0254-6124/2010/30(6)-589–07 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

Song Mei. Analysis on precision of multi-lens area array CCD mapping camera. *Chin. J. Space Sci.*, 2010, **30**(6): 589-595

多镜头面阵 CCD 测绘相机的精度分析

宋 梅

(北京航空航天大学北海学院软件与信息工程学院 北海 536000)

摘 要 对于空间测绘相机来说测绘精度占首要地位, 而影响拼接测绘相机测量精度的因素有多种. 以多镜头拼接的测绘相机为例, 根据影响外视场拼接测绘相机精度的因素特征, 分析了影响精度的因素和提高面阵测绘相机精度的方法.

关键词 CCD 相机; 测量精度; 标定精度

中图法分类号 V 448.21

Analysis on Precision of Multi-lens Area Array CCD Mapping Camera

SONG Mei

(*School of Software and Information Engineering, Beihai College of Beihang University, Beihai* 536000)

Abstract Mapping precision is very important for the mapping camera, and there are lots of factors that can influence the survey precision of butting mapping camera. Camera concerned here is the multi-lens butting mapping camera. The mapping precision of the camera, affected by the multi-lens area array CCD butting, the geometry calibration, the coordinate transformation and the image restores processes in the butting mapping camera of outside field of view was studied. Factors influencing the precision and the method to improve the precision of mapping camera were analyzed based on the characteristics of those factors. Through the research, the principal factors that predominate in the precision of mapping camera were decided.

Key words CCD camera, Survey precision, Calibration precision

1 精度指标概述

测绘和更新地形图及相关测绘产品需要通过航天摄影测量的方式来完成. 作为解决这一问题的必要条件之一, 应该具有满足航天摄影测量要求的高分辨力测绘相机. 对于测绘相机来说, 测绘精度占首要地位, 而影响拼接测绘相机测量精度的因素有多种.

外视场拼接测绘相机的测量精度指标主要有如下三种:

①坐标转换精度,

②主点坐标和相机主距标定精度,

③图像的几何纠正精度.

坐标转换精度与主点坐标及相机主距标定精度是紧密相关的. 提高外视场拼接测绘相机整体精度的

2009-03-21 收到原稿, 2010-01-04 收到修定稿

E-mail: songmei570@163.com

本质方法是提高主点坐标和相机主距标定精度及图像的几何纠正精度 [1].

2 测量精度仿真分析

2.1 坐标转换精度

坐标转换精度是测绘相机测量精度的基础, 其直接影响到标定的精度. 这里根据不同的角度误差条件, 对各十字丝的中心点坐标值进行详细地仿真实验分析.

仿真实验是对整个拼接系统中与中间参考相机有一定拼接角度的其他相机的仿真. 下面以三个相机的拼接系统为例进行具体分析. 图 1 为三个 CCD 的依次排列顺序.



图 1 三个 CCD 的排列顺序

Fig. 1 Array order of three CCD

假设相机坐标系为 $\boldsymbol{Y}=[Y_1,Y_2,Y_3]^{\mathrm{T}}$, 其原点为相机主点, Y_1 轴沿中心视场光轴指向物方, Y_2 轴垂直向上, Y_3 轴与 Y_1,Y_2 轴构成右手坐标系. 设 CCD 相机单元坐标系为 $\boldsymbol{X}_i=[X_{i1},X_{i2},X_{i3}]^{\mathrm{T}}$, 每个坐标系的原点即是相机镜头的主点, 其与相机坐标系原点重合, 构成方式与相机坐标系相同, 由此可见中心 CCD 相机单元坐标系与相机坐标系重合, 这样进行坐标变换, 将各块 CCD 相机单元坐标系都转换到中心 CCD 相机所代表的单元坐标系平面上 [2−3].

