重影响光线条件不佳的有雾图像的去雾效果.针对上述问题,本文使用伽马校正对 I 亮度通道进行预处理,以提高恢复结果的亮度与对比度.将 I_{wb} 从 RGB 颜色空间转换到 Lab 颜色空间,对 L 通道进行伽马校正,即

$$L_g = \begin{cases} L^{0.55}, & 0 \leq \bar{L} \leq 50 \\ L^{0.7}, & 50 < \bar{L} \leq 100 \end{cases}$$

其中, \bar{L} 为校正前 I 的 L 通道的均值; L_g 为伽马校正后的 L 通道值.最后,将校正后的图像转换到 RGB 颜色空间作为预处理后的图像,记为 I_{ip} .

2.2 大气光自适应校正

太阳光、物体表面反射光等光源在雾的漫反射作用下形成环境大气光 A ^[15].自然图像中光线散布情况复杂,难以依据输入图像直接反求 A .根据式(1),当 $t \rightarrow 0$ 时, $I \rightarrow A$,此时物体表面反射光在环境中衰减殆尽,成像系统只能接收到环境大气光.因此,图像中雾最浓区域的光线强度可以被近似认为是大气光值^[15].然而,仅以三通道值较高^[8]为依据在输入图像中寻找大气光,往往会将墙面、车灯等白色高亮物体误检为大气光.由于暗通道图像以图像块形式进行计算,可以排除部分尺度较小的白色物体的干扰,于是 He 等^[15]通过暗通道图像中值最高的区域估计大气光.但是,当白色物体的尺度大于图像块时,这一策略就会失效.

因此,本文采用基于支持向量机的大气光校验方法^[15]对大气光进行筛选,作为初步估计的大气光记为 \hat{A} .对于没有天空的图像, \hat{A} 已能较合理地体现图像中雾最浓区域的光线强度这一大气光的内在意义.然而,对于存在大片天空的图像,经过筛选后的大气光一般选取在天空中暗通道值最高的区域.天空受到太阳直射光的影响,往往使大气光估计值过高,这会对无雾图像的复原造成不利影响.将式(1)变形后得

$$J(x) = A + \frac{I(x) - A}{t(x)}$$

天空部分像素值较接近,大气光值一般仅略大于其他天空像素值,即 $I_{sky} \approx A$,且 $I_{sky} - A < 0$;同时天空部分 t 较小,因此无雾图像 $J_{sky} \ll A$.比较图

2a, 2c 可以发现,使用 \hat{A} 复原得到的无雾图像的天空部分比输入图像灰暗很多且存在偏色现象.对此,本文提出一种基于天空检测的大气光自适应校正方法,以削减估值过高的大气光.首先,使用基于一维直方图分割的天空检测方法^[18]获得天空二值图,记为 S_{sky} ;并计算天空区域像素点占图像总像素数的百分比,记为 k . \hat{A} 的自适应校正公式为 $A = c \times \hat{A}$,其中 $c = 1 - k/3$.本文将 c 的最小值限定为 0.9,以避免大气光过度校正导致的过曝现象.图 2d 所示为使用自适应校正后的大气光复原的无雾图像,与图 2c 相比,图 2d 所示天空区域更为明亮且没有偏色现象,而非天空区域由于其颜色值与大气光值之间的差异以及透射率 t 都较大,因此适当校正 A 并不会对这部分区域的复原结果产生

显著影响.

