

基于退化模型的图像渐晕处理技术

陶明慧^{1,2}, 张宇¹, 张星祥¹, 任建岳¹, 李亚鹏^{1,2}

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 针对反射镜拼接光学系统中的图像渐晕问题进行讨论, 从几何光学角度分析了反射镜遮挡导致的部分光线无法在像面上成像出现的能量损失问题, 对渐晕能量分布进行了定量分析。根据分析结果, 提出了一种适合反射镜拼接渐晕的退化模型, 采用最速下降法进行模型参数的求解, 推导了 Hesse 矩阵的相关参数, 较好地解决了不规则曲面拟合的问题, 进而实现了拼接渐晕的处理。实验结果表明: 文中方法能够有效地估计退化模型的相关参数, 处理后图像的信噪比提高了至少 15 dB, 有效地去除了拼接带来的渐晕失真, 且达到实时应用的要求, 具有广泛的应用价值。

关键词: 渐晕处理; 反射镜拼接; 渐晕能量分布; 退化模型; 最速下降法

中图分类号: TP75 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)08-2262-07

Vignetting correction technology of images based on degenerate model

Tao Minghui^{1,2}, Zhang Yu¹, Zhang Xingxiang¹, Ren Jianyue¹, Li Yapeng^{1,2}

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

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

Abstract: Topic of the paper was to correct the vignetting of mosaic images based on reflector. The generation mechanism of the vignetting phenomenon was analyzed through geometrical optics, and the vignetting energy distribution model in the middle of the optical field was proposed. According to the analysis result, a degenerate model which was calculated by the steepest descent method was proposed. The parameters of Hesse matrix were deduced to solve the problem of irregular quadrics fitting, then to correct the vignetting. The experiment result illuminates that the parameters of the degenerate model can be estimated effectively, the image's SNR after correction can be increased by 15 dB, and the vignetting can be removed effectively. The method can work in real-time working mode, and has extensive application value.

Key words: vignetting correction; mosaic images based on reflector; vignetting distribution energy model; degenerate model; steepest descent method

收稿日期: 2012-12-15; 修订日期: 2013-03-14

基金项目: 国家 863 计划(863-2-5-1-13B)

作者简介: 陶明慧(1985-), 女, 博士生, 主要从事空间遥感相机成像系统设计及图像处理方面的研究。

Email: taominghui0208@163.com

导师简介: 任建岳(1952-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事空间相机光机电一体化设计方面的研究。Email: reny@sohu.com

0 引言

随着遥感相机不断向着分辨率越来越高、覆盖范围越来越广、越来越轻量化和小型化的方向发展^[1],单 CCD 的成像系统已经不能满足这样的要求,所以各种 CCD 拼接型相机不断出现。CCD 的拼接方式分为机械式和光学式^[2],机械式应用较早,技术上比较成熟,是过去遥感相机领域主要采用的拼接方式,但是它对 CCD 的要求高、成本高、机械结构笨重,而且无法完全实现无缝拼接,光学式能够弥补机械式的缺陷,已经成为目前 CCD 拼接技术研究的重点。

光学式拼接方法使用的分光棱镜主要包括平行光板、半反半透镜和反射镜,其中反射镜拼接法具有能量利用率高、无色差、温度敏感性好、体积重量小、拼接长度长等优势,使它成为未来光学拼接的主要发展方向^[3],但是反射镜拼接法在图像的拼接中心会产生渐晕失真现象,需要利用后续图像处理工作进行消除。目前研究反射镜拼接法的学者很多,比如说 Kaneko^[4]、雷华^[5]等人提出的金字塔反射镜结构,Rubin^[6]等人提出的阶梯式棱镜结构,但是并没有看到有实际应用的报导,看来目前反射镜拼接的渐晕现象还没有给出满意的解决办法,是一项很值得研究的问题。

传统的渐晕处理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,增加了实际工程应用的难度。文中针对反射镜拼接法的渐晕现象进行了详细的理论分析,推导出了渐晕的能量分布表达式,以此为依据提出了一种适合它的退化模型,采用最速下降法对模型参数进行求解,得到实际图像的整体灰度变换情况,进而实现了拼接渐晕的处理,与传统方法相比,该方法不需要相关的参数,对反射镜拼接法在遥感相机中的应用具有指导意义。

