

文章编号 1004-924X(2012)07-1559-07

利用 CCD 拼接实现推扫式遥感相机的自动调焦

卢振华^{1,2}, 郭永飞^{1*}, 李云飞¹, 吕恒毅¹

- (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 研究生院, 北京 100039)

摘要: 根据空间推扫式遥感相机 CCD 的拼接结构, 提出了利用 CCD 重叠区域的图像指导自动调焦的方法。首先, 介绍了空间推扫式遥感相机的 CCD 拼接结构; 根据推扫式成像的特点, 利用具有并行处理数据能力的现场可编程门阵列 (FPGA) 同时接收多个 CCD 重叠成像区域的图像数据, 并计算图像质量评价值。然后, 选取图像质量评价值最大的 3 个重叠区域作为表决调焦方向的依据。最后, 通过实验分析说明了本方法的可行性。试验中, 相机的推扫频率为 10 kHz 时, 调焦一步的时间为 0.2 s, 表明本文的调焦方法具有较好的实时性。提出的方法为空间推扫式遥感相机的在轨自动调焦提供了可行依据。

关键词: 空间推扫式遥感相机; CCD 拼接; 自动调焦; 现场可编程门阵列; 并行处理

中图分类号: V443.5 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20122007.1559

Realization of auto-focus on APRC using CCD stitching

LU Zhen-hua^{1,2}, GUO Yong-fei^{1*}, LI Yun-fei, LÜ Heng-yi

- (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 100039, China)*
- * *Corresponding author, E-mail: guoyf@ciomp.ac.cn*

Abstract: According to the stitching structure of CCDs in an Aerial Push-broom Remote-sensing Camera (APRC), an auto-focus method by using the image from the CCD overlapped sections was proposed. Firstly, the structure of CCD in the APRC was introduced. Based on the pushing-broom imaging characteristics, a Field Programming Gate Array (FPGA) which can process data in parallel model was used to receive the image data from multi-CCD overlapped sections and calculate the evaluation values of image quality at the same time. Then, three kinds of the CCD overlapped sections with the biggest evaluation values of image quality were selected as the gist for determining the focus direction. Finally, the feasibility of the method proposed was validated by an experiment. In the experiment, when the push-broom frequency is 10 kHz, the time for one focus step is 0.2 s, which illuminates that the proposed focusing method has good real-time ability, and it can offer a feasible gist for the on-track focus in the APRC.

收稿日期: 2012-03-05; 修订日期: 2012-05-17.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 61036015)

Key words: Aerial Push-broom Remote-sensing Camera (APRC); CCD stitching; auto-focus; Field Programming Gate Array (FPGA); parallel process

1 引言

空间光学遥感相机(以下简称遥感相机)的成像平台是卫星。受到卫星发射过程以及在轨运行时环境变化的影响,遥感相机的焦平面会产生一定的偏差,从而导致成像质量下降^[1-2]。为保证空间遥感相机的成像质量,多数遥感相机都具备调焦机构。目前,国内空间遥感相机自动调焦的发展相对落后,还处于研发阶段^[2-6];国外空间遥感相机的自动调焦多采用图像处理法和增加光机结构的方法^[7-8]。

随着电子技术的迅速发展,基于图像处理的自动调焦方法由于结构简单,智能程度高,在普通数码相机中得到了广泛的应用。基于图像处理的自动调焦方法的关键是要建立检焦函数,并计算图像质量评价函数值来指导自动调焦过程^[9-10]。目前大多数图像质量评价函数都要求图像基于同一个景物,而推扫式遥感相机的成像方式决定其不可能从同一片 CCD 中获得基于同一景物的 2 次图像,这给基于数字图像处理的自动调焦方法在推扫式遥感相机中的应用带来困难。

随着遥感技术的发展,遥感相机不仅分辨率不断提高,成像覆盖范围也在不断扩大。现有的 CCD 器件尺寸已经远远不能满足大焦面遥感相机的要求,因此必须要用多片 CCD 拼接的技术来满足这一要求^[11]。为保证 CCD 间的图像拼接质量,在 CCD 的拼接结构中,相邻的 CCD 之间会留有一定的重叠区域。利用这些重叠区域可以获得基于同一景物的 2 次图像。本文利用 CCD 重叠区域的图像,提出了实现推扫式遥感相机自动调焦的方法,并且利用现场可编程门阵列(FPGA)实时实现了该方法,最后通过实验验证了方法的可行性。