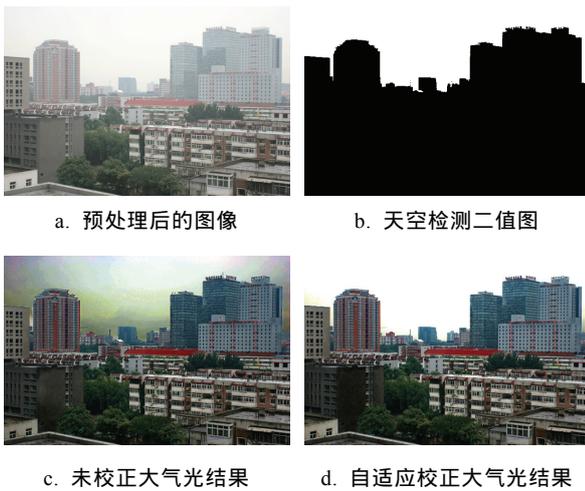


图 2 大气光自适应校正效果

2.3 透射率精确化计算

暗通道先验图像去雾效果^[15]总体上具有较高的对比度和色彩饱和度,但是局部存在光晕与块效应等视觉瑕疵,这是由于部分透射率与深度信息之间不成比例关系.针对这部分不可靠的透射率估值通常使用软抠图^[15]、导向滤波^[16]等基于滤波的方式进行精细化操作,使透射率图的边缘信息趋近原图像.然而,基于滤波的精细化操作存在 2 个缺陷.1) 相同平面物体的透射率值应该保持一致,而滤波操作往往会使透射率图在平面内出现不必要的纹理波动.这不仅使透射率不再符合深度信息的变化规律,还会削弱无雾图像的对比度.2) 由于滤波总是以相邻像素值作为参考以一定方式重新计算中心像素的值,这会导致不可靠透射率相邻区域里的可靠透射率估值受到影响,偏离原本可靠的值估计.一种正确的透射率校正方法应尽可能少地变动可靠的透射率估值.

本文以 I_{ip} 作为输入,使用基于块偏移的透射率计算策略^[15]初步估计透射率 \hat{t} ,能够有效地减少不可靠透射率的产生.接着,本文检测 \hat{t} 中不可靠的透射率,并通过一种求解最优能量方程的形式对 \hat{t} 进行优化校正,能在避免产生上述 2 个缺陷的同时提高透射率估值的鲁棒性.本文构造的能量方程形式为

$$\arg \min E = \zeta_1 E_1 + \zeta_2 E_2 + \zeta_3 E_3 \quad (2)$$

其中, E_1 , E_2 与 E_3 分别为可靠透射率保持项、不

可靠透射率插值项以及相似像素透射率关联项; ζ_1 , ζ_2 和 ζ_3 分别是上述 3 项的权重.

2.3.1 不可靠透射率检测

本文根据不可靠透射率的成因及其具体表现,将其分为 2 类并分别以不同的方式进行检测.

第 1 类.使去雾结果产生光晕的不可靠透射率.虽然基于块偏移的透射率计算策略^[15]能极大地抑制光晕效应,但是在某些该策略失效的区域仍会出现明显的光晕现象.本文发现,在导向滤波^[16]后的透射率图中,此类不可靠透射率值的变化幅度相较于其余透射率更大.因此,本文对 \hat{t} 进行导向滤波^[16],将透射率值变化幅度最大的前 5% 的透射率点标记为不可靠透射率.图 3d 所示为使用 \hat{A} 与 \hat{t} 恢复的无雾图像,在旗杆与屋檐附近可以看到明显的光晕现象,图 3e 显示本文方法能够准确检测出该类会产生光晕的不可靠透射率.

第 2 类.不符合深度变化趋势的不可靠透射率.户外拍摄的自然景物的深度信息都具有一定的变化趋势,水平拍摄的景物由近及远深度逐渐增加,俯拍景物的深度信息随水平面与镜头之间的夹角而变化.因此,在与深度信息成比例关系的透射率图中,图像上下文的变化趋势也具有一定的一致性.然而,在 \hat{t} 中存在部分产生负向突变的透射率,违背了这种上下文一致性.这是由于暗通道先验图像去雾方法^[15]使用固定大小的图像块来估算透射率,如果某块连续区域的尺度大于暗通道先验所使用的图像块,并且其三通道值均高于邻域时,该区域得到的透射率估值就会产生此类不符合上下文一致性的负向突变.He 等^[15]曾指出,白色物体不符合暗通道先验规律,小尺度的白色物体经过图像块过滤,并不会对透射率估计造成不利影响;然而大尺度的白色物体所造成的错误估计反映在透射率图中就是本文所述的此类不可靠透射率.图 3~4 所示为天安门与体育场的去雾实例.图 3a 中左侧红色城墙由于尺度大于计算暗通道图像时所使用的图像块,且其三通道值略高于相邻区域,导致图 3c 出现红框内的不可靠透射率估值.图 4 球门与跑道虽然都是白色,但是其尺度窄于暗通道图像块,并未对透射率估计造成不利影响,而图像左上角的看台由于其尺度较大,导致图 4c 中透射率在相应位置出现负向突变.

