

中图法分类号: TP391 文献标志码: A 文章编号: 1006-8961(2012)01-0027-06

论文引用格式: 郭珈, 王孝通, 胡程鹏, 徐晓刚. 基于单幅图像景深和大气散射模型的去雾方法 [J]. 中国图象图形学报, 2012, 17(1): 27-32

基于单幅图像景深和大气散射模型的去雾方法

郭珈¹, 王孝通^{1,2}, 胡程鹏¹, 徐晓刚³

1. 海军大连舰艇学院光电技术研究所, 大连 116018;

2. 海军大连舰艇学院航海系, 大连 116018;

3. 海军大连舰艇学院自动化系, 大连 116018

摘要: 为恢复雾天图像对比度和颜色, 更好地提取图像中的信息, 根据海上开阔海域的特点, 利用 3 维到 2 维透视投影模型, 推导了海上图像任意像素点景深的计算公式, 并结合暗原色先验知识, 有效解决基准景深点的选取和天空亮度的选取问题, 最后基于相对景深模型和大气散射模型, 对单幅雾天图像进行清晰化处理。通过大量雾天降质图像的实验验证, 该算法的去雾效果优于基于暗原色先验统计方法的效果。

关键词: 图像去雾; 基准景深; 暗原色; 天空亮度

Single image dehazing based on scene depth and physical model

Guo Jia¹, Wang Xiaotong^{1,2}, Hu Chengpeng¹, Xu Xiaogang³

1. Institute of Photoelectric Technology, Dalian Naval Academy, Dalian 116018, China;

2. Department of Navigation, Dalian Naval Academy, Dalian 116018, China;

3. Department of Automatization, Dalian Naval Academy, Dalian 116018, China

Abstract: It is important to extract the information from images which have poor contrasts and colors acquired in bad weather. This paper proposes an effective method to remove haze from a single input image. First, focusing on sea images with deep and wide view, the formulas of relative depth are given based on a projection model from 3D to 2D. Then, using the dark channel prior, the sky intensity and reference depth can be obtained more accurate. At last, the degrade images can be recovered by relative scene depths model and atmosphere physical model. Our results demonstrate that our approach performs better than the dark channel prior method.

Key words: image dehazing; reference depth; dark channel prior; sky intensity

0 引言

雾天降质图像的清晰化处理是计算机视觉和图像处理领域的研究热点之一, 在军事、交通和监控等领域得到了应用。图像去雾主要分为基于图像增强和基于大气散射物理模型的方法。前者没有针对雾

天降质图像的形成机理进行补偿, 去雾恢复效果有限; 后者是基于大气散射规律建立图像退化模型, 利用退化的先验知识, 具有内在的优越性, 但需要求得场景深度和大气条件信息。目前主要通过雷达、激光测距仪等精密仪器测量图像的景深^[1-2], 也可利用同一角度降质程度不同的多幅图像^[3-4]和不同角度的多幅图像^[5]求取图像的景深, 这些方法对差

收稿日期: 2011-01-18; 修回日期: 2011-03-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(60975016); 辽宁省自然科学基金项目(20082176); 青年科学基金项目(61002052)

第一作者简介: 郭珈(1983—), 女, 现为海军大连舰艇学院交通信息工程及控制专业博士研究生, 主要研究方向为图像处理、信号分析。E-mail: guojia828@163.com

异图像获取不便,因此无法在实时监控情况下对图像进行处理。2008年,Fattal等人通过假设景物辐射和直接散射独立不相关来估计景物的反射率,还原整幅图像^[6],取得了较好的效果,但不适用对浓雾图像的处理。2009年,He等人提出基于暗原色先验统计的单幅图像去雾方法^[7],为雾天图像的清晰化处理提供了新的途径,但对于天空区域过大、颜色缺少变化及缺少阴影或暗物质的图像去雾效果不好,尤其对海上雾天图像的处理效果不理想。本文根据雾天海上图像特点,推导海上图像任意点景物深度的计算公式,提出基于单幅图像相对景深和大气散射模型的去雾算法,并将其推广到陆上场景图像,取得了良好的去雾效果。

