

文章编号: 1003-501X(2011)06-0045-05

反射镜拼接渐晕消除方法

陶明慧^{1,2}, 任建岳¹, 张宇¹, 张星祥¹, 李新娥¹

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 根据反射镜拼接型 CCD 相机拍摄影像时发生渐晕的灰度分布特点, 提出了一种基于最速下降法的曲面拟合方法, 以消除渐晕现象。对反射镜渐晕的物理模型进行分析, 通过仿真提出了一种二维曲面模型来拟合图像灰度补偿算法, 推导 Hesse 矩阵的相关系数, 通过 Hesse 矩阵逐次迭代收敛, 最终获得二维曲面的相关参数值。仿真结果表明, 上述方法能够有效估计出不规则二维曲面的相关参数。通过对实际影像的处理结果表明, 本文方法能够有效去除影像的渐晕现象, 改善图像质量, 在测试平台上对有效像素为 782×582 的单面阵 CCD 实验影片进行处理, 程序运行时间为 24 ms, 可见, 本文算法完全满足实际工程需要。由于该方法不需要相关的光学和几何参数, 因此具有广泛的适用性。

关键词: 反射镜拼接; 渐晕; 曲面拟合; 最速下降法

中图分类号: TN216

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1003-501X.2011.06.008

Vignetting Correction Method of Assembled Images Using Reflector

TAO Ming-hui^{1,2}, REN Jian-yue¹, ZHANG Yu¹, ZHANG Xing-xiang¹, LI Xin-e¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: According to the gray distribution character of vignetting image photographed by interleaving assembled CCD camera using reflector, the method of two-dimensional quadrics fitting based on steepest descent method is introduced in this paper to solve the problem. The gray compensation algorithm based on two-dimensional quadrics fitting using matlab simulation is introduced after the analysis of the vignetting physical model of interleaving assembled CCD camera using reflector. Parameters of Hesse matrix are also deduced at the same time. The simulation result has illuminated that the parameters of irregular two-dimensional quadrics, such as vignetting image gray level, can be estimated effectively by this method. The actual processing result shows the vignetting phenomenon can be removed effectively, and consequently the quality of image is improved. We have used the new algorithm to restore 782×582 gray image on the test platform, the programme's running time is 24 ms, so the algorithm can completely meet the practical need of the projects. Since no relative optical and geometrical parameters are needed, this method can be widely used in projects.

Key words: interleaving assembled CCD camera using reflector; vignetting; quadrics fitting; steepest descent method

0 引言

电荷耦合器件(Charge Coupled Devices, CCD)是集光电信号转换、存储和转移输出的图像摄取固体器件, 因其体积小、分辨率高、稳定性好、抗干扰性强、测量误差小等优点被广泛应用到各种成像系统中。航空 CCD 相机^[1]是装载在飞机上以拍摄地表景物来获取地面目标的光学仪器, 航空相机应用的关键指标是分辨率和帧频, 也在向宽成像谱段、大覆盖范围、实时传输的方向不断发展^[1]。但 CCD 器件的有效长度和

收稿日期: 2011-01-19; 收到修改稿日期: 2011-03-14

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目

作者简介: 陶明慧(1985-), 女(汉族), 河南焦作人。博士研究生, 主要研究 CCD 图像采集与处理。E-mail: taominghui0208@163.com。

光学系统较大成像视场之间的矛盾限制了 CCD 在这一领域的应用,对多个 CCD 器件进行拼接是在现有条件下解决这一问题的重要技术。

目前比较常见的 CCD 拼接方式主要有光学拼接与机械拼接两种。光学拼接是利用棱镜的分光原理形成一对光程相等的共轭面,将 CCD 交错分置于这一对等光程的共轭面上,首尾搭接^[2]。光学拼接中的分光棱镜包括半反半透镜、全反全透镜和反射镜,其中反射镜拼接具有能量利用率高,热稳定性好,体积重量小,拼接精度高和拼接长度较长的优势,是未来光学拼接主要的发展方向。但是反射镜拼接的方法在反射镜拼接交界会产生渐晕现象,需要利用后续图像处理工作进行消除。由于目前国内采用反射镜拼接方式进行大面阵拼接的实际应用很少,所以针对反射镜拼接渐晕现象目前没有一套完整的消除办法,是一项很值得研究的课题。