在测量系统中, 整个成像过程均经过相机主点构成中心投影, 这样对任一单元坐标系, 对于空间一点 M, 其坐标都可表示如下:

$$\begin{bmatrix} X_{i1} \\ X_{i2} \\ X_{i3} \end{bmatrix} = \boldsymbol{r}\cdot a_i \cdot \begin{bmatrix} f_i \\ \zeta_i \\ \eta_i \end{bmatrix}. \tag{1}$$

式中, $\boldsymbol{r}=|\boldsymbol{M}|$ 是 $\boldsymbol{M}$ 点到相机的矢径 (虽然 $\boldsymbol{r}$ 最后并不参与计算, 但也需要说明);

$$a_i=\frac{1}{\sqrt{f_i^2+\zeta_i'^2+\eta_i'^2}}$$

为归一化系数; f_i 为 i 单元 CCD 相机的真实焦距; ζ_i' 为 i 单元高低方向偏移量 (沿 X_{i2} 方向), η_i' 为 i 单元水平方向偏移量 (沿 X_{i3} 方向), ζ_i,η_i 是第 i 单元 CCD 测量的偏移量.

由于中心相机单元坐标系与相机坐标系重合, 所以 M 点在相机坐标系的坐标为

$$\boldsymbol{Y}=\begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ Y_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{21} \\ X_{22} \\ X_{23} \end{bmatrix} = \boldsymbol{r}\cdot a_2 \cdot \begin{bmatrix} f_2 \\ \zeta \\ \eta \end{bmatrix}. \tag{2}$$

设 A_i 和 B_i 为各单元坐标系 $\boldsymbol{X}_i$ 相对于相机坐标系 $\boldsymbol{Y}$ 的方位、高低轴角, 则对于 M 点, 各单元坐标系有

$$\boldsymbol{Y}=\begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ Y_3 \end{bmatrix} = \boldsymbol{Q}_i\cdot\boldsymbol{P}_i\cdot \begin{bmatrix} X_{i1} \\ X_{i2} \\ X_{i3} \end{bmatrix}. \tag{3}$$

其中, $\boldsymbol{Q}_i$ 为方位方向的作用矩阵, 有

$$\boldsymbol{Q}_i=\begin{bmatrix} \cos A_i & 0 & \sin A_i \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin A_i & 0 & \cos A_i \end{bmatrix}; \tag{4}$$

$\boldsymbol{P}_i$ 为高低方向的作用矩阵, 有

$$\boldsymbol{P}_i=\begin{bmatrix} \cos B_i & -\sin B_i & 0 \\ \sin B_i & \cos B_i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \tag{5}$$

由式 (2)∼(5) 联立可得

$$\boldsymbol{r}\cdot a_2\cdot\begin{bmatrix} f_2 \\ \zeta \\ \eta \end{bmatrix} = \boldsymbol{Q}_i\cdot\boldsymbol{P}_i\cdot\begin{bmatrix} X_{i1} \\ X_{i2} \\ X_{i3} \end{bmatrix} \tag{6}$$

消去 $\boldsymbol{r}$ 有

$$a_2\begin{bmatrix} f_2 \\ \zeta \\ \eta \end{bmatrix} = \boldsymbol{Q}_i\cdot\boldsymbol{P}_i\cdot\begin{bmatrix} X_{i1} \\ X_{i2} \\ X_{i3} \end{bmatrix} = \boldsymbol{Q}_i\cdot\boldsymbol{P}_i\cdot a_i\begin{bmatrix} f_i \\ \zeta_i \\ \eta_i \end{bmatrix}. \tag{7}$$

由于等式两边的 f_2,f_i,ζ_i,η_i 是已知的, $\boldsymbol{Q}_i$ 和 $\boldsymbol{P}_i$ 也是已知的, 这样就可以通过上式实现各 CCD 相机单元坐标到相机坐标系的变换, 亦即完成了 CCD 相机的数字拼接 [2].

根据不同角度误差条件, 对十字丝中心点坐标的仿真数据列于表 1.