1 雾天图像形成机理

目标光线从景物到接收装置的传播过程中,遇到大气中粒径较大的气溶胶悬浮粒子发生散射,造成雾天图像模糊,其形成模型可描述为

$$E(d, \lambda) = E_0(d, \lambda) e^{-\beta(\lambda)d} + E_{\infty}(d, \lambda) (1 - e^{-\beta(\lambda)d}) \quad (1)$$

式中 E 为观测到的雾天图像的强度, E_0 指晴好天气下景物光线的强度, E_{∞} 为大气光线强度(天空亮度), $E_0(d, \lambda) e^{-\beta(\lambda)d}$ 描述景物光线经透射媒介的衰减结果, $E_{\infty}(d, \lambda) (1 - e^{-\beta(\lambda)d})$ 描述大气光散射造成的影响。图像去雾就是从雾天景物强度 E 中提取晴好天气下的景物强度 E_0 。

2 基于单幅图像的景深模型

海面较为平坦,突兀的物体不多,在海面上到视点 A 景深相同的点构成以 A 点垂足为圆心的圆,如图 1 所示。

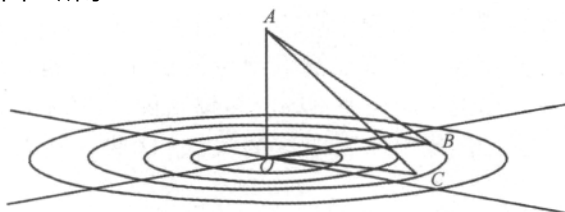


图 1 海面等景深点示意图
Fig. 1 Iso-depth pixels on sea plane

景物投射到平面形成图像是透视投影的过程,通过计算等景深圆在平面上的投影,可以建立海上图像等景深模型。如图 2 所示,俯角为 α ,视角为 β , m 为所取投影面 B 为观察者 A 正前方海面上的一点, C 为 B 在 m 上的投影。在图 3 中, N 为海面上相对于 B 方位角为 θ 的一点, D, F 为 OB, ON 与投影面 m 的交点,根据光学成像原理, N 点在投影面上的投影存在两种情况:投影点位于投影面与海面交线上方,投影点位于投影面与海面交线下方,如图 4、图 5 所示。

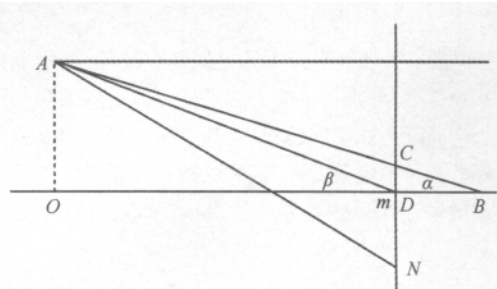


图 2 俯角为 α ($\alpha \neq 0$) 时影像形成原理图
Fig. 2 Projection when the platform angle is α

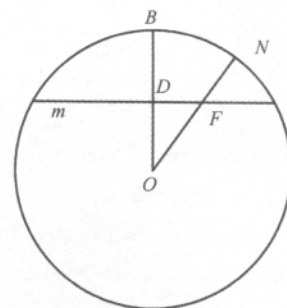


图 3 海面上对应点分布图
Fig. 3 Projection on the sea plane

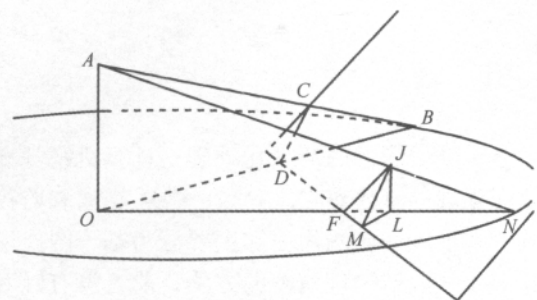


图 4 N 的投影点位于投影面与海面交线上方
Fig. 4 Projection of N above the intersection of projection plane and sea plane