传统的渐晕复原方法需要相关的光学和几何参数,或需要事先进行相关实验以确定渐晕系数,在实际工程中处理效果不好。本文将最速下降法^[3]引入到曲面拟合当中,较好地解决了不规则曲面拟合的问题,从而获得影像的整体灰度变换情况,进而实现影像渐晕复原。与传统方法相比,该方法不需要测量相关的参数,因此具有广泛的适用性。

1 反射镜渐晕产生分析

在实际 CCD 拼接型相机光学系统中,由于反射镜的遮挡,部分光束无法在拼接交界处成像,导致交界处光亮度下降,这种现象就是反射镜拼接造成的渐晕现象。由于反射镜反射边缘与光轴成 45° 夹角,反射点距离接收屏的距离是变化的,所以像面上的渐晕分布也是随着反射镜距离接收屏的距离变化而变化,距离接收屏距离越大,渐晕分布区域越大。直射面 CCD 渐晕现象分布示意图如图 2 所示,反射面 CCD 渐晕现象与此类似。除此之外,直边衍射也是反射镜拼接渐晕的一个原因。

根据临界边缘的衍射能量分配^[4-7],利用 MATLAB 进行公式拟合可以得出反射镜拼接渐晕能量分布图,如图 3 所示。由图 3 可测出最大渐晕临界点位置,反射镜拼接渐晕校正不需将整幅图像进行处理,只需处理最大渐晕临界点以内的图像即可,这就提高了图像处理的效率。

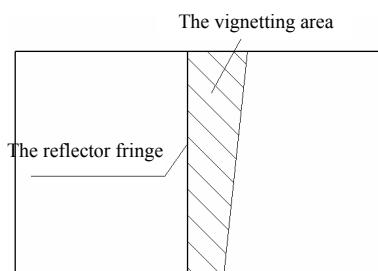


图 2 直射面 CCD 渐晕现象分布示意图

Fig.2 The vignetting distributing in beat surface sketch map

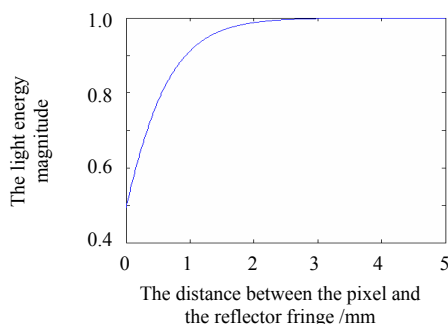


图 3 直射面渐晕能量分布图

Fig.3 Distribution curve of the beat surface vignetting energy

可见,无论是光学还是几何复原方法均有比较严密的理论依据,能够获得准确的渐晕模型,但前提条件是必须了解相机的相关参数,以及拍摄瞬间的运动状态,这在实际工程中是很难实现的。

2 拼接渐晕复原方法

传统的渐晕补偿方法有:查表法,逐行扫描法和函数逼近法。查表法需要事先利用标准影像获取渐晕系数对照表,因此每次拍摄都必须满足相同的条件,不适合工程应用;逐行扫描法利用实际获取的图像数

据进行逐行拟合, 拟合出整幅图片灰度变化的趋势后进行恢复, 当实际图像相邻两行灰度变化较大时, 此方法会产生线性条纹; 函数逼近法是通过多次定标, 对各个照度下单个像元的补偿因子进行标定, 然后将各个像元的补偿因子进行拟合, 得出各个像元的渐晕恢复公式, 与前两种相比, 此方法有一定的优越性^[8-11]。