2 利用 CCD 重叠成像区域的自动调焦方法

2.1 CCD 拼接结构及重叠区域的成像特点

CCD 拼接技术已经广泛应用于遥感相机。

目前常见的 CCD 拼接方式可以分为 2 种,即光学拼接和机械拼接。光学拼接需要引入分光棱镜,因此有色差、能量分散等缺点。而交错机械拼接的方式简单,又不受分光棱镜加工长度、胶合长度约束条件的限制,适用于各种形式的光学系统,得到了较多的应用^[11-12]。图 1 是基于交错机械拼接的 CCD 排列方法。

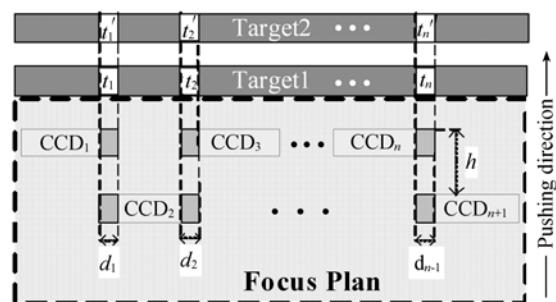


图 1 CCD 拼接结构示意图
Fig. 1 Structure of CCD stitching

如图 1 所示,遥感相机的焦面上是一个由 $n+1$ 片 CCD 组成的阵列。阵列中 CCD 分成 2 排,排与排之间相邻的 CCD 都保留了一定的重叠区 d_n 。每个重叠区域内一般有 100 个以上的 CCD 像元尺寸宽度,两排 CCD 间的距离 h 决定了重叠区域的长度。利用这种拼接结构,CCD 重叠区域可以对目标景物进行 2 次成像。当相机向前推扫成像时,首先由前排 CCD($n=1, 3 \cdots n$)的重叠区域对目标景物 t_n 成像,经过 ΔT (如 1 式) 时间后后排 CCD($n=2, 4 \cdots n+1$) 的重叠区域对目标景物 t_n 再次成像。

$$\Delta T = \frac{h}{u} \times \frac{1}{f}, \quad (1)$$

其中: u 为 CCD 像元尺寸, f 为相机的推扫频率。

在保证各片 CCD 成像响应均匀一致时,利用这些 CCD 的重叠区域的图像可以保证各片 CCD 成像后的图像拼接质量^[13];同时也为推扫式遥感相机利用图像实现自动调焦提供了可能。

2.2 基于 CCD 重叠成像区域的自动调焦方法

从上一节的介绍可以看出,在推扫式遥感相机成像过程中,从 2 排 CCD 的重叠区域可以得到

基于同一目标景物的图像。但是不同于静止成像的数码相机,推扫式遥感相机从 CCD 的重叠区域也只能得到基于同一景物的 2 次成像。因此,其自动调焦方法与普通面阵数码相机的也不相同,过程如下:

如图 1 所示,当由 2 排 CCD 的重叠区域 d_n 对前面的目标景物 t_n 成像时,先由前排 CCD 对其推扫成像,并利用检焦函数,根据前排 CCD 的重叠区域所得的图像,计算图像质量评价价值并记为 M_1 ,其中 M 表示图像的清晰度,并在准确对焦位置取最大值。之后进行一步试探调焦动作,并规定试探调焦动作方向为正,其相反方向为负;前排 CCD 开始成像之后,经过时间 ΔT ,后排 CCD 的重叠区域成像范围到达 t_n ,并对 t_n 第二次成像。之后利用检焦函数,再次计算 t_n 图像的质量评价价值 M_2 ;比较 M_1 和 M_2 的大小:如果 $M_2 > M_1$ 说明试探调焦方向正确,继续沿正方向向前一步调焦;如果 $M_2 < M_1$ 则说明试探调焦方向错误,应向负方向进行一步调焦,回到原点。在后排 CCD 开始对目标景物 1 成像的同时,前排 CCD 开始对目标景物 2 成像,并计算图像质量评价价值 M_3 ,如果试探调焦方向正确,则当后排 CCD 的重叠区域对目标景物 2 成像完成并再次计算出其图像质量评价价值 M_4 后,比较 M_4 、 M_3 的大小:如果 $M_4 < M_3$ 说明已经调焦过头,则在上一步调焦相反的方向上进行一步调焦,回到上一步起点。如果调焦动作连续 2 次回到上一步起点,则说明已经到达准确对焦位置,结束调焦过程;如果 $M_4 > M_3$ 则继续往正方向调焦,并比较前后两排 CCD 的重叠区域的成像质量 M 。至到调焦动作前后,图像质量评价价值 M 变小,则往相反方向执行一步调焦动作,回到上一步起点。并且当调焦动作连续两次回到上一步起点时,调焦过程结束。在上述过程中,如果试探调焦方向错误,则利用上面的方法向相反方向调焦,直到调焦结束。