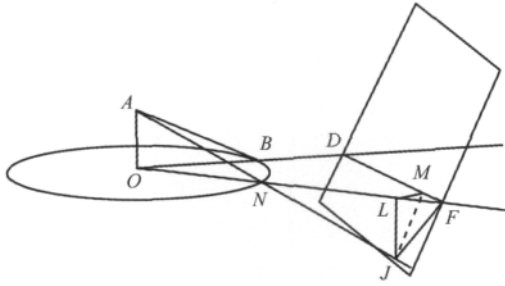


图 5 N 的投影点位于投影面与海面交线下方
Fig. 5 Projection of N under the intersection of projection plane and sea plane

设投影面 m 对应图像的大小为 $M \times N$, J 点坐标为 (m, n) , 由直角三角形性质及投影面与图片上像素点的对应关系, 可以推理得到

$$\begin{cases} \frac{N - 2n}{N} = \frac{\tan \alpha}{\tan \beta} - \frac{H}{(H \tan \alpha + R \cos \theta) (\cos \alpha)^2 \tan \beta} \\ \frac{2m - M}{N} = \frac{R \sin \theta}{(H \tan \alpha + R \cos \theta) \cos \alpha \tan \beta} \end{cases} \quad (2)$$

N 点的方位距离为

$$\begin{cases} \theta = \arctan \left\{ \frac{(2m - M) \cos \alpha \tan \beta}{\left[1 - \sin \alpha \cos \alpha \left(\frac{\tan \alpha}{\tan \beta} - \frac{N - 2n}{N} \right) \tan \beta \right] N} \right\} \\ R = \sqrt{\left(\frac{H}{\left(\frac{\tan \alpha}{\tan \beta} - \frac{N - 2n}{N} \right) \cos^2 \alpha \tan \beta} - H \tan \alpha \right)^2 + \left(\frac{(2m - M) H}{\left(\frac{\tan \alpha}{\tan \beta} - \frac{N - 2n}{N} \right) \cos(\alpha N)} \right)^2} \end{cases} \quad (3)$$

像素点对应的景物深度为

$$D = \sqrt{\left(\frac{H}{\left(\frac{\tan \alpha}{\tan \beta} - \frac{N - 2n}{N} \right) \cos^2 \alpha \tan \beta} - H \tan \alpha \right)^2 + \left(\frac{(2m - M) H}{\left(\frac{\tan \alpha}{\tan \beta} - \frac{N - 2n}{N} \right) \cos(\alpha N)} \right)^2 + H^2} \quad (4)$$

因此, 在任意俯角情况下, 只要测得相机距海面的高度、相机视角及拍摄俯角, 就可由式(3)(4)求得像素点对应海面景物的方位、距离及其景深。

经分析可知, 当 $n = \frac{N}{2} \left(1 - \frac{\tan \alpha}{\tan \beta} \right)$ 时, R 为无穷大; 当 $n < \frac{N}{2} \left(1 - \frac{\tan \alpha}{\tan \beta} \right)$ 时, R 没有物理意义。为了模型的完备性, R 取 $n > \frac{N}{2} \left(1 - \frac{\tan \alpha}{\tan \beta} \right)$ 时的第一个值。

3 基于相对景深和大气散射模型的图像去雾

根据式(1)经典大气散射模型, 可得

$$E_0(\lambda) = E_\infty(\lambda) - (E_\infty(\lambda) - E(d, \lambda)) e^{\beta(\lambda) d} \quad (5)$$

根据暗原色先验统计规律, 在晴好天气下的非天空局部区域内, 总存在某一些像素至少有一个颜色通道具有很低的亮度值, 将像素点 3 个通道的最小值称为该点的暗原色值。经统计得出, 绝大部分的暗

原色值很低甚至趋近于零^[2], 即一幅晴好天气图像至少存在一个暗原色值为零的点。若将其作为基准景深点, 则这一点在暗原色通道颜色的改变可看做雾的叠加作用。由式(5)可得雾对其亮度造成的影响为

$$E_0^{\text{dark}}(\lambda) = E_\infty^{\text{dark}}(\lambda) (1 - e^{\beta(\lambda) d_0}) \quad (6)$$