本文提出基于式(1)的二维曲面拟合图像灰度补偿算法(只对应单片中的渐晕, 对于拼接中的另一片沿水平轴反转曲面即可, 两者对称)。

$$f(x, y) = \tanh(r_x(x - x_0) + r_y(y - y_0)) + c \quad (1)$$

其中: $x' = 1, 2, \dots, m$, $y' = 1, 2, \dots, n$, $m \times n$ 表示图像大小, x, y 是归一化后的像素坐标, $x = \frac{x' - m/2}{m}$, $y = \frac{y' - n/2}{n}$, $-0.5 \leq x \leq 0.5$, $-0.5 \leq y \leq 0.5$ 。 r_x 和 r_y 表示沿图像 x 和 y 轴的衰减率; (x_0, y_0) 表示参考图像亮度中心, 它不一定是图像中心, 它也是归一化后的像素坐标; c 表示常偏移量。只要得到合适的沿 x 和 y 轴的衰减率, 可以用这个公式模拟亮度变化趋势。只要能够得到这 5 个参数, 就可以利用式(1)补偿渐晕临界点以内任意一像素点的灰度值。

文中使用最速下降法估计曲面的参数, 推导 Hesse 矩阵的相关系数, 通过 Hesse 矩阵逐次迭代收敛, 最终获得曲面的相关参数值。仿真实验结果表明, 利用该方法能够获得比较准确的参数估计, 能够满足实际影像渐晕复原的要求。

3 曲面拟合

3.1 算法原理

根据实际渐晕图像退化情况, 利用式(1)的二维曲面对退化图像进行拟合。基于渐晕各向同性的特点, 图像亮度衰减随着各个像素点至图像亮度中心的距离的变化而变化, 但是实际中取得的参考图像亮度中心并不一定等于图像中心。求参数值的过程转化为使目标约束函数式(1)达到最小。

$$F(X) = \sum_{y=1}^n \sum_{x=1}^m [f(x, y) - f_{xy}]^2 \quad (2)$$

其中 f_{xy} 为实测图像的像素值。

由于直接令 F 的梯度等于零, 解方程组 x_0, y_0, r_x, r_y, c 比较复杂, 故本文采用数值方法(最速下降法)来求 F 的极小值, 令 $\varepsilon F^0 = F(X^0)$, $g^0 = g(X^0) = \nabla F(X^0)k = 0$, 则目标函数 $F(x_0, y_0, r_x, r_y, c)$ 在点 x 处的梯度可以表示为

$$g(X) = \nabla F(X) = \left(\frac{\partial F}{\partial x_0}, \frac{\partial F}{\partial y_0}, \frac{\partial F}{\partial r_x}, \frac{\partial F}{\partial r_y}, \frac{\partial F}{\partial c} \right)^T = (g_1, g_2, g_3, g_4, g_5)^T \quad (3)$$

Hesse 矩阵:

$$H(X) = \nabla^2 F(X) = (h_{xy})_{5 \times 5} = \begin{pmatrix} \frac{\partial^2 F}{\partial x_0^2} & \frac{\partial^2 F}{\partial x_0 \partial y_0} & \frac{\partial^2 F}{\partial x_0 \partial r_x} & \frac{\partial^2 F}{\partial x_0 \partial r_y} & \frac{\partial^2 F}{\partial x_0 \partial c} \\ \frac{\partial^2 F}{\partial y_0 \partial x_0} & \frac{\partial^2 F}{\partial y_0^2} & \frac{\partial^2 F}{\partial y_0 \partial r_x} & \frac{\partial^2 F}{\partial y_0 \partial r_y} & \frac{\partial^2 F}{\partial y_0 \partial c} \\ \frac{\partial^2 F}{\partial r_x \partial x_0} & \frac{\partial^2 F}{\partial r_x \partial y_0} & \frac{\partial^2 F}{\partial r_x^2} & \frac{\partial^2 F}{\partial r_x \partial r_y} & \frac{\partial^2 F}{\partial r_x \partial c} \\ \frac{\partial^2 F}{\partial r_y \partial x_0} & \frac{\partial^2 F}{\partial r_y \partial y_0} & \frac{\partial^2 F}{\partial r_y \partial r_x} & \frac{\partial^2 F}{\partial r_y^2} & \frac{\partial^2 F}{\partial r_y \partial c} \\ \frac{\partial^2 F}{\partial c \partial x_0} & \frac{\partial^2 F}{\partial c \partial y_0} & \frac{\partial^2 F}{\partial c \partial r_x} & \frac{\partial^2 F}{\partial c \partial r_y} & \frac{\partial^2 F}{\partial c^2} \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$\sum_{x=1}^m [\tanh(r_x(x - x_0) + r_y(y - y_0)) + c - f_{xy}]^2 \quad (5)$$