1 反射镜光学拼接系统结构

如图 1 所示,反射镜光学拼接系统中的反射镜放置于两片 CCD 所在平面所形成的立方体结构的对角面上,入射光线与反射镜成 45° 。一部分入射光线经过反射镜的反射后投影到像面 CCD1 上,另一部分光线直接照射到成像面 CCD2 上。像面 CCD1

和 CCD2 是光程相等的两个共轭面,当这两片 CCD 的边界像元满足对齐精度、搭接精度和共面精度^[7]的要求时,系统就能产生一幅完整连续的图像,成像视场扩大为原来的两倍。

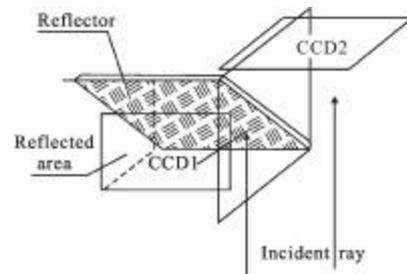


图 1 反射镜拼接原理

Fig.1 Reflector joint schematic

2 反射镜光学拼接的渐晕分析

对于反射镜光学拼接系统而言,反射面 CCD1 和直射面 CCD2 成像过程相对独立,所以将这两个成像面作为两个子系统分别进行研究,反射镜均是这两个子系统的光阑,限制部分轴外光束无法在像面上成像。

如图 2 所示为反射面 CCD1 上的渐晕产生示意图。对于无穷远处的点 B 和点 C 来说,经过光学系统后,光路应汇聚到反射面像点 B' 和 C' 上。但由于光路中反射镜的存在,对于点 C 来说,有一部分光线没有办法经过反射镜的反射投影到反射面上的 C' 点,这部分光损失掉了,对应于图中就是 α 角度内的光线损失掉了,在图像上反映为 C' 点的灰度值偏暗。对于 B 点而言,所有的光线都能经过反射镜反射汇聚于 B' 点, B' 点没有渐晕现象,对应图中反射面上距离拼接中心点 L 的范围内都存在 C 点的情况,所以 L 是最大渐晕区域。当反射镜的位置与反射面所

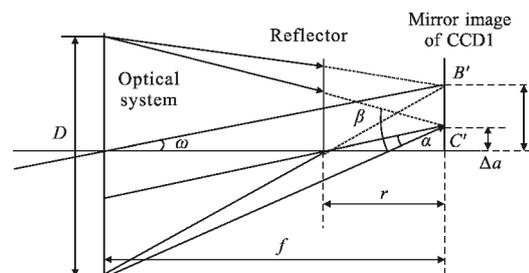


图 2 反射面 CCD1 渐晕产生示意图

Fig.2 Sketah map of the reflecting surface CCD's vignetting

在平面的位置固定时,可以根据几何关系得到:对于视场角大于 ω 的所有的光线都能通过反射镜汇聚到对应的反射面 CCD1 上,没有能量损失,所以也可以认为视场角大于 ω 的所有点没有渐晕。图中 D 为光学系统口径、 f 为光学系统焦距、 r 为反射镜到像面的距离、 Δa 为像面上渐晕点距离视场中心的距离。

根据余弦定理推导后得到:

$$\cos\alpha = \frac{\frac{f^2}{r^2}(\Delta a^2+r^2)+f^2+\left(\Delta a+\frac{D}{2}\right)^2 - \left[\frac{D}{2}-\frac{\Delta a}{r}(f-r)\right]}{2\sqrt{\frac{f^2}{r^2}\Delta a^2+r^2}\sqrt{f^2+\left(\Delta a+\frac{D}{2}\right)^2}} \quad (1)$$

$$\cos\beta = \frac{f^2+\left(\frac{D}{2}-\Delta a\right)^2+f^2+\left(\frac{D}{2}+\Delta a\right)^2-D^2}{2\sqrt{f^2+\left(\frac{D}{2}-\Delta a\right)^2}\sqrt{f^2+\left(\frac{D}{2}+\Delta a\right)^2}} \quad (2)$$