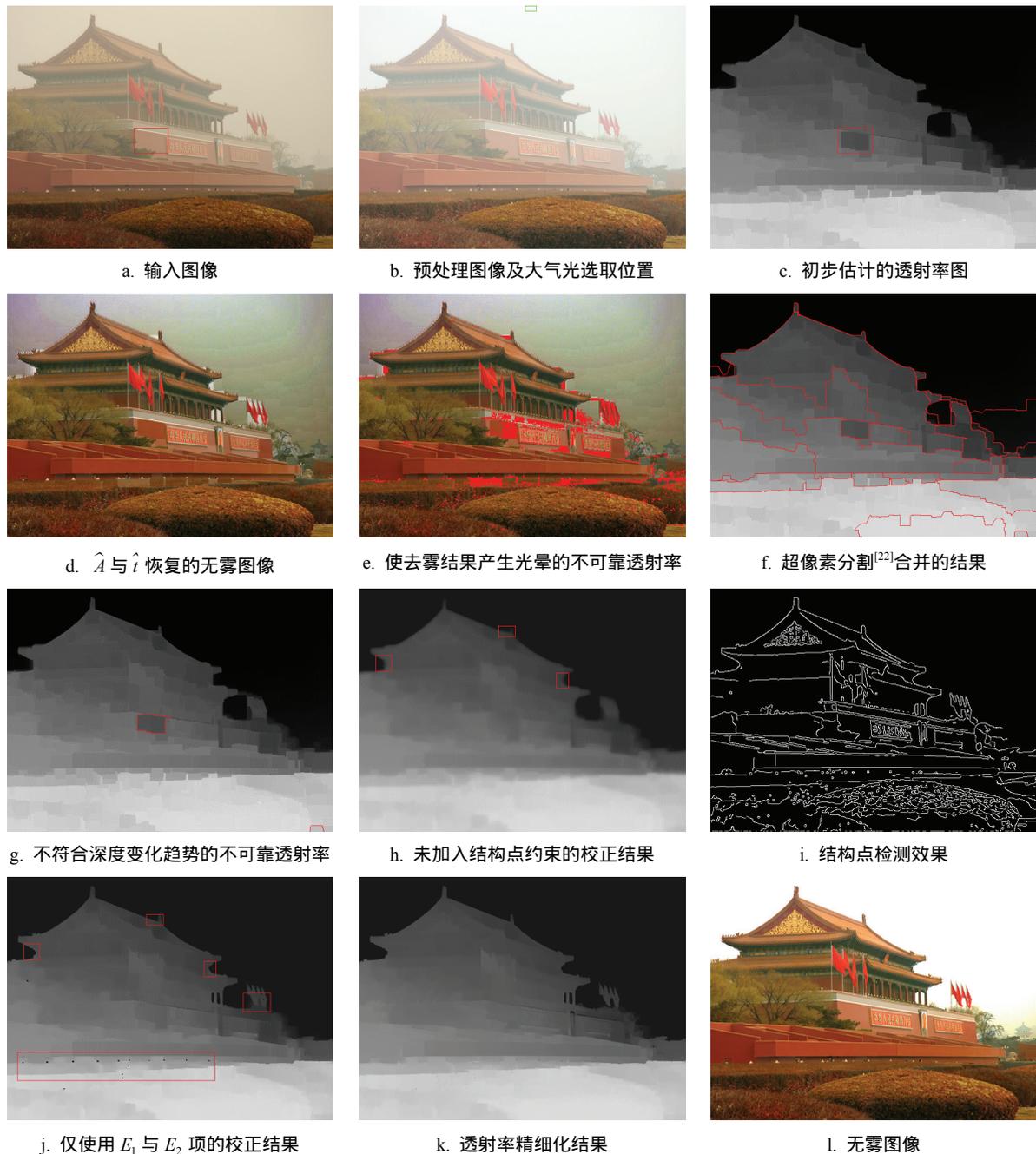


图 3 天安门图像去雾实例

本文以负向突变为依据检测此类不符合深度变化趋势的不可靠透射率。首先使用简单线性迭代聚类超像素分割方法^[22]对 \hat{i} 进行超像素分割, 并将透射率均值差异小于 12/255 的相邻超像素块合并, 重新计算超像素块的透射率均值; 接着寻找透射率均值小于相邻块的超像素块, 将其作为候选超像素块。由于天空区域的透射率值总是低于相邻区域, 某些超像素块可能因包含天空而发生误检, 因此需对候选超像素块进行筛选。本文检测候选超像素块内是否包含 S_{sky} 中的像素点, 若包

含, 则舍弃该候选块; 接着根据 S_{sky} 计算天空颜色均值, 若候选块的颜色均值与天空颜色均值差异小于 0.012, 则舍弃该候选块; 最后, 将通过筛选的候选超像素块内的所有透射率点标记为不可靠透射率。