通过上面的过程分析可以看出,调焦动作的周期是 ΔT ,即前后两排 CCD 先后对同一景物成像的时间间隔。该时间间隔较短,调焦动作频率较高,能够保证较好的实时性。但同时决定该调焦方法能否实现的关键是在每一个 ΔT 时间内必须完成以下 3 个过程: T_1 :接收 2 排 CCD 的重叠区域的图像。 T_2 :完成对图像质量评价价值的计算,比较前后 2 次的评价价值并给出调焦指令。

T_3 :执行一次调焦动作。即:

$$T_1 + T_2 + T_3 < \Delta T. \quad (2)$$

3 检焦过程的实现方法

3.1 检焦算法及其实现

在 2.2 节中所述的调焦过程中:过程 T_1 的时间由相机的推扫行周期及接收图像的行数决定;过程 T_2 的时间由检焦算法的复杂程度决定;过程 T_3 的时间由电机的响应频率决定。完成过程 T_1 、 T_3 所需要的时间相对固定,而且较容易满足要求。而过程 2 相对复杂,耗时最多。因此在保证精度的同时,找到一种快速的检焦算法及其实现方式提高过程 T_2 的效率,是实现本文调焦方法的关键。由 2.1 节可知,遥感相机的焦平面上有 $n+1$ 片 CCD 时,就有 n 个重叠区域。要同时接收 n 个重叠区域的图像并且实时计算图像质量评价价值,具有并行处理能力的 FPGA 是最好的选择。所以,本文采用计算过程相对简单,但灵敏度较高的灰度梯度平方函数作为检焦函数(式 3)^[14-15]。通过式(3)可看出,其计算过程中只有乘法和加法的累加,算法简单且重复性强,适合于用 FPGA 实现。

$$F(k) = \sum_{i=1}^m \sum_j^n \{ |g(i,j) - (i-1,j)|^2 + |g(i,j) - g(i,j-1)|^2 \}, \quad (3)$$

其中: $g(i,j)$ 表示图像 (i,j) 点的灰度值, k 表示离焦量, m 、 n 表示图像的长度和宽度。遥感相机越接近准确对焦位置,所拍摄的图像具有越高的对比度,高频成分含量越多,由式(3)计算得出的图像质量评价价值 M 就越大;相反随着离焦程度的增加,函数值 M 变小。根据这一关系,本文用 $F(k)$ 的函数值 M 的大小来指导自动调焦过程。

为了满足 2.2 节中对 T_2 的要求,将图像接收、检焦函数 $F(k)$ 的计算以及调焦决策过程都通过 FPGA 并行实现,其过程如图 2 所示。

图 2 中,虚线内部是 FPGA 中设计的各个功能模块示意图。通过 FPGA 同时接收 $n+1$ 片 CCD 的拼接区域的图像数据。利用 FPGA 内部的存储单元开辟出 $n+1$ 个双端口 RAM 缓存区,暂存接收到的图像数据,并同时用于计算图像质量评价价值。利用上述方法,从接收到第二行图像数据开始就可以实现接收图像数据和计算图像质

量评价值 2 个过程同时进行。图中的 $n+1$ 个计算模块,对应着 $n+1$ 片 CCD,用于同时计算 $2n$ 个图像质量评价价值。由 CCD 的拼接方式可以看出,CCD 阵列中除了位于两端的 CCD_1 和 CCD_{n+1} 只有一个重叠区域外,中间的每片 CCD 都具有两个重叠区域。所以 $Calculation_1$ 和 $Calculation_{n+1}$ 中只有一个计算单元,其余的计算模块中分别包含 2 个计算单元,总共 $2n$ 个计算单元。各个计算模块计算出一次图像质量评价价值后,立即将结果送到下一步的比较模块。其中基于相同重叠区域的 2 个计算结果输出到同一个比较模块中,但是前排 CCD 的计算结果要延迟 ΔT 后输出,以保证 M 、 M' 基于同一景物,如图 2 中所示。最后由决策模块给出调焦动作指令,执行一步调焦动作。