对于反射面 CCD1 上的成像点 C' 来说, C' 点原本接受的能量应为整个光学系统的能量,但是由于 α 角内的能量没有被反射镜反射到达 C' 点,所以对应的点 C' 实际获得的能量仅为整个光学系统能量(β 角所对应面积能量)与 α 角所对应面积能量的差值,图 3 所示为整个通光孔的能量与阴影区能量的比值。假设使用整个通光孔的面积 S_β 代表它的能量,则:

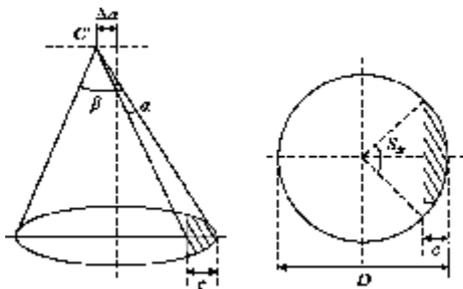


图 3 渐晕区域光能量分配示意图

Fig.3 Sketah map of the vignetting area's light energy

$$S_\beta = \frac{\pi}{2} \left(\frac{D}{2}\right)^2 \quad (3)$$

阴影区的面积 S_α 为:

$$S_\alpha = S_{\text{扇}} - S_{\text{三角}} \quad (4)$$

反射镜拼接系统中的渐晕系数 t 为:

$$t = \frac{S_\alpha}{S_\beta} = \left\{ \frac{D^2}{8} \arccos\left[\frac{2\Delta a(f-r)}{rD}\right] - \frac{\Delta a(f-r)}{r} \sqrt{\frac{D^2}{4} - \left[\frac{\Delta a(f-r)}{r}\right]^2} \right\} / \left(\frac{\pi D^2}{8}\right) \quad (5)$$

最大渐晕区域 L 为:

$$L = \frac{rD}{2(f-r)} \quad (6)$$

设 E 为无限远处发光点能量, E' 为成像点 C' 所能接受到的能量,则:

$$E' : E = S_\beta : S_\alpha$$

$$E' = E \left\{ \frac{D^2}{8} \arccos\left[\frac{2\Delta a(f-r)}{rD}\right] - \frac{\Delta a(f-r)}{r} \sqrt{\frac{D^2}{4} - \left[\frac{\Delta a(f-r)}{r}\right]^2} \right\} / \left(\frac{\pi D^2}{8}\right) \quad (7)$$

公式(7)即为反射面 CCD1 上渐晕区域内任一点的渐晕能量分布。直射面 CCD2 上的渐晕分布推导过程同上,这里不再赘述。

图 4 为对公式(7)仿真出来的反射镜拼接系统中某两行的渐晕能量分布,图中横轴表示距离拼接中心的距离,纵轴表示渐晕能量,图中使用浅色的“+”表示的曲线比使用深色“·”表示的曲线的 r 值要大,可见红色曲线的渐晕区域比蓝色曲线渐晕区域大,这是因为反射镜拼接中反射镜的反射面与入射光轴成 45° 夹角,反射点距离接收屏的距离是变化的,也就是 r 的变化,所以像面上渐晕的分布也是随反射镜距离接收屏的距离而变化,距离接收屏越远、 r 越大,渐晕分布区域也越大,即 L 也越大。