2.3.2 可靠透射率保持项

本文使用可靠透射率保持项 E_1 校正不可靠透射率, 并尽可能地保持可靠透射率的估值, 即

$$E_1 = \sum_{p \in U} (t_p - \hat{t}_p)^2$$

其中, t_p 是点 p 待求解的透射

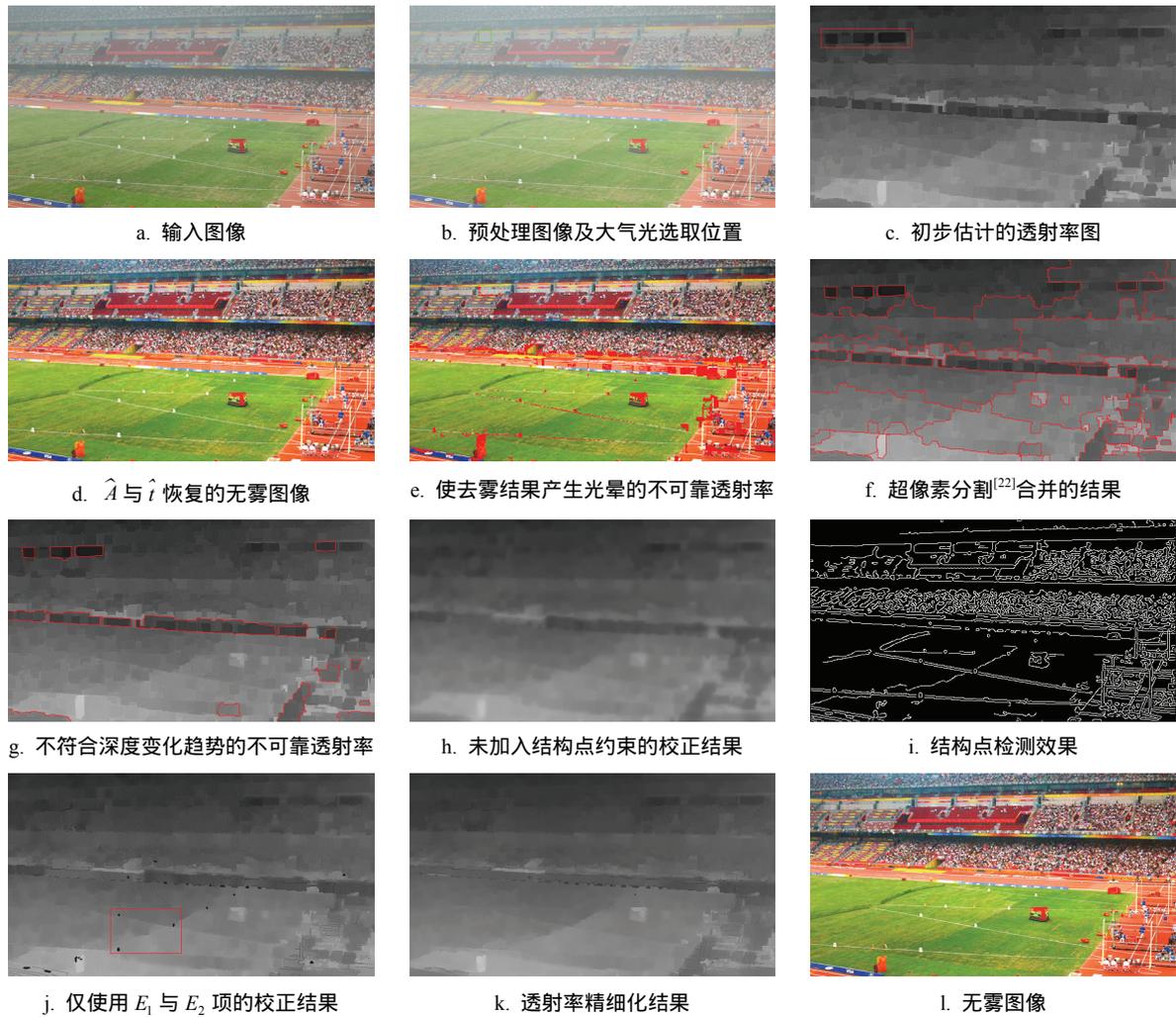


图 4 体育场图像去雾实例

率值; \hat{t}_p 是点 p 在 \hat{t} 中的透射率估值; U 是被标记为不可靠透射率的像素点集合. 通过 E_1 项的约束, 可靠透射率将倾向于保持原始的透射率估值, 而未受约束的不可靠透射率将在 E_2 与 E_3 项的作用下得到校正.