由于反正切函数中存在指数函数, 即 e^x 项, 用泰勒级数展开, 则 $e^x = 1 + x + \frac{1}{2!}x^2 + \dots$, 考虑到复杂度

的影响, 算法只取前三项来近似指数函数。

3.2 算法实现

利用本文算法计算 $X = (x_0, y_0, r_x, r_y, c)^T$ 的算法流程如下:

1) 在理论上最速下降法对任意初始值都能收敛, 但如果初始值选取不当, 会导致收敛时间过长。由于在实际应用中满足条件: $-0.5 < x_0 < 0.5, -0.5 < y_0 < 0.5$, 因此 X 的初始值 X^0 可近似选为 $c = \bar{f}_{xy}$, x_0, y_0 取图像中心, $r_x = r_y = \sum_{y=1}^n \sum_{x=1}^m (f_{xy} - \bar{f}_{xy})^2$ 。实验结果表明, 利用上述经验公式给定的初值进行迭代, 收敛时间较短, 通常能够获得较好的估计结果。根据选定的 X^0 及很小的正数 ε (如 $\varepsilon=0.001$), 计算 $F^0 = F(X^0)$, $g^0 = g(X^0) = \nabla F(X^0)$, 令 $k=0$;

2) 计算 $t_k = \frac{(g^k)^T g^k}{(g^k)^T H^k g^k}$, $X^{k+1} = X^k - t_k g(X^k)$, $F^{k+1} = F(X^{k+1})$, $g^{k+1} = g(X^{k+1})$;

3) 如果 $\|g\| = \sqrt{g_1^2 + g_2^2 + g_3^2 + g_4^2 + g_5^2} < \varepsilon$, 则算法结束, 输出 X^k ; 否则, 令 $k = k + 1$, 转到 2)。

根据最速下降法的线性变化收敛特性, 以免结果产生“锯齿现象”^[12], 对约束精度 ε 提出一定的要求, 根据实验结果显示, 当精度达到 0.1 时即可获得较好的参数估计效果, 进一步提高精度对结果影响不大。

4 实验结果

为了验证该方法在实际工程中的有效性, 选用实验室自制的双 CCD 反射镜拼接型相机, 焦距为 180 mm, 像元尺寸为 $8.3 \mu\text{m} \times 8.3 \mu\text{m}$, 单面阵 CCD 有效像素为 782×582 , 图 4 是它拍摄的影像图, 利用上述方法对其渐晕现象进行复原处理。从图中可以看出, 反射镜拼接带来的渐晕现象非常明显, 拼接缝隙处的像元明显较暗, 其灰度变化情况如图 5 所示。