表 1 引入拼接角度误差之后两侧相机的测量数据 (单位: 像元)

Table 1 Measurement data of two cameras after importing error of butting angle (unit: pixel)

$\theta/('')$	CAMERA I			CAMERA III		
	Δx/pixel	ν	ν^2 $(\times 10^{-4})$	Δy/pixel	ν	ν^2 $(\times 10^{-4})$
1	0.015	−0.0215	4.623	0.005	−0.0266	7.076
2	0.02	−0.0165	2.723	0.016	−0.0156	2.434
3	0.022	−0.0145	2.103	0.021	−0.0106	1.124
4	0.025	−0.0115	1.323	0.026	−0.0056	0.314
5	0.029	−0.0075	0.563	0.03	−0.0016	0.0256
6	0.042	0.0055	0.303	0.035	0.0034	0.1156
7	0.049	0.0125	1.563	0.039	0.0074	0.5476
8	0.051	0.0145	2.103	0.045	0.0134	1.796
9	0.055	0.0185	3.423	0.049	0.0174	3.028
10	0.057	0.0205	4.203	0.05	0.0184	3.386
Σ	0.365	0	22.93	0.316	0	19.85
	$\Delta\bar{x} = 0.0365$		$\hat{\sigma}(\Delta x) = 0.01596$	$\Delta\bar{y} = 0.0316$		$\hat{\sigma}(\Delta y) = 0.01485$

注 Δx, Δy 分别表示各十字丝影像的中心点坐标误差值; 这里 θ 代表各十字丝影像中心点方位角的角度误差 $\Delta\alpha_0$ 或高低角的角度误差 $\Delta\omega_0$; ν 为残差; $\hat{\sigma}(\Delta x)$, $\hat{\sigma}(\Delta y)$ 分别表示标准差.

由表 1 的仿真数据结果分析, 在坐标转换的过程中, 外视场拼接角度误差对坐标转换的影响很小, 利用高精度经纬仪将角度发生器各个光束的空间角度测出, 经纬仪本身的测角精度为 $1''$, 利用内插细分技术进行十字丝坐标值测量, 在细分精度为 1/20 pixel 时, 成像在 CCD 上的十字丝坐标值测量精度可达 0.5 μm, 所以在十字丝坐标值测量过程中所产生的误差基本可以忽略. 这里主要讨论的是外视场拼接角度误差对测绘精度的影响, 因为经纬仪本身的精度就可以达到 $1''$, 所以所测得的角度误差也不能太偏离真值, 即基本在误差允许范围之内. 当角度误差在 $1'' \sim 10''$ 范围内的时候, 转换之后的坐标测量值的平均精度保持在 0.05 pixel 之内 ($\leqslant 0.5\,\mu$m), 其是误差所容许的范围. 所以可认为外视场拼接角度误差这个因素对测绘精度的影响很小, 基本可以忽略不计.

2.2 主点坐标与相机主距标定精度

对于相机内方位元素的标定过程, 标定时将相机和标定系统放置在稳定平台上, 以保证标定时的测量精度. 首先调整相机和标定系统成水平状态, 使标定系统的平行光管的光轴与相机的光轴相平行, 然后调整标定系统的高度, 使标定系统中的各平行光管的光轴与相机的光轴完全重合. 利用高精度经纬仪测量记录十字丝各点的方位和高低角度, 将这些数据作为空间物点相对于相机的方位角、高低角真值. 采用内插细分技术测量各十字丝的像点坐标.

经过以上步骤, 得到相机像面上每个十字丝的角度真值和像点坐标的测量值, 作为相机标定的数据. 套用前面仿真的数学模型, 对三相机系统中每块 CCD 成像系统分别标定 25 组数据, 每个目标数据的位置由两个方程解算, 25 组目标数据共有 50 个方程. 利用高精度经纬仪测量的十字丝空间方位、高低角解出目标视线方向余弦. 在相机与标定仪器对正后, 方向矩阵元素已知, 则模型变为线性系统. 将已知参数代入, 得到简化后的完整三相机系统数学模型:

$$y - y_0 = f \tan\omega_0 \cos\alpha_0.$$

将测量数据代入上式, 采用偏最小二乘多元回归理论方法解算出每块 CCD 各未知参数 $(x_0\ y_0)$, f, 完成整个相机的参数标定. 像面的坐标系如图 2 所示.