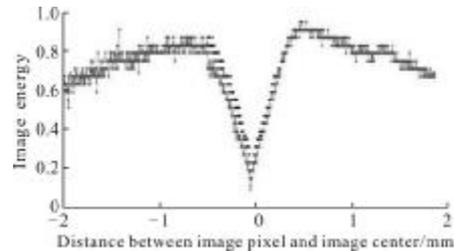


图 4 渐晕仿真示意图

Fig.4 Emulational map of the vignetting

3 反射镜拼接系统的渐晕处理

3.1 退化模型的提出

在三角函数、幂函数、指数函数和对数函数中进行搜索,目的是找到与图 4 相似的函数图形,最终发现如图 5 所示的四个函数性质上比较接近,它们分别是:

$$f(x, y) = \frac{1}{3} x^{\frac{2}{3}}, -5 \leq x \leq 5, -5 \leq y \leq 5;$$

$$f(x, y) = \frac{1}{5.5} [\operatorname{arcsinh}(x)]^2, -5 \leq x \leq 5, -5 \leq y \leq 5;$$

$$f(x, y) = \frac{1}{2.5} [\arcsin(xy)]^2, -5 \leq x \leq 5, 1 \leq y \leq 11;$$

$$f(x, y) = [\tanh(xy)]^2, -5 \leq x \leq 5, 1 \leq y \leq 11。$$

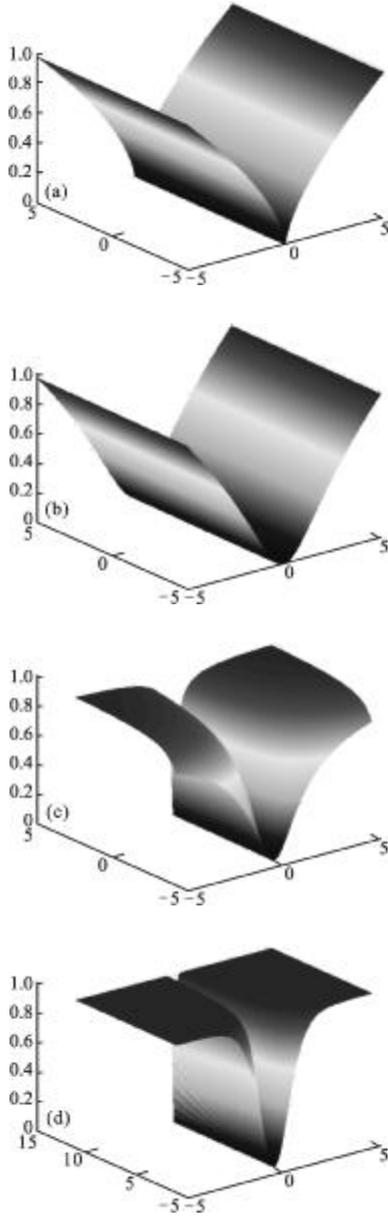


图 5 函数三维示意图

Fig.5 Three-dimensional maps of the functions

从视觉效果来看,图 5(d)与反射镜光学拼接系统的渐晕能量分布最相近。下面使用标准差来衡量上述四个函数与渐晕能量分布函数的近似程度,分别取上述四个函数在 y 等于中间值(图像中心)时的一维曲线,再分别进行 100 点采样,计算这四条曲线与系统成像面中间行曲线的相似程度。

标准差计算表达式^[8]为:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\delta_1^2 + \delta_2^2 + \dots + \delta_n^2}{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \delta_i^2}{n}} \quad (8)$$

式中: n 为采样点数(至少大于 30),这里是 100; δ_i 为采样值与真实值之差。

分别在这四个函数中取距图像中心($y=0$ 或 $y=6$)距离分别为 2, -2, 4, -4 的四条等间隔曲线,分别进行 100 点采样,如图 6 所示,并与成像面上对应位置上的 4 条 100 点采样曲线分别进行相似度计算,结果如表 1 所示。