2.3.3 不可靠透射率插值项

不可靠透射率插值项 E_2 对相邻像素对的透射率作如下约束: $E_2 = \sum_{(p,q) \in P \& p,q \notin S} (t_p - t_q)^2$. 其中, P 是图像上所有相邻像素对的集合; t_p 和 t_q 分别为 (p, q) 中 2 个相邻像素点的待估计的透射率值; S 是结构点集合.

局部相同平面内物体的透射率值应保持一致. 根据马尔可夫随机场, 本文通过 E_2 项使相邻像素点的透射率值尽量接近, 以满足透射率的局部一致性. 然而, 由于不同平面的透射率值会相互影响, 对图像上所有相邻像素对的透射率无差别地建立

联系并不能达到较好的校正效果. 因此, 本文引入结构点集合 S , 切断 S 两侧透射率的联系, 使不可靠透射率仅与相同平面的透射率产生联系, 从而达到校正目的. 图 3h 所示为将图像上所有相邻像素对的透射率建立联系进行优化校正的效果, 可以发现, 屋檐附近的不可靠透射率区域由于受到多个不同平面的透射率的影响, 并未得到校正.

结构点集合 S 是图像上主边缘像素点集合, 若相邻像素对 (p, q) 中任意一个像素属于 S , 则不将其列入 E_2 项. 本文通过如下方式获得集合 S : 首先, 对输入图像进行零范数滤波^[23], 其具有去除纹理、增大强边缘梯度的效果; 接着使用 Canny 边缘检测方法^[24]对滤波后的图像进行边缘检测, 将边缘像素点加入集合 S . 图 3i, 3j 分别展示了结构点的检测效果以及加入结构点约束后的不可靠透射率的校正效果, 可以发现 3 处屋檐附近的不可靠透射率都已得到了较好的校正.

2.3.4 相似像素透射率关联项

在 E_1 项与 E_2 项的联合约束下, 绝大多数不可靠透射率都得到了有效校正. 然而仅使用 E_1 与 E_2 项进行校正操作仍存在 3 个方面的问题: 1) 在某些复杂结构下, E_2 项中结构点集合无法完全隔离不同平面, 致使部分不可靠透射率校正效果不佳. 例如, 图 3j 右边部分旗杆的内侧为不可靠透射率区域, 结合图 3i 可以发现, 结构点集合未能完全阻隔该区域与相邻的不同平面, 且该区域内的不可靠透射率与相同平面的可靠透射率联系薄弱, 导致最终校正效果不佳. 2) 使用基于暗通道先验的图像去雾方法^[15]得到的透射率图具有块效应, E_2 项只能在块交界处缓解此类效应, 整体效果不大. 3) 仅使用 E_1 与 E_2 项进行优化校正会使某些不可靠透射率像素点无法得到透射率值的估计, 本文将此类像素点称为无估计点. 无估计点分为 2 类: 1) 既是不可靠透射率又是结构点的像素点. 前者不被列入 E_1 项, 后者不被列入 E_2 项, 因此该类像素点无法得到透射率估计. 2) 被结构点集合完全包围的不可靠透射率区域. 由于该区域内的像素点没有被列入 E_1 项, 且在结构点集点集合的作用下, 外界的透射率值无法对其中的透射率估值产生影响, 所以最后得不到透射率估计. 无估计点只能通过相似像素透射率关联项获得透射率的估值. 图 3j 下方及图 3j 偏下出现的黑色小块就是无估计点区域.

为了克服上述 3 个方面的问题, 受远程连接策略^[10]启发, 本文设计了相似像素透射率关联项 E_3 , 在非相邻的像素透射率之间建立联系 $E_3 = \sum_{p \in \Omega} \alpha(t_p - t'_p)^2$. 其中, t_p 为点 p 待计算的透射率值; t'_p 为点 p 远程关联点的透射率; Ω 是所有具有远程关联点的像素点集合; α 为可靠性系数.