按照上面介绍的方法, 经过测量和解算, 即可得到表 2 所列的三台外视场拼接相机各自的内方位元

表 2 左视相机方位方向测量数据

Table 2 Orientation measurement data of left camera

方位角/(°, ′, ″)	高低角/(°, ′, ″)	x/pixel	y/pixel	E_x/pixel	E_y/pixel
270, 56, 56	298, 19, 58	357.35	363.36	0.0056	0.0048
270, 34, 1	298, 19, 45	431.26	363.73	0.0122	0.0266
270, 11, 2	298, 19, 22	504.07	363.27	0.0045	0.0058
269, 48, 8	298, 19, 14	576.77	363.93	0.0102	0.0104
269, 25, 9	298, 18, 55	649.32	363.68	0.0069	0.0077
270, 57, 11	297, 57, 0	357.79	436.47	0.0162	0.0102
270, 34, 12	297, 56, 44	430.36	436.22	0.0053	0.0028
270, 11, 19	297, 56, 29	503.58	436.07	0.0059	0.0191
269, 48, 15	297, 56, 10	576.86	435.93	0.0115	0.0127
269, 25, 29	297, 55, 48	648.98	436.09	0.0042	0.0110
270, 57, 27	297, 34, 2	357.34	509.35	0.0081	0.0051
270, 34, 33	297, 33, 46	430.20	509.41	0.0037	0.0684
270, 11, 37	297, 33, 27	503.55	509.24	0.0068	0.0092
269, 48, 38	297, 33, 9	576.64	509.15	0.0069	0.0203
269, 25, 46	297, 32, 54	649.50	509.04	0.0122	0.0149
270, 57, 43	297, 11, 2	357.42	582.67	0.0105	0.0439
270, 34, 52	297, 10, 51	430.50	582.41	0.0041	0.0156
270, 11, 52	297, 10, 33	503.69	582.45	0.0684	0.0029
269, 48, 56	297, 10, 6	576.78	582.19	0.0184	0.0098
269, 26, 0	297, 10, 3	649.73	581.74	0.0029	0.0204
270, 58, 6	296, 48, 2	357.36	655.65	0.0065	0.0069
270, 35, 4	296, 47, 52	430.53	655.47	0.0091	0.0079
270, 12, 13	296, 47, 31	504.04	655.42	0.0046	0.0108
269, 49, 11	296, 47, 18	576.58	654.90	0.0095	0.0095
269, 26, 12	296, 46, 57	649.64	655.36	0.0304	0.0025

注 x, y 坐标为测量 10 次的平均值; E_x 为 x 坐标测量的误差, E_y 为 y 坐标测量的误差. 在这里误差为测量的标准差.

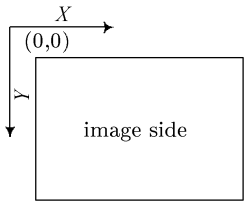


图 2 像面坐标系

Fig. 2 Coordinate of image side

素标定结果 (以下坐标及其误差单位均为 pixel).

左视相机方位方向标定结果:

$\hat{x}_0 = 503.83$, $\sigma\hat{x}_0 = 0.01$;

$\hat{y}_0 = 508.76$, $\sigma\hat{y}_0 = 0.01$;

$f = 98.55\,\mathrm{mm}$.

用同样方法对正视相机、右视相机测量和计算之后的标定结果如下.