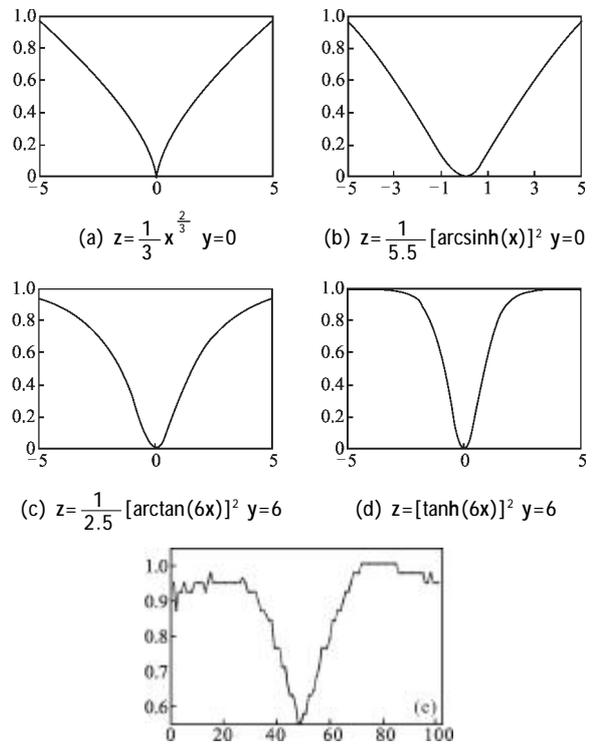


图 6 像面中心行采样点曲线

Fig.6 Sampling curve of image centre

表 1 标准差对比

Tab.1 Comparison of standard deviation

Standard deviation	$f(x,y) = \frac{1}{3} x^{\frac{2}{3}}$	$f(x,y) = \frac{1}{5.5} [\arcsinh(x)]^2$	$f(x,y) = \frac{1}{2.5} [\arctan(xy)]^2$	$f(x,y) = [\tanh(xy)]^2$
Curve $y=0$ or $y=6$	0.350 3	0.469 9	0.339 2	0.210 3
Curve $y=2$ or $y=8$	0.369 1	0.476 3	0.345 1	0.220 1
Curve $y=-2$ or $y=4$	0.341 6	0.462 1	0.336 5	0.207 6
Curve $y=4$ or $y=10$	0.376 9	0.491 1	0.352 3	0.212 6
Curve $y=-4$ or $y=2$	0.339 5	0.453 6	0.329 9	0.206 5

就误差度而言, $f(x, y)=[\tanh(xy)]^2$ 与实际渐晕能量分布最接近。从上文的分析中可知, 反射镜光学拼接系统造成的渐晕现象, 渐晕区域随反射镜距离成像面的距离不同而不同, 距离成像面距离越大, 渐晕区域越长, 图 7 为 $f(x, y)=[\tanh(xy)]^2$ 三维示意图的侧视图和俯视图, 从图中可见该函数能够体现出这一变化。

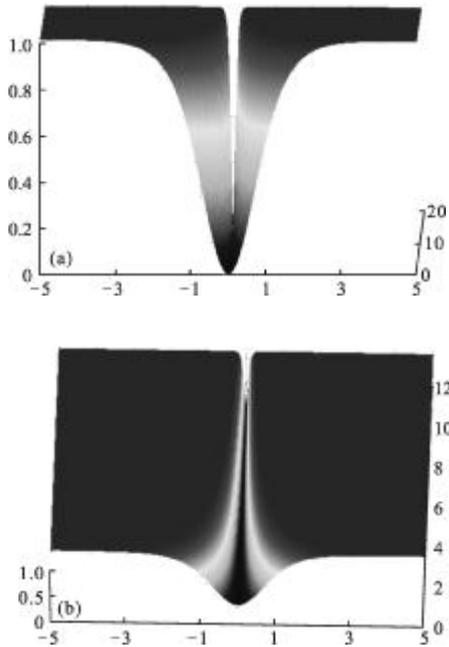


图 7 函数 5(d) 三维示意图的侧视图和俯视图
Fig.7 Side elevation and planform of Fig.5(d)

所以, 函数 $f(x, y)=[\tanh(xy)]^2$ 最适合模拟反射镜光学拼接系统的渐晕现象, 与实际情况结合后, 文中提出如公式(9)所示的函数表示基于反射镜的光学拼接系统的渐晕退化模型。

$$f(x, y)=[\tanh(r_x(x-x_0)y)]^2+c \quad (9)$$

其中, $m \times n$ 为图像的大小; r_x 表示图像沿 x 轴的衰减率; (x_0, y_0) 表示参考图像亮度中心; c 表示图像亮度偏置, 是一个常数。式中 (x, y) 是转化后的像素坐标, 其中 $-5 \leq x \leq 5, 1 \leq y \leq 11$; 只要得到合适的沿 x 轴的衰减率, 就可以用这个公式来模拟渐晕图像的亮度变化趋势。只要能够得到 (x_0, r_x, c) 这 3 个参数, 就可以对渐晕图像进行补偿, 由于针对于反射镜光学拼接系统, 它的图像亮度中心就是图像的中心, 所以取 $x_0=0$, 这样需要求解的参数就只剩下 (r_x, c) 这两个参数了。