式中 E_0^{dark} 和 E_∞^{dark} 分别为在暗原色通道的亮度值。整理得到

$$\beta(\lambda) d_0 = -\ln \left(1 - \frac{E_0^{\text{dark}}}{E_\infty^{\text{dark}}} \right) \quad (7)$$

对于任意的景深 d 有

$$\beta(\lambda) d = d \frac{\beta(\lambda) d_0}{d_0} = -\frac{d}{d_0} \ln \left(1 - \frac{E_0^{\text{dark}}}{E_\infty^{\text{dark}}} \right) \quad (8)$$

将式(8)代入式(1), 得到对应于距离 d 的像素值为

$$E_0(\lambda) = E_\infty(\lambda) - \frac{E_\infty(\lambda) - E(d, \lambda)}{\left(1 - \frac{E_0^{\text{dark}}}{E_\infty^{\text{dark}}} \right)^{\frac{d}{d_0}}} \quad (9)$$

由式(9)可知, 只要选定合适的基准景深点, 再通过计算像素点的相对景深, 就可以实现整幅图像的去雾处理。

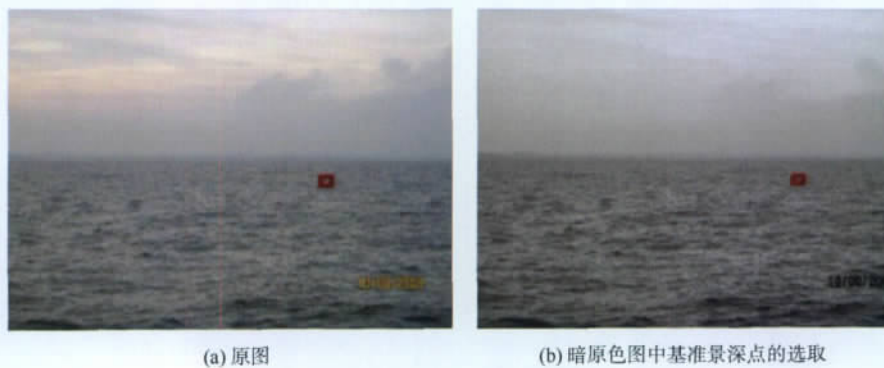
基于暗原色先验的算法不适用于海上图像, 但

海面上总存在着漂浮的暗色物体或由浪花等引起的小块阴影, 其中的像素点满足暗原色先验统计规律, 可选其为基准景深点, 并将该点的亮度值取为 E_0 。具体地, 先求图像每一像素点 3 个颜色通道的最小值, 得到暗原色图, 如图 6(b) 所示, 找到暗原色图上亮度值最小的像素点(图中红色方框标示处的像素点)作为基准景深点, 记亮度值为 E_0^{dark} 。

天空亮度 E_∞ 的求取有多种不同的方法, 文献[4, 6]将景物表面反射率看做 RGB 空间里的向量, 通过 3 维空间几何结构和最优化的方法来估计大气光线的方向和大小。这种方法较为复杂, 同时需要较强的假设条件。文献[8]把图像的亮度最大值作为天空亮度 E_∞ 的值, 这种方法容易出现较大的

误差。如图 7(a) 黄色矩框所示, 虽然亮度最大, 但不是天空区域。借鉴文献[9]确定并分割天空算法的思想, 利用 He 的暗原色思想, 提出估计天空亮度的算法。具体方法如下:

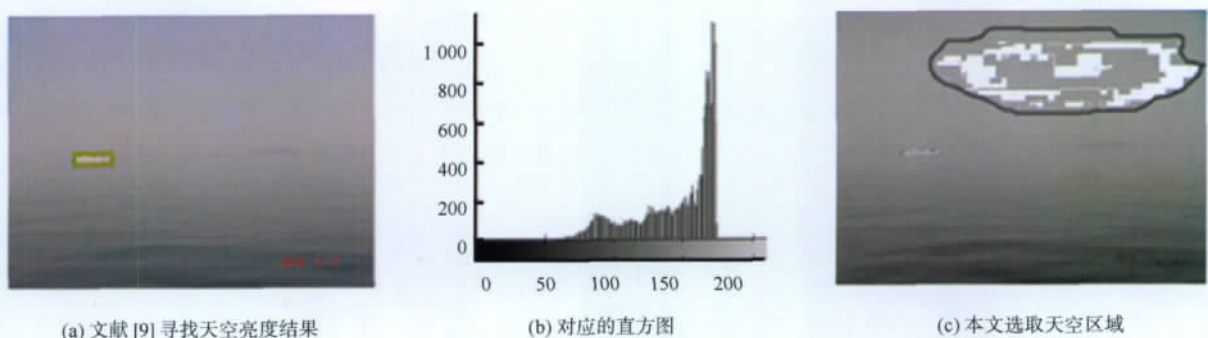
- 1) 求取原图像中每一个像素点 R、G、B 3 个颜色通道上的最小亮度值得到暗原色图像;
- 2) 提取暗原色图的直方图, 如图 7(b) 所示;
- 3) 设定灰度值区间 (s_1, s_2) , 其中 s_1 大于 128, s_2 为 255。寻取介于 (s_1, s_2) 之间的出现频率最大的灰度值(即为 E_∞^{dark}), 其对应像素点即选为天空区域, 图 7(c) 圈定的区域为本文算法所求得天空区域位置。最后, 求原图像中天空区域颜色的平均值, 作为天空亮度值 E_∞ 。



(a) 原图 (b) 暗原色图中基准景深点的选取

图 6 海上雾天图像基准景深点

Fig. 6 The pixel with reference scene depth



(a) 文献[9]寻找天空亮度结果

(b) 对应的直方图

(c) 本文选取天空区域

图 7 确定天空亮度

Fig. 7 Estimate sky intensity

本文算法通过调节 s_1 、 s_2 的值可以改变 E_∞ 的大小^[10], 通过大量的实验证明, 处理后的图像整体亮度会随 E_∞ 的增大而减小, 所以合理地设定求取 E_∞ 的区间可以有效调节图像整体亮度^[11]。

4 算法及应用

根据暗原色先验统计规律, 选定图像的基准景深点和天空亮度, 并通过海上单幅图像景深模型计算相对景深, 结合大气散射模型对雾天影像进行清

晰化处理,其算法步骤如下:

- 1) 求取图像每一像素点 R、G、B 3 个颜色通道的最小值,以此作为该像素点的亮度值,建立暗原色图^[12];
- 2) 在暗原色图上寻求亮度值最小的点,并将该点的灰度值作为基准深度 d_0 处像素点的亮度值 E_0^{dark} ^[13];
- 3) 根据视点高度、视角和俯角,通过景深模型计算图像每一像素点的景物深度 d ;

4) 在步骤 2) 得到的暗原色图上求取天空亮度 E_∞ ^[14];

5) 将求得的 d_0 、 E_0 、 E_∞ 及每一像素点对应的景深 d 带入式(9)^[15],求得每一像素点在晴好天气下的亮度。

通过实验发现,提出的雾天影像清晰化方法不仅适用于海上雾天图像的处理,对于很多场景较为平坦的陆上图像也有效。部分结果图像及参数选取如图 8、图 9 所示。



图 8 海上雾天图像处理结果($\alpha = 0$ $\beta = 45^\circ$ $H = 1\ 000$)

Fig. 8 Haze removal results of sea images



图 9 陆上雾天图像处理结果

Fig. 9 Haze removal results of land images

图 8 是海上浓雾场景,天空区域较大且没有太多暗色表面或阴影,基于暗原色先验统计的算法效果有限,本文算法避免了暗原色值不准导致的色差,其处理效果明显好于基于暗原色先验统计方法的效果。图 9 中场景较为平坦的陆上雾天图像处理效果在颜色保真度上要优于 He 在文献[7]中给出的结果。