正视相机方位方向标定结果:

$\hat{x}_0 = 503.54$, $\sigma\hat{x}_0 = 0.01$;

$\hat{y}_0 = 508.90$, $\sigma\hat{y}_0 = 0.01$;

$f = 98.78\,\mathrm{mm}$.

右视相机方位方向标定结果:

$\hat{x}_0 = 503.78$, $\sigma\hat{x}_0 = 0.01$;

$\hat{y}_0 = 509.24$, $\sigma\hat{y}_0 = 0.01$;

$f = 98.79\,\mathrm{mm}$.

根据以上的测量及标校结果, 在主点主距的计算

过程中, 影响精度的因素是测量高低角、方位角所采用的方法以及测量各十字丝的像点坐标时所采用的方法, 主要看所采用方法本身的精度对测量精度所产生的影响. 方位和高低角度是利用高精度经纬仪测量记录的, 这种经纬仪本身的精度就可以达到 1″, 所以测得的角度误差也不会太偏离真值, 即基本在误差允许范围之内. 在测量各十字丝的像点坐标时所采用的是内插细分定位算法, 从测量结果可以看出来, 精度满足微米级的范围.

2.3　图像的几何纠正精度

影响精度的因素主要产生在图像灰度重采样环节. 测绘相机的影像恢复和处理技术包括空间投影变换技术和图像灰度插值技术两部分.

这里采用三架相机进行外视场拼接的方法扩大了测绘相机的视场. 由于其外视场拼接的工作方式决定了每架相机空间投影角度各不相同, 所以必须采用投影变换技术, 将三架相机同时采集到的数据定位在统一的坐标系下, 具有相同的投影效果, 才能获取统一的地理信息.

各相机独立坐标系中的像元经过投影变换后, 其坐标位置已经发生变化, 也就是被映射到了非整数像元位置, 而统一坐标系的像元则位于这些变换后像元网格的中间. 所以必须采用图像灰度插值技术计算对应各像元的灰度值.

这里采取的方法是, 根据相机的夹角和每台相机的视场角, 以中间相机拍摄的图像为新建坐标系所在平面, 以主点为视点, 计算出三幅图像投射到新坐标系后合成为一幅图像的长度和宽度, 然后利用新坐标系中的每个坐标位置根据投射关系去反推其在原图像中的坐标位置, 根据反推出的原图像坐标值周围 4 个像元的灰度值, 利用双线性插值的办法求出其在新坐标系对应坐标的灰度值.

下面以三镜头面阵 CCD 的影像恢复为例来进行具体分析.

根据相机的夹角和每台相机的视场角, 以中间相机拍摄的图像为新建坐标系所在平面, 以主点 O 为视点 (见图 3), 计算出三幅图像投射到新坐标系后合成为一幅图像的长度和宽度, 然后用新坐标系中的每个坐标位置根据投射关系去反推其在原图像中的坐标位置, 反推出原图像坐标值周围的 4 个像元的灰度值, 利用双线性插值的办法, 求出其在新坐标系对应坐标的灰度值.

单相机系统参数如下.

CCD 像面尺寸 9.1 mm×9.2 mm,

CCD 像元尺寸 9 μm×9 μm,

有效像元 1008 × 1018,

光学镜头焦距选择 100 mm,

视场 5°11′39″ (水平), 5°14′45″ (垂直),

像元空间角分辨力 18.56″.

2.3.1　空间投影方法

已确定信息有, 各相机的主点坐标 (X, Y), 主距 F, 采集图像的大小 ($H \times V$, 单位 pixel), 像元尺寸为 A, 相机间夹角为 B, 相机视场 F_{OV}. 投影关系如图 3 所示 [2].

根据图 3 所示的投影关系, 计算以下参数.