3.2 退化模型参数的求解

求解参数值的过程转化为使目标约束函数(公式(10)所示)达到最小的过程, 其中 f_{xy} 为实测图像。

$$F(X)=\sum_{y=1}^n \sum_{x=1}^m [f(x, y)-f_{xy}]^2 \quad (10)$$

如果直接求解 $F(X)$ 的梯度, 令其等于零, 解方程组得到 (r_x, c) 会特别复杂, 所以文中采用最速下降法来进行求解。求解过程如下:

令 $\varepsilon F^0=F(X^0), g^0=g(X^0)=\nabla F(X^0)k=0$ 则目标函数 $F(r_x, c)$ 在点 X 处的梯度可以表示为:

$$g(X)=\nabla F(X)=\left(\frac{\partial F}{\partial r_x}, \frac{\partial F}{\partial c}\right)^T=(g_1, g_2)^T \quad (11)$$

$\tanh(x)=\frac{e^x-e^{-x}}{e^x+e^{-x}}$, 它的泰勒展开表达式为:

$$\tanh(x)=x-\frac{x^3}{3}+\frac{2x^5}{15}-\frac{17x^7}{315}+\dots=\sum_{n=0}^{\infty} \frac{2^{2n}(2^{2n}-1)B_{2n}x^{2n-1}}{(2n)!} \quad (12)$$

考虑到复杂度的影响, 为了减少计算量, 这里只取前两项来近似 $\tanh(x)$ 的值, 此时公式(12)转化为:

$$f(x, y)=r_x^3 x^3 y^3 - \frac{2}{3} r_x^4 x^4 y^4 + \frac{r_x^6 x^6 y^6}{9} + c \quad (13)$$

省去高次项, 继续简化, 最终公式(13)转化为:

$$F(X)=\sum_{y=1}^n \sum_{x=1}^m \left[r_x^3 x^3 y^3 - \frac{2}{3} r_x^4 x^4 y^4 + c - f_{xy} \right]^2 \quad (14)$$

Hesse 矩阵表达式为:

$$H(X)=\nabla^2 F(X)=(h_{xy})_{2 \times 2}=\begin{bmatrix} \frac{\partial^2 F}{\partial r_x^2} & \frac{\partial^2 F}{\partial r_x \partial c} \\ \frac{\partial^2 F}{\partial c \partial r_x} & \frac{\partial^2 F}{\partial c^2} \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$g_1=2 \sum_{y=1}^n \sum_{x=1}^m \left[r_x^3 x^3 y^3 - \frac{2}{3} r_x^4 x^4 y^4 + c - f_{xy} \right] \cdot \left(3r_x^2 x^3 y^3 - \frac{8}{3} r_x^3 x^4 y^4 \right) \quad (16)$$

$$g_2=2 \sum_{y=1}^n \sum_{x=1}^m \left[r_x^3 x^3 y^3 - \frac{2}{3} r_x^4 x^4 y^4 + c - f_{xy} \right] \quad (17)$$

$$h_{11}=2 \sum_{y=1}^n \sum_{x=1}^m \left\{ \left(3r_x^2 x^3 y^3 - \frac{8}{3} r_x^3 x^4 y^4 \right)^2 + \left[r_x^3 x^3 y^3 - \frac{2}{3} r_x^4 x^4 y^4 + c - f_{xy} \right] \left(6r_x x^3 y^3 - 8r_x^2 x^4 y^4 \right) \right\} \quad (18)$$