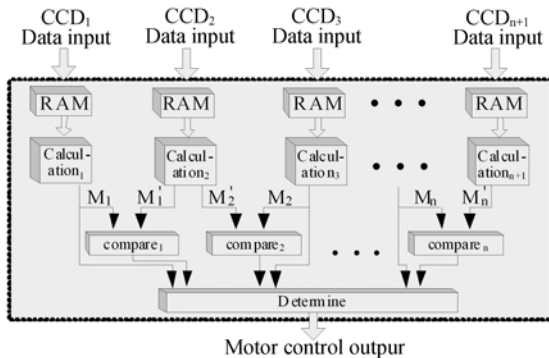


图 2 检焦函数在 FPGA 内部实现过程

Fig. 2 Focus-examining function realization in FPGA

利用以上方法, T_2 过程的图像质量评价函数的计算过程提前到和接收图像数据同时进行。 T_2 只包括比较图像质量评价价值和调焦方向的决策 2 个过程的时间,大大缩短了 T_2 ,保证了调焦方法的实现,同时也满足了实时性要求。

3.2 调焦动作的决策

推扫式遥感相机的成像覆盖范围非常大,同一对焦状态下,景物纹理的丰富程度往往相差较大。由于采用的检焦函数(公式 3)依赖于图像的高频含量,所以同一对焦状态下的各个重叠区域的图像质量评价价值会有较大差别。图像纹理越丰富(即高频含量多)的区域(城市,建筑等)图像质量评价价值较大,检焦函数灵敏度高,有利于调焦;相反图像的纹理少(即高频含量少)的区域(比如海面、沙漠等)则图像质量评价价值小,检焦函数灵敏度低,可靠性差,不利于调焦^[16]。因此,在调焦动作之前先从 $n(n>3)$ 个重叠区域的图像质量评

价值中选出最大的 3 个,然后用这 3 个评价价值的表决结果作为调焦依据。

具体实现过程为:利用如图 2 中的 Determine 模块,从由前排 CCD 重叠区的图像数据计算得出的 n 个 M 值中选出 3 个最大的。再在 n 个比较器中选择与其相对应的 3 个,根据这 3 个比较器的结果确定本次调焦动作的方向。即 3 个比较器的结果中如果有 2 个或者 2 个以上的比较结果为 $M > M'$,则确定本次调焦方向跟上次调焦方向相同;相反,如果有 2 个或者 2 个以上的比较结果为 $M < M'$,则本次调焦方向与上次调焦方向相反。

在以上方法中,仍然采用各个比较模块以及重叠区域的选择过程并行的方法,节省了时间。这种选择最有利于调焦的重叠区域的图像作为调焦依据的方法,提高了调焦的准确性。最后采用三选二的容错方式,有效地减小调焦陷入局部极值的可能性,进一步提高了调焦的可靠性。

4 实验分析

4.1 实验平台及可行性分析

如第 2.2 节所述,调焦方法能否实现的关键为在 ΔT 时间内能否完成一步调焦所需的 3 个过程。为了验证本文提出的调焦方法,在实验室中进行了具体的实验。实验平台如图 3 所示,是一个以 FPGA 和 LVDS 接收芯片为核心的试验板。其中 FPGA 为 Xilinx 公司 Virtex-II 系列的 XC2VP40,该款 FPGA 具有 3.5MB 内部 RAM,4 万多个 Cells,400 多个 I/O 管脚,并且其管脚开关频率最高可达 400 M,足以满足本实验要求;LVDS 接收芯片采用管脚频率可达 300 M 的 SN65LVDS32D。

具体实验过程如下:如图 3 所示,试验板上具有 8 个 CCD 图像接收端口。根据 CCD 的拼接结构可知,8 片 CCD 就会拼接出 7 个重叠区域。在试验中利用这 8 个图像接收端口从样机中接收图像数据。利用第 3 节的方法,在 FPGA 中计算 7 个重叠区域中图像的质量评价价值,并选出图像质量评价价值最大的 3 个区域的图像作为调焦动作的依据。最终通过控制端口将调焦指令输出给电机控制模块,执行调焦动作。以下是对 ΔT 内各步所需时间的具体分析:

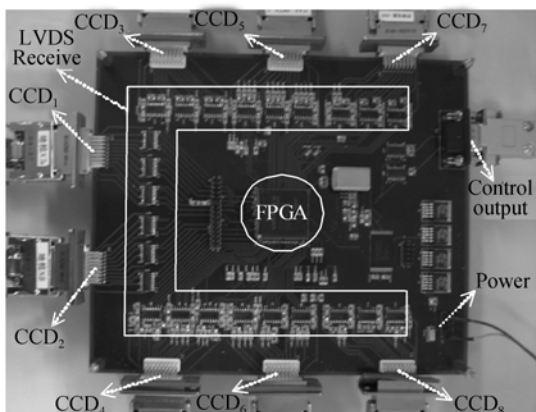


图 3 自动调焦试验板

Fig. 3 Experiment board for auto-focusing

假设相机的推扫频率为 10 kHz, 2 排 CCD 的距离 h 为 2 cm, CCD 的像元尺寸 u 为 $10 \mu\text{m}$, 则由式(1)计算得出, 前后两排 CCD 的重叠区域分别对同一景物成像的时间间隔 ΔT 为 0.2 s。

实验中从重叠区域获取的图像大小为 200 pixel \times 100 pixel, 所以接收图像的时间为 200 个推扫行周期。由相机推扫频率可知, T_1 为 0.02 s。根据第 3.1 节, T_2 只包括比较图像质量评价价值和调焦方向的决策 2 个过程的时间。试验中用于执行比较模块和决策模块的时钟频率为 50 MHz。由于 T_2 中的各个模块也是采用并行的方式同时进行, 所以该部分只需要很少的时钟周期, 可以忽略不记。试验中采用步进电机执行调焦动作, 其频率为 10 Hz。所以一步调焦动作的时间 T_3 为 0.1 s。

根据以上分析, 调焦一步中的 3 个过程所需要的时间之和, 即 $T_1 + T_2 + T_3 \approx 0.12 \text{ s}$, 小于 ΔT , 所以该调焦方法完全可以实现。由于每步调焦动作结束后还剩余约 0.08 s, 可用于缓冲电机动作引起的震动, 保证了成像质量。

4.2 调焦数据及结果分析

在实验过程中, 其中一次调焦过程的每一步调焦动作的图像质量评价数据如表 1 所示:

表 1 中每一步的 M 和 M' 分别是调焦动作前后的图像质量评价, 调焦步距为 0.02 mm。通过表中数据可以看出, 同一个对焦状态下, 由不同的重叠区域的图像计算得出的图像质量评价相差较大。特别是在接近准确对焦位置时, 其最大值与最小值相差甚至达到上百倍。但是本文中每

一步中只选择最大的 3 组数据(加粗)作为表上一步调焦方向是否正确, 以及确定下一步调焦方向的依据。从表 1 可以看出, 调焦过程中第 6 步和第 8 步调焦动作前后的图像质量评价变小, 这说明可能已经调焦过头。所以下一步应该向相反方向调焦, 所以第 7 和第 9 步都是回到了上一步的起点位置。根据此调焦方法, 有连续 2 次调焦动作回到上一步起点时可以确认调焦结束, 所以本次实验调焦步数为 9 步, 调焦时间为 1.8 s。

表 1 图像质量评价实验数据

Tab. 1 Experiment data of image quality evaluation

Step	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	d_6	d_7
1	M 17.89	17.78	0.90	0.76	0.82	18.28	18.13
	M 29.11	23.80	1.04	0.87	0.98	27.47	28.36
2	M 32.70	31.83	1.01	0.92	1.77	25.72	22.54
	M 67.95	55.13	1.48	1.48	2.65	58.30	60.78
3	M 59.95	68.91	1.92	1.51	11.07	64.58	46.51
	M 182.2	168.4	5.29	5.22	32.22	217.0	204.7
4	M 155.5	162.9	4.17	4.04	80.11	232.1	188.3
	M 281.3	248.5	9.02	9.06	134.9	457.7	448.4
5	M 171.4	123.9	6.61	26.43	186.3	439.9	481.5
	M 285.8	193.5	12.28	40.67	478.3	803.1	955.4
6	M 208.7	178.6	405.4	113.5	2 052	1 812	2 260
	M 104.5	93.23	208.6	66.48	946.6	760.9	933.5
7	M 13.44	58.93	308.0	55.62	1 002	806.8	865.8
	M 29.61	110.9	606.0	93.68	2 320	1 908	2 038
8	M 32.18	39.23	171.8	42.83	1 307	1 793	1 627
	M 15.20	19.63	81.09	24.05	562.0	768.7	713.5
9	M 14.56	11.55	10.92	13.10	182.1	483.9	600.8
	M 30.40	24.58	22.79	26.08	375.1	1 091	1 293