①等效图像尺寸:

图像宽度

$$V = 2V_1 = 2F_1 \tan\left(F_{\mathrm{OV}}/2 + B\right)/A = 2965\,\mathrm{pixel},$$

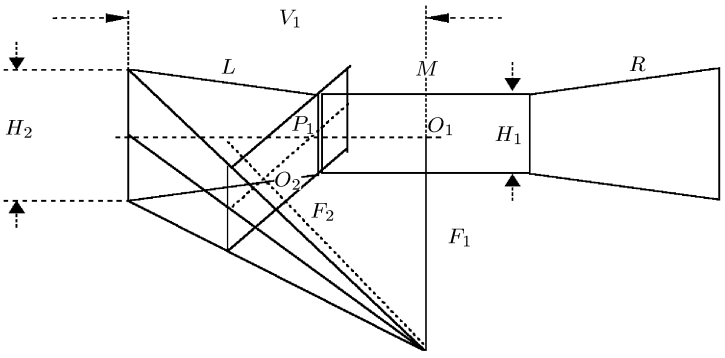


图 3　空间投影关系

Fig. 3　Relationship of space projection

图像高度

$$H = H_1\cos(F_{\mathrm{OV}}/2)/\cos(F_{\mathrm{OV}}/2+B) = 1016\,\mathrm{pixel}.$$

②等效主点: 等效主点 O_1 坐标,

$X_{O_1} = 1483\,\mathrm{pixel}$, $Y_{O_1} = 508\,\mathrm{pixel}$.

③等效主距: 等效主距 $F = F_2$.

2.3.2 坐标转换关系

在统一投影坐标系下的像元坐标位置用 (X,Y) 表示, 在相机成像坐标系下的像元坐标位置用 (U,V) 表示, 则有

$$U = F_2\tan\{B+\arctan[(X-X_{O_1})/F_1]\},$$

$$V = \sqrt{(X^2+F_2^2)}\arctan[Y/\sqrt{(U-X_{O_1})^2+F_2^2}].$$

2.3.3 双线性插值

插值关系如图 4 所示.

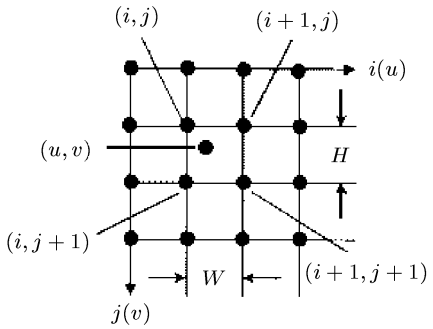


图 4 二元线性插值

Fig. 4 Linear interpolation of duality

图 4 中 (u,v) 表示转换后的像元坐标, (i,j) 表示相机图像坐标系中的像元坐标. 则点 (u,v) 的灰度可以通过 3 次插值得到, 首先根据 (i,j) 和 $(i+1,j)$ 两点的灰度值 $f(i,j)$ 和 $f(i+1,j)$ 插值得到

$$f(u,j) = f(i,j)+\alpha[f(i+1,j)-f(i,j)].$$

然后根据 $(i,j+1)$ 和 $(i+1,j+1)$ 两点的灰度值 $f(i,j+1)$ 和 $f(i+1,j+1)$ 插值得到

$$f(u,j+1) = f(i,j+1)+\alpha[f(i+1,j+1)-f(i,j+1)].$$

最后根据 (u,j) 和 $(u,j+1)$ 两点的灰度值 $f(u,j)$ 和 $f(u,j+1)$ 插值得到

$$f(u,v) = f(i,j)(1-\alpha)(1-\beta)+f(i+1,j)\alpha(1-\beta)+f(i,j+1)(1-\alpha)\beta+f(i+1,j+1)\alpha\beta.$$

根据线性插值理论有

$$\alpha = \frac{x_u-x_i}{x_{i+1}-x_i},$$

$$\beta = \frac{y_v-y_j}{y_{j+1}-y_j}.$$

代入上式就可以计算点 (u,v) 的灰度, 其中 x,y 分别为每个像元中心的横向和纵向坐标值.