$$h_{12}=2 \sum_{y=1}^n \sum_{x=1}^m \left(3r_x^2 x^3 y^3 - \frac{8}{3} r_x^3 x^4 y^4 \right) = h_{21} \quad (19)$$

$$h_{22}=2mn \quad (20)$$

算法流程图如图 8 所示。

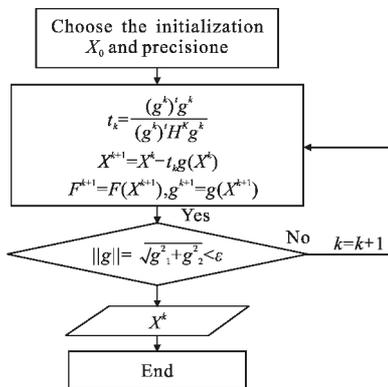


图 8 最速下降法算法流程图

Fig.8 Arithmetic flow chart of steepest descent method

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,文中经过反复计算,最后发现选用初始值为: $c = \overline{f_{xy}}$, $r_x = \sum_{y=1}^n \sum_{x=1}^m (f_{xy} - \overline{f_{xy}})^2$ 时,算法的收敛速度最快。

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”,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^[9]。

3.3 渐晕处理结果

得到退化模型之后,根据退化模型对渐晕图像进行纠正,文中采用的方法是将原图像按照一定比例减去退化模型,再将图像亮度提高到适当的亮度。为了验证该方法在实际工程中的有效性,选取作者所在实验室研制的基于反射镜的双面阵 CCD KAI-2093 成像系统所拍摄的实验图片,利用上述方法进行渐晕处理,如图 9 中(a)、(b)所示分别为室内定标图和室外成像实验图。图像拼接中心处的灰度明显低于其他部分的灰度,能够直观地反映反射镜拼接渐晕对图像质量的影响。



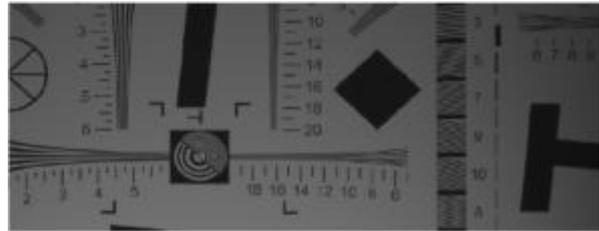
(a) 室内定标图片

(a) Indoor image before eliminating the vignetting



(b) 外场实验图

(b) Outfield image before eliminating the vignetting



(c) 渐晕消除后室内定标图片

(c) Indoor image after eliminating the vignetting



(d) 渐晕消除后外场实验图

(d) Outfield image after eliminating the vignetting

图 9 渐晕处理实验

Fig.9 Experimentation of eliminating the vignetting

采用文中算法得到它们的退化模型分别为:

$$f(x, y) = (\tanh(2.592xy))^2 + 0.208 \quad (21)$$

$$f(x, y) = (\tanh(2.374xy))^2 + 0.722 \quad (22)$$

渐晕校正后的图像分别如图 9(c)、(d)所示。

3.4 实验结果分析

对于图像恢复的效果,除了人眼在主观上给予对分辨率的评价外,还可以通过图像质量评价的参数进行客观的比较,文中采用图像信噪比(SNR)和无参考评价指标下的灰度平均梯度(GMG)、拉普拉斯算子和(LS)来对补偿后的图像进行评价。SNR、GMG、LS 值越大表示图像越清晰,图像质量越好^[10],选取拼接图像中心区域进行计算,结果如表 2 所示。

可见采用文中提出的基于退化模型的渐晕处理方法处理后图像的 GMG 和 LS 值均有很大程度提

高,图像的信噪比提高了至少 15 dB,处理后的图像灰度分布均匀,效果理想。

表 2 信噪比对比

Tab.2 Comparison of SNR

	Fig.9(a)	Fig.9(c)	Fig.9(b)	Fig.9(d)
SNR/dB	12.79	27.34	13.23	28.67
GMG	4.542	7.462	4.911	7.636
LS	15.557	29.820	19.839	31.790