使用本文提出的曲面拟合方法对图 4 进行处理, 利用最速下降法对相关参数进行估计, 得到本系统的二维拟合曲面公式为

$$f(x, y) = \tanh(0.297(x - 0.556) + 0.112(y - 0.098)) + 0.5 \quad (6)$$



图 4 未经复原的外场成像图

Fig.4 The image without image restoration

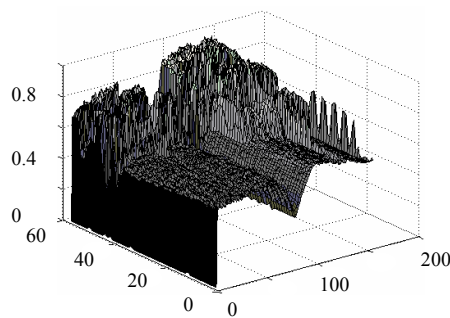


图 5 原始渐晕影像的灰度分布图

Fig.5 Gray distribution of the image without image restoration

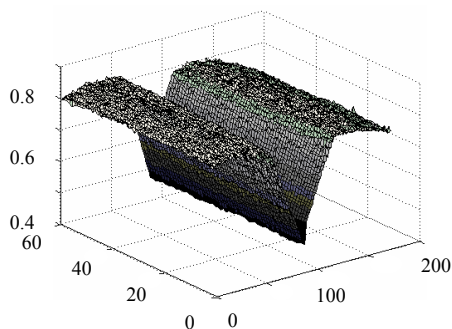


图 6 二维曲面拟合结果

Fig.6 Gray distribution of two-dimensional quadrics fitting image

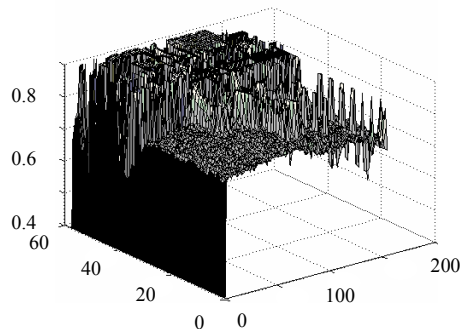


图 7 曲面拟合纠正后的影像灰度分布图

Fig.7 Gray distribution of the image after image restoration

曲面如图 6 所示。图像恢复后的灰度分布图如图 7 所示, 从图中可以看出, 影像灰度整体分布已近均匀, 本方法很好地消除了反射镜拼接中的渐晕现象, 效果图如图 8 所示。



图 8 基于曲面拟合方法获取的影像复原图

Fig.8 The outfield image after eliminating the vignetting

实验使用 GPU 通用计算技术, 实验测试平台的 GPU 为 GeForce 8800GTS(显存 500M), CPU 是 P4 主频 3.0 GHz, 内存为 1G。测试程序在 VC6.0 SP6 环境下编译完成, 程序共开辟了 2 048 个并行线程。在测试平台上对本实验影片进行处理, 程序运行时间为 24 ms, 可见, 本文算法完全满足实际工程需要。

5 结 论

将最速下降法引入到二维曲面拟合当中, 可以获得影像灰度的整体变化趋势, 从而有效实现影像渐晕现象的复原。通过对实际影像进行处理, 证明了该方法在实际工程中的有效性。

该方法简单方便、便于实现, 处理效果也比较理想, 与传统方法相比, 不需要相机及拍摄时的相关参数, 因此具有广泛的适用性。

本文方法稍加改变, 即可用于其它不规则曲面的参数估计, 只需根据不同曲面表达式重新计算 Hesse 矩阵即可。除此之外, 相关公式的进一步简化也能够进一步提高运算速度, 因此具有较好的通用性。

参考文献:

- [1] 毛洁娜, 于龙, 林莹莹. 无人机遥感应用及红外载荷研究[J]. 红外, 2007, **28**(2): 32-35.
MAO Jie-na, YU Long, LING Ying-ying. Research on remote sensing application and infrared payload of UAV [J]. **Infrared**, 2007, **28**(2): 32-35.
- [2] 雷华, 徐之海, 冯华君, 等. 光学拼接成像系统[J]. 仪器仪表学报, 2010, **31**(6): 1213-1217.
LEI Hua, XU Zhi-hai, FENG Hua-jun, *et al.* Optical butting system [J]. **Chinese Journal of Scientific Instrument**, 2010, **31**(6): 1213-1217.
- [3] 龙建辉, 胡锡炎, 张磊. 最速下降法解二次矩阵方程[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2008, **35**(4): 85-88.
LONG Jian-hui, HU Xi-yan, ZHANG Lei. The Steepest Descent Method for the Quadratic Matrix Equation [J]. **Machinery Journal of Hunan University: Natural Sciences**, 2008, **35**(4): 85-88.
- [4] 郝道银, 谈恒英. 工程光学第二版[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
YU Dao-yin, TAN Heng-ying. **Engineering Optics Second Edition** [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2006.
- [5] 钱晓凡, 胡涛, 张晔. 基于 MATLAB 的衍射场模拟计算[J]. 昆明理工大学学报: 理工版, 2004, **29**(3): 132-135.
QIAN Xiao-fan, HU Tao, ZHANG Ye. On Simulated Calculation of Diffraction Based on MATLAB [J]. **Journal of Kunming University of Science and Technology: Science and Technology**, 2004, **29**(3): 132-135.
- [6] 祁建霞, 董军, 苗润才. 利用改进型衍射理论对直边衍射效应的解释[J]. 光子学报, 2007, **36**(增): 91-94.
QI Jian-xia, DONG Jun, MIAO Run-cai. Study of Diffraction Effect from the Straight Edge by Means of Modified Theory Optics Method [J]. **ACTA PHOTONICA SINICA**, 2007, **36**(sup1): 91-94.