本文通过以下方式寻找远程关联点: 对于非无估计点 x , 在以 x 为中心的暗通道块大小的范围内随机取一点, 若取到的随机点是可靠透射率点且与 x 的颜色差异小于阈值 ε , 则将其作为 x 的远程关联点. 随机寻找过程进行 10 次, 一旦找到一个远程关联点则结束该过程, 将点 x 加入集合 Ω , 可靠性系数 $\alpha=1$; 若 10 次尝试之后仍未找到符合要求的远程关联点, 则不将点 x 加入集合 Ω . 对于无估计点 y , 由于其只能通过 E_3 项得到透射率值的估计, 不适宜使用随机搜索; 因此, 本文以 y 为中心在暗通道块大小的范围内逐像素搜索与 y 颜

色差异小于阈值 ε 的可靠透射率像素点, 一旦找到符合要求的像素点则将其作为 y 的远程关联点, 可靠性系数 $\alpha=1$; 否则, 将图像块大小扩大一倍. 若仍然没有符合要求的像素点, 则将块内与 y 颜色差异最小的像素点作为 y 的远程关联点; 此时, 取 $\alpha=1/5$, 所有 y 都加入集合 Ω , 取阈值 $\varepsilon=0.06$. 图 3k 所示为使用 E_1 , E_2 与 E_3 项对 \hat{t} 进行优化校正的效果, 可以发现, 右边旗杆内侧的不可靠透射率得到了较好校正, 图像上方的块效应得到抑制, 同时图像下方黑色的无估计点区域消失.

本文分别取系数 $\zeta_1=1$, $\zeta_2=5$ 和 $\zeta_3=1$. 对式 (2) 求关于像素透射率 t 的偏导数, 并使其等于零, 建立线性方程组. 利用双共轭梯度法迭代求解该方程组可以获得像素透射率的优化结果. 最后, 将预处理后的图像 I_p , 校正后的大气光 A 与优化后的透射率代入式 (1) 进行单幅图像去雾.

3 实验及结果分析

本文算法借助 MATLAB 软件实现, PC 处理器为 Intel® Core™ i5-3337U, 内存 8 GB, 操作系统为 Windows 7.

图 5 所示为本文算法与暗通道先验^[15]和颜色线先验^[10]图像去雾方法之间的效果比较. 可以看出:

实例 1 显示暗通道先验图像去雾效果^[15]树干上下部分的去雾程度不一致, 有失真性, 而颜色线先验图像去雾效果^[10]整体灰暗, 图像左侧的枝条出现严重偏色现象, 本文去雾效果整体明亮, 清晰度和可见度高.

实例 2 显示暗通道先验^[15]与颜色线先验^[10]图像去雾结果中的天空部分相较于输入图像出现偏淡黄色现象. 本文算法通过对大气光进行自适应校正, 恢复得到的天空部分更加明亮, 且没有偏色现象的产生, 整体具有较高的色彩饱和度.

实例 3b 与实例 3c 中天空区域的部分蓝天由于过曝现象而消失, 本文算法得到的天空可以清楚地看到蓝天且色彩饱和度高. 此外, 本文算法经过图像预处理, 近景处的墙面具有更高的亮度与对比度.

实例 4 显示, 本文算法得到的无雾图像在城堡部分具有更好的色彩饱和度与对比度.

图 6 所示为更多的本文算法去雾效果, 可以看出, 本文算法得到的去雾效果具有较高的清晰度、色彩饱和度以及对比度.