图 4 为调焦过程中, 第一步调焦前和最后一

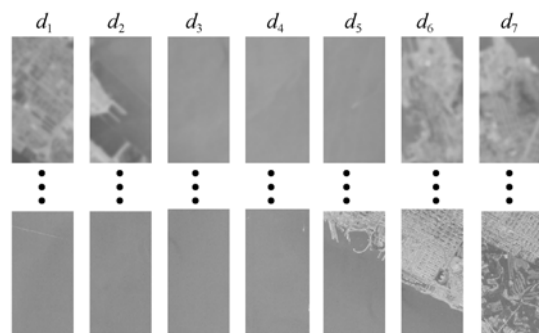


图 4 调焦前后对比图像

Fig. 4 Contrast picture of before and after focus

步调焦后各个 CCD 重叠区域所得图像的对比。其中第一行图像由前排 CCD 的 7 个重叠区域,经第一次成像所得;第二行图像是调焦结束后,由后排 CCD 的 7 个重叠区域的最终成像所得。从图 4 和表 1 可以看出,第一次成像时, d_1 、 d_6 和 d_7 中的景物纹理较多,评价函数值较大,被选为表决调焦动作的依据;而最后一次成像时, d_5 、 d_6 和 d_7 中景物纹理较多,评价函数值较大,被选为表决调焦动作的依据。

5 结 论

针对推扫式遥感相机的成像特点,提出了基

于 CCD 重叠区域的图像实现自动调焦的方法,一般的基于光机结构的调焦方法相比,该方法简化了调焦结构设计,体现基于图像自动调焦的优势。提出的调焦方法在基于 FPGA 的平台上成功实现,并且保证了调焦的实时性。最终,通过实验验证了调焦过程,实验中,调焦步距为 0.02 mm,调焦周期为 0.2 s 时,该方法可靠有效,一次调焦过程耗时为 1.8 s。

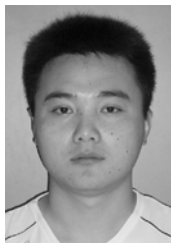
该方法解决了将基于图像处理的自动调焦用于空间遥感相机的问题,并且满足精度的要求,具有较好的实时性和可行性,为推扫式遥感相机在轨实时调焦提供了方法依据。

参考文献:

- [1] 丁亚林,田海英,王家骥. 空间遥感相机调焦机构设计[J]. 光学精密工程, 2001,9(1):35-37.
DING Y L, TIAN H Y, WANG J Q. Design on the focusing mechanism of space remote-sensing camera[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2001, 9(1): 35-37. (in Chinese)
- [2] 杨永彬. 空间光学相机调焦技术研究[J]. 航天器工程, 2011,20(2):20-24.
YANG Y B. Study on focusing technique for space optical camera[J]. *Spacecraft Engineering*, 2011, 20(2):20-24. (in Chinese)
- [3] 王书新,李景林,刘磊,等. 大尺寸焦平面空间相机调焦机构的精度分析[J]. 光学精密工程, 2010,18(10):2239-2243.
WANG SH X, LI J L, LIU L, *et al.*. Accuracy analysis of focusing mechanism in space camera with long-focal-plan[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(10): 2239-2243. (in Chinese)
- [4] 周九飞,崔林培,周刚,等. 航空成像设备自动调焦方法[J]. 光学学报, 2010, 30(1): 105-108.
ZHOU J F, CUI L P, ZHOU G, *et al.*. Autofocus method of aerial imaging device[J]. *Acta Optica Sinic*, 2010, 30(1): 105-108. (in Chinese)
- [5] 赵志彬,刘晶红. 基于图像功率谱的航空光电平台自动检焦设计[J]. 光学学报, 2010, 30(12): 3495-3500.
ZHAO ZH B, LIU J H. Power spectra-based auto-focusing method for airborne optoelectronic platform [J]. *Acta Optica Sinic*, 2010, 30(12): 3495-3500. (in Chinese)
- [6] 张新洁,颜昌翔,谢涛. 星载传感器调焦机构的设计[J]. 光学精密工程, 2009, 17(11): 2758-2761.
ZHAO X J, YAN CH X, XIE T. Design of focusing mechanism of space remote senso[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(11): 2758-2761. (in Chinese)
- [7] PAUL R J, DAVID G M, PETER J P. Technology of focal planes of CCDs[J]. *SPIE*, 2004, 5167:72-82.
- [8] LEE J H, KIM K S, NAM B D, *et al.*. Implementation of a passive automatic focusing algorithm for digital still camera[J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 1995, 41(3): 449-454.
- [9] 赵辉,鲍歌堂,陶卫. 图像测量中自动调焦函数的实验研究与分析[J]. 光学精密工程, 2004,12(5): 531-536.
ZHAO H, BAO G T, TAO W. Experimental research and analysis of automatic focusing function for imaging measurement [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004,12(5):35-37. (in Chinese)
- [10] 刘焕雨,万秋华. 图像法自动调焦原理及系统实现[J]. 微机计算信息, 2008,24(5-1): 39-40.
LIU H Y, WAN Q H. Elements of automatic focusing based on image processing method and Development of system[J]. *Microcomputer Information*, 2008,24(5-1):39-40. (in Chinese)
- [11] 史磊,金光,安源,等. 一种遥感相机的 CCD 交错拼接方法研究[J]. 红外, 2009,30(1): 12-15.
SHI L, JIN G, AN Y, *et al.*. Research on a me-

- chanical interleaving stitching method of CCDs for remote sensing camera [J]. *Infrared*, 2009, 30 (1): 12-15. (in Chinese)
- [12] 李朝辉,王肇勳,武克用. 空间相机 CCD 焦平面的光学拼接[J]. *光学精密工程*, 2000, 8(3): 213-216.
- LI ZH H, WANG ZH X, WU K Y. Optical assembly of CCD focal plane for space camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2000, 8(3): 213-216. (in Chinese)
- [13] 岳俊华,李岩,武学颖,等. 多 TDI-CCD 拼接相机成像非均匀性的校正[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(12): 3084-3088.
- YUE J H, LI Y, WU X Y, *et al.*. Correctio of imaging no-uniformity for multi-TDICCD mosaic camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 8(3): 3084-3088. (in Chinese)
- [14] 王欣,安志勇,杨瑞宁. 基于图像清晰度评价函数的 CCD 摄像机自动调焦技术研究[J]. *长春理工大学学报(自然科学版)*, 2008, 31(1): 11-14.
- WANG X, AN ZH Y, YANG R N. The research of CCD camera auto-focusing technology based on image definition criterion [J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2008, 31(1): 11-14. (in Chinese)
- [15] 冯精武,喻擎苍,芦宁等. 调焦系统中数字图像清晰度评价函数的研究[J]. *机电工程*, 2011, 28(3): 354-368.
- FENG J W, YU Q C, LU N, *et al.*. Definition evaluation function of digital image in auto-focusing system [J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2011, 28(3): 354-368. (in Chinese)
- [16] 任四刚,李见为,谢利利. 基于灰度差分法的自动调焦技术[J]. *光电工程*, 2003, 30(2): 53-55.
- REN S G, LI J W, XIE L L. Automatic focusing technique based on gray scale difference method [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2003, 30(2): 53-55. (in Chinese)

作者简介:



卢振华(1983—),男,山东日照人,博士研究生,主要从事空间遥感智能调焦技术方面的研究。E-mail: qdluzhenhua@163.com



吕恒毅(1984—),男,辽宁大连人,硕士,研究实习员,主要从事航天相机成像系统视频处理方面研究。E-mail: lv_hengyi@163.com



李云飞(1971—),男,吉林榆树人,博士,副研究员,主要从事光电成像中计算机应用技术方面的研究。E-mail: liyf@ciomp.ac.cn



郭永飞(1961—),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,主要从事光电技术应用,嵌入式系统开发等方面的研究。E-mail: guoyf@ciomp.ac.cn