5 结 论

根据暗原色先验统计规律,提出图像基准景深点选取方法,并根据海上开阔海域的特点,利用 3 维到 2 维透视投影模型,推导海上单幅图像任意点景深的计算公式,提出单幅图像寻求天空亮度的算法,而且通过设定 E_∞ 的区间可以调节图像整体亮度。在此基础上,推导由相对景深求解大气散射模型的方法,实现了单幅雾天图像的清晰化处理,并推广到场景较为平坦的陆上雾天图像处理。通过大量雾天图像的实验证明,该算法的去雾效果优于基于暗原色先验统计方法的效果。

参考文献(References)

[1] Oakley J P, Satherley B L. Improving image quality in poor visibility conditions using a physical model for contrast

- degradation [J]. IEEE Transactions on Image Processing ,1998 , 7 (2) : 167-170.
- [2] Johannes K , Neubert R , Chen Billy. Deep photo: model-based photograph enhancement and viewing [C] // Siggraph Asia. Singapore: ACM Transactions on Graphics , 2008 , 27(5) : 1-10.
- [3] Narasimhan S G , Nayar S K. Removing weather effects from monochrome images [C] // Proceedings of CVPR. Kauai , Hawaii: IEEE Computer Society , 2001 , 2: 186-193.
- [4] Narasimhan S G , Nayar S K. Chromatic framework for vision in bad weather [C] // Proceedings of IEEE CVPR. South Carolina: IEEE Computer Society , 2000 , 1: 598-605.
- [5] Schechner Y Y , Narasimhan S G , Nayar S K. Instant dehazing of images using polarization [C] // Proceedings of IEEE CVPR. Kauai , Hawaii: IEEE Computer Society , 2001 , 1: 325-332.
- [6] Fattal R. Single image dehazing [C] // ACM Siggraph. Los Angeles: ACM Transactions on Graphics , 2008 , 27(3) : 1-9.
- [7] He K M , Sun J , Zhou X O. Single image haze removal using dark channel prior [C] // Proceedings of IEEE CVPR. Miami , FL: IEEE Computer Society , 2009 , 1: 1956-1963.
- [8] Tan R T. Visibility in bad weather from a single image [C] // Proceedings of IEEE CVPR. Anchorage , Alaska: IEEE Computer Society , 2008 , 1: 1-8.
- [9] Zhu P , Zhu H , Qian X M , et al. An image clearness method for fog [J]. Journal of Image and Graphics , 2004 , 9(1) : 124-128.
- [祝培 , 朱虹 , 钱学明 , 等. 一种有雾天气图像景物影像的清晰化方法 [J]. 中国图象图形学报 , 2004 , 9(1) : 124-128.]
- [10] Qi B J , Wu T , He H G. A New Defogging Method with Nested Windows [C] // Proceedings of ICIECS. Wuhan: Wuhan University , 2009: 1-4.
- [11] Zhou D S , Shao X , Zhu T , et al. Processing method research of color image degraded by fog [J]. Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition) , 2008 , 9(2) : 142-145. [周树道 , 邵啸 , 朱涛 , 等. 薄雾影响下的退化彩色图像处理方法 [J]. 解放军理工大学学报(自然科学版) , 2008 , 9(2) : 142-145.]
- [12] Oakley J P , Bu H. Correction of simple contrast loss in color images [J]. IEEE Transactions on Image Processing , 2007 , 16(2) : 511-522.
- [13] Carr P , Hartley R. Improved single image dehazing using geometry [C] // Digital Image Computing: Techniques and Applications. Washington , DC , USA: IEEE , 2009 , 103-110.
- [14] Chen M Y , Men A D , Fan P , et al. Single image defogging [C] // Proceedings of IC-NIDC. Washington , DC , USA: IEEE Computer Society , 2009: 675-679.
- [15] Preetham A J , Shirley P , Smits B. A practical analytic model for daylight [C] // ACM Siggraph. Los Angeles: ACM Transactions on Graphics , 1999 , 4: 91-100.