实验使用 GPU 通用计算技术,实验测试平台的 GPU 为 GeForce8800GTS(显存 500M),CPU 是 P4 主频 3.0G,内存为 2G。测试程序在 VC6.0 SP6 环境下编译完成,程序共开辟了 2048 个并行线程。在测试平台上对实验照片进行处理,程序运行时间均小于 30 ms,对于成像系统 30 F/s 的帧频而言,完全满足实时应用的要求,可见,文中算法可在实际工作平台进行应用。

4 结 论

反射镜光学拼接方法在遥感相机中的应用前景是非常可观的,但是拼接带来的渐晕现象并没有给出灵活有效的处理方法。针对目前常规的渐晕处理方法都依赖于相关的光学、几何参数,以及需要大量的实验为基础的情况,文中针对反射镜光学拼接系统的结构进行了详细的分析,推导出了拼接渐晕的能量分布,以此为依据提出了一种适合拼接渐晕的退化模型。

针对曲面拟合过程难度大和计算量大的特点,引入最速下降法求解退化模型的相关参数,从而获得了图像灰度的整体变化趋势,最终实现了渐晕的处理。通过对实际图像的处理证明了该方法在实际工程中的有效性,该方法便于实现,处理后图像的信噪比提高了至少 15 dB,与传统方法相比更具有广泛的适用性。

文中方法稍加改变,就可以用来处理多片(大于 2 片)基于反射镜的面阵 CCD 拼接渐晕问题,另外相关公式的进一步简化也能够进一步提高速度,具有较好的通用性。

参考文献:

[1] Li Yapeng, He Bin. Quantitative evaluation of image quality

of CCD subpixel imaging using MTF[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(2): 443-448. (in Chinese)

李亚鹏,何斌.采用 MTF 定量评估 CCD 错位成像的成像质量[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(2): 443-448.

[2] Zhang Xingxiang, Ren Jianyue. Mechanical interleaving assembly of TDICCD focal plane [J]. *Acta Optical Sinica*, 2006, 26(5): 740-745. (in Chinese)

张星祥,任建岳. TDICCD 焦平面的机械交错拼接 [J]. *光学学报*, 2006, 26(5): 740-745.

[3] Chen Shiping. Design and Experiment of Space Camera[M]. Beijing: Chinese Aerospace Press, 2003. (in Chinese)

陈世平.空间相机设计与试验 [M].北京:中国宇航出版社,2003.

[4] Kaneko Y, Saitoh M, Hamaguchi I, et al. Image forming apparatus for forming image corresponding to subject, by dividing optical image corresponding to the subject into plural adjacent optical image parts: US, Patent 5, 194, 959 [P]. 1993-03-16.

[5] Lei Hua. Research on an seamless optical butting technology based on pyramid reflector [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010. (in Chinese)

雷华.基于金字塔反射镜的视场无缝拼接技术研究[D].杭州:浙江大学,2010.

[6] Rubin, Leoind Borisovich Moseow S L, Viktor Vladimirovich Moseow S R, et al. Optical system for partitioning a real image: US, Patent 5: 835,278[P]. 1993.

[7] Ma Wenli, Ye Baozhu, Zou Dechun. High accuracy optical focal plane assembling of ten pieces of plane array CCD[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 1994, 21(5): 17-22. (in Chinese)

马文礼,叶宝珠,邹德春.高精度 10 片面阵 CCD 光学焦平面拼接[J]. *光电工程*, 1994, 21(5): 17-22.

[8] Sun Wei, Wang Zhijian. Fuzzy edge detection based on standard deviation gradient [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2005, 34(4): 454-458. (in Chinese)

孙伟,王志坚.基于标准差梯度的模糊边缘检测算法[J]. *红外与激光工程*, 2005, 34(4): 454-458.

[9] He Kai, Tang Pingfan, Wang Chengyou. Vignetting correction method of image based on Guassian quardrics fitting [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2009, 37(1): 67-71. (in Chinese)

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.

[10] Zhu Kongfeng, Jiang Wei, Wang Duanfang, et al. New kind of clarity-evaluation-function of image [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2005, 34(4): 464-468. (in Chinese)