为了计算简单, 这里适当选取

$$x_u = x_i+\frac{1}{2}(x_{i+1}-x_i),$$

$$y_v = y_j+\frac{1}{2}(y_{j+1}-y_j),$$

则通过上式计算, $\alpha=0.5$, $\beta=0.5$. 即点 (u,v) 取在 (i,j), $(i+1,j)$, $(i,j+1)$, $(i+1,j+1)$ 四点几何中心. 插值点的灰度值由下式确定:

$$f(u,v) = 0.25f(i,j)+0.25f(i+1,j)+0.25f(i,j+1)+0.25f(i+1,j+1).$$

综上所述, 将所有点灰度值计算出来就完成了整幅图像的影像恢复和处理过程 [3]. 三相机图像经过拼接恢复之后的效果如图 5 所示.



图 5 影像恢复之后的拼接图

Fig. 5 Butting picture after resuming of image

在这里误差有两个来源, 首先在进行空间投影的时候, 有拼接角度的参与, 所以这里有角度误差的因素. 按照前面的讨论, 在这里角度误差也不会对测绘精度产生影响, 所以可以忽略不计. 再一个是在进行灰度重采样时采用双线性内插细分方法, 采用这种

方法本身虽然能够提高精度, 但也会带来一些算法误差.

3 结语

对影响立体测绘相机精度的各种因素进行了全面的分析, 围绕如何提高立体测绘相机的精度进行了研究与探讨. 整理、分析了多镜头面阵 CCD 测绘相机的精度指标要求, 根据影响外视场拼接测绘相机精度因素的特性, 包括角度误差因素, 随机误差因素, 分别进行了仿真分析, 通过仿真分析, 得出了提高精度的方法.

参考文献

[1] Liu Gang, Gao Xiaodong, Cao Xuedong. A comprehensive calibration of the real-time measurement accuracy for a photoelectrical measuring system with wide field of view [J]. *Opto-Ele. Eng.*, 2001, **28**(6):10-13. in Chinese (刘罡, 高晓东, 曹学东. 大视场光电测量系统实时测量精度的综合评 [J]. 光电工程, 2001, **28**(6):10-13)

[2] Wang Zhizhuo. Theory of Photogrammetry [M]. Beijing: Book concern of mapping, 1979. in Chinese (王之卓. 摄影测量原理 [M]. 北京: 测绘出版社, 1979)

[3] He Xin, Wang Jun, Yang Huiling, Bao Haiming, Hao Zhihang. Miss distance error dur to optical distortion of multiple CCD butting system. *Semicond. Optoelect.*, 2005, **26**(2):161-163. in Chinese (何昕, 王军, 杨会玲, 鲍海明, 郝志航. 多 CCD 拼接相机系统中畸变误差研究. 半导体光学, 2005, **26**(2):161-163)

[4] Li Jialie, Ding Guoqing. Method for improving precision in noncontact measurement by linear CCD [J]. *Opt. Precis. Eng.*, 2002, **10**(3):281-284. in Chinese (李佳列, 丁国清. 采用 CCD 的非接触测量中提高精度的一种方法 [J]. 光学精密工程, 2002, **10**(3):281-284)

[5] Zhao Baochang, *et al*. The research of moonlet CCD camera technic [D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS, 1999. in Chinese (赵葆常, 等. 小卫星 CCD 相机技术的研究 [D]. 西安: 西安光机所, 1999)

[6] Yu Jianjun, Duan Jiayou. Application of connecting technology in linear array CCD [J]. *Appl. Opt.*, 2003, **24**(1):38-39. in Chinese (余建军, 段嘉友. 线阵 CCD 拼接技术的应用 [J]. 应用光学, 2003, **24**(1):38-39)

[7] Li Zhaohui, Wang Zhaoxun, Wu Keyong. Optical assembly of CCD focal plane for space camera [J]. *Opt. Precis. Eng.*, 2000, **8**(3):217-220. in China (李朝晖, 王肇勋, 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):217-220)