(下转第 58 页)

7733: 7733401-77334012.

- [11] Sridharan R, Raja Bayanna A, Louis Rohan Eugene, *et al.* An image stabilization system for solar observations [J]. **Proc. of SPIE(S0277-786X)**, 2007, **6689**: 66890Z 1-66890Z 10.
- [12] Sedghi B, Müller M, Erm T, *et al.* Main axes control of E-ELT [J]. **Proc. of SPIE(S0277-786X)**, 2010, **7733**: 77331G1-77331G12.
- [13] Bauvir Sedghi B, Dimmler M. Acceleration feedback control on an AT [J]. **Proc. of SPIE(S0277-786X)**, 2008, **7012**: 70121Q1-70121Q12.
- [14] Thompson Peter M, MacMynowski Douglas G, SirotaMark Mark J. Analysis of the TMT Mount Control System [J]. **Proc. of SPIE(S0277-786X)**, 2008, **7012**: 70121P-70121P14P.
- [15] 高钟毓. 机电控制工程 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2002: 43-187.
GAO Zhong-yu. **Control engineering about machine and electricity** [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002: 43-187.
- [16] 刘金琨. 先进 PID 控制及其 MATLAB 仿真 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2003: 263-278.
LIU Jin-kun. **Advanced PID control and MATLAB simulation** [M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2003: 263-278.

~~~~~  
( 上接第 49 页 )

- [7] 王志坚, 刘冬梅, 付跃刚. 光学工程基础[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2005.  
WANG Zhi-jian, LIU Dong-mei, FU Yue-gang. **Optical Engineering Fundamentals** [M]. Beijing: Weapon Industry Press, 2005.
- [8] 李炜, 黄心汉, 王敏, 等. 基于二维高斯曲面拟合的图像灰度补偿算法[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2004, **32**(2): 43-45.  
LI Wei, HUANG Xin-han, WANG Min, *et al.* A compensation algorithm of image based On Gaussian quadrics fitting [J]. **Journal of Huazhong University of Science and Technology: Nature Science Edition**, 2004, **32**(2): 43-45.
- [9] 何凯, 唐平凡, 王成优. 基于高斯曲面拟合的影像渐晕复原方法[J]. 电子学报, 2009, **37**(1): 67-71.  
HE Kai, TANG Ping-fan, WANG Chen-you. Vignetting correction method of image based on gaussian quadrics fitting [J]. **Acta electronica sinica**, 2009, **37**(1): 67-71.
- [10] Yuanjie Zheng, Lin S, Kambhamettu C, *et al.* Single-Image Vignetting Correction correction [J]. **IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence(S0162-8828)**, 2009, **31**(12): 2243-2247.
- [11] Seon Joo Kim, Pollefeys M. Robust Radiometric Calibration and Vignetting Correction [J]. **IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence(S0162-8828)**, 2008, **30**(4): 562-565.
- [12] 程光权, 成礼智. 基于小波的方向自适应图像插值[J]. 电子与信息学报, 2009, **31**(2): 265-269.  
CHENG Guang-quan, CHEN Li-zhi. Direction Adaptive Image Interpolation via Wavelet Transform [J]. **Journal of Electronics & Information Technology**, 2009, **31**(2): 265-269.