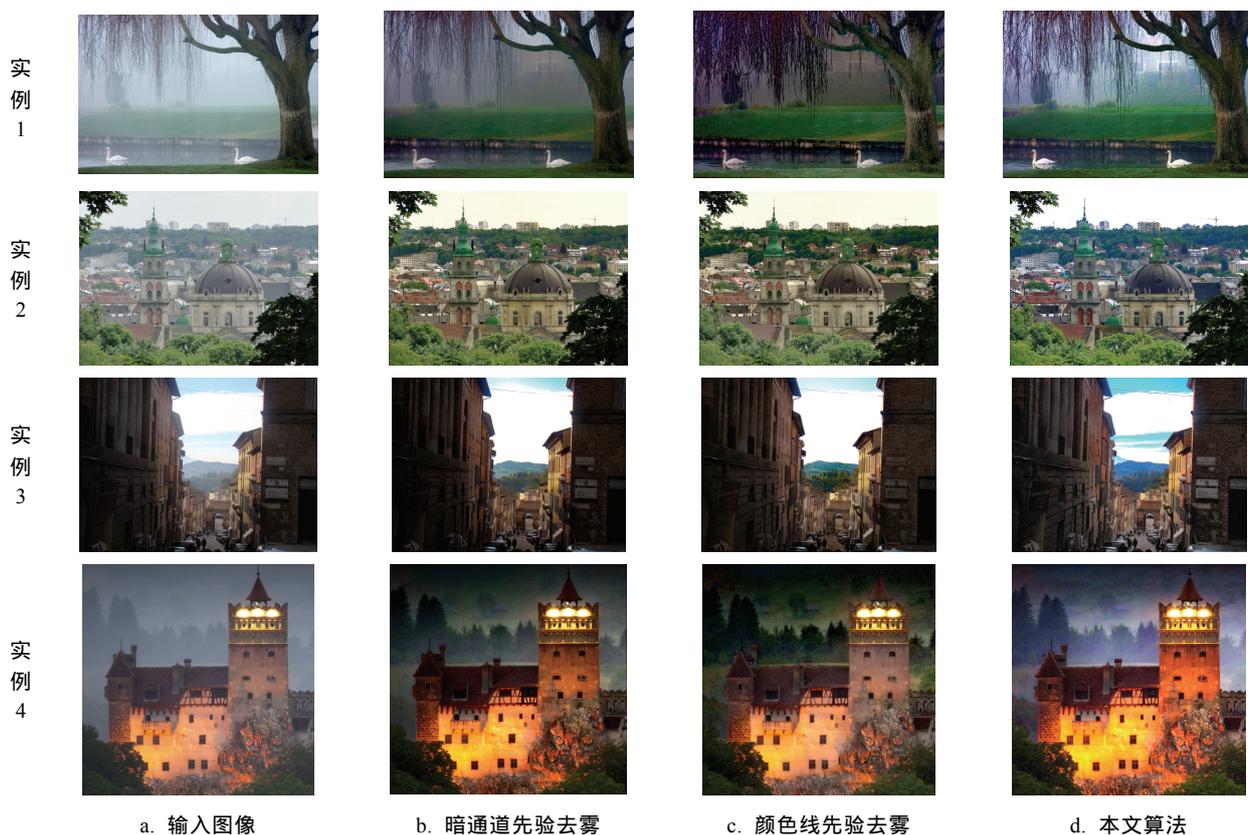


图 5 不同图像去雾方法效果对比图

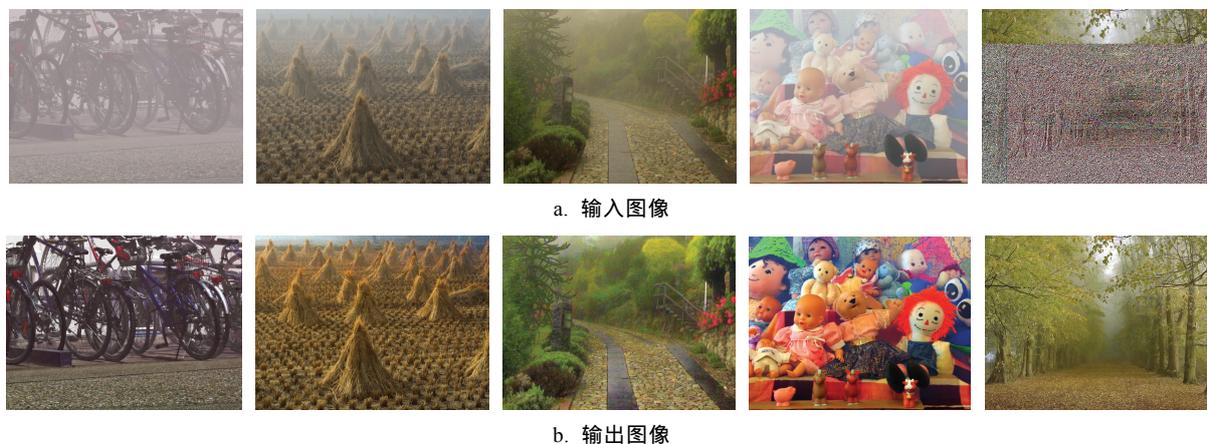


图 6 更多本文算法去雾效果

4 结 语

针对已有单幅图像去雾方法中存在的天空灰暗问题, 本文对估计值过高的大气光进行自适应校正, 避免了复原结果中天空部分的偏色现象, 并使其显得更为明亮; 而且在天地交界处的过渡更为自然. 针对初步估计透射率图中部分透射率不可靠导致的对比度增强不足等问题, 本文从光晕与透射率上下文一致性两方面检测不可靠透射

率, 并在可靠透射率保持项、不可靠透射率插值项以及相似像素透射率关联项的约束下对其进行优化校正. 实验证明, 本文得到的透射率图更为鲁棒.

然而, 文中所采用天空检测方法的准确度会对大气光自适应校正效果产生一定的影响. 另外, 在 Matlab 环境下编写的未经过优化的代码对于一幅大小为 600×400 的输入图像需要大约 10 s 的运行时间. 上述 2 个问题是下一步的重点研究方向.

参考文献(References):

- [1] Narasimhan S G, Nayar S K. Chromatic framework for vision in bad weather[C] //Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2000: 598-605
- [2] Narasimhan S G, Nayar S K. Contrast restoration of weather degraded images[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2003, 25(6): 713-724
- [3] Schechner Y Y, Narasimhan S G, Nayar S K. Instant dehazing of images using polarization[C] //Proceedings of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2001: 325-332
- [4] Shwartz S, Namer E, Schechner Y Y. Blind haze separation[C] //Proceedings of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2006: 1984-1991
- [5] Kopf J, Neubert B, Chen B, *et al.* Deep photo: model-based photograph enhancement and viewing[J]. ACM Transactions on Graphics, 2008, 27(5): Article No.116
- [6] Rahman Z, Jobson D J, Woodell G A. Multi-scale retinex for color image enhancement[C] //Proceedings of the International Conference on Image Processing. Piscataway: IEEE Signal Processing Society Press, 1996, 3: 1003-1006
- [7] Reza A M. Realization of the contrast limited adaptive histogram equalization (CLAHE) for real-time image enhancement[J]. Journal of VLSI Signal Processing Systems for Signal, Image and Video Technology, 2004, 38(1): 35-44
- [8] Tan R T. Visibility in bad weather from a single image[C] //Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2008: 1-8
- [9] Fattal R. Single image dehazing[J]. ACM Transactions on Graphics, 2008, 27(3): Article No.72
- [10] Fattal R. Dehazing using color-lines[J]. ACM Transactions on Graphics, 2014, 34(1): Article No.13
- [11] Xiao C X, Gan J J. Fast image dehazing using guided joint bilateral filter[J]. The Visual Computer, 2012, 28(6): 713-721
- [12] Ancuti C O, Ancuti C. Single image dehazing by multi-scale fusion[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2013, 22(8): 3271-3282
- [13] Gao Y Y, Hu H M, Wang S H, *et al.* A fast image dehazing algorithm based on negative correction[J]. Signal Processing, 2014, 103(C): 380-398
- [14] Zhu Q S, Mai J M, Shao L. A fast single image haze removal algorithm using color attenuation prior[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2015, 24(11): 3522-3533
- [15] He K M, Sun J, Tang X O. Single image haze removal using dark channel prior[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2011, 33(12): 2341-2353
- [16] He K M, Sun J, Tang X O. Guided image filtering[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2013, 35(6): 1397-1409
- [17] Zhao Jinwei, Shen Yiyun, Liu Chunxiao, *et al.* Dark channel prior-based image dehazing with atmospheric light validation and halo elimination[J]. Journal of Image and Graphics, 2016, 21(9): 1221-1228(in Chinese)
(赵锦威, 沈逸云, 刘春晓, 等. 暗通道先验图像去雾的大气光校验和光晕消除[J]. 中国图象图形学报, 2016, 21(9): 1221-1228)
- [18] Liu Xingyun, Dai Shengkui. Halo-free and color-distortion-free algorithm for image dehazing[J]. Journal of Image and Graphics, 2015, 20(11): 1453-1461(in Chinese)
(刘兴云, 戴声奎. 消除 halo 效应和色彩失真的去雾算法[J]. 中国图象图形学报, 2015, 20(11): 1453-1461)
- [19] Li Jiayuan, Hu Qingwu, Ai Mingyao, *et al.* Image haze removal based on sky region detection and dark channel prior[J]. Journal of Image and Graphics, 2015, 20(4): 514-519(in Chinese)
(李加元, 胡庆武, 艾明耀, 等. 结合天空识别和暗通道原理的图像去雾[J]. 中国图象图形学报, 2015, 20(4): 514-519)
- [20] Liu C X, Zhao J W, Shen Y Y, *et al.* Texture filtering based physically plausible image dehazing[J]. The Visual Computer, 2016, 32(6): 911-920
- [21] Cardei V C, Funt B. Committee-based color constancy[C] //Proceedings of the 7th Color and Imaging Conference. Springfield: Society for Imaging Science and Technology Press, 1999: 311-313
- [22] Achanta R, Shaji A, Smith K, *et al.* SLIC superpixels compared to state-of-the-art superpixel methods[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2012, 34(11): 2274-2282
- [23] Xu L, Lu C W, Xu Y, *et al.* Image smoothing via L_0 gradient minimization[J]. ACM Transactions on Graphics, 2011, 30(6): Article No.174
- [24] Canny J. A computational approach to edge detection[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1986, PAMI-8(6): 679-698