

文章编号 1004-924X(2003) 04-0421-04

基于单心球面系统的九块面阵 CCD 数字拼接

何 昕, 魏仲慧, 郝志航

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130022)

摘要: 在研制大视场、高精度光电测量设备过程中, 采用多块 CCD 拼接技术是重要手段之一。本文介绍了一种利用单心球面系统进行 CCD 拼接的方法, 提出建立相机数学模型和安装在球面上 CCD 的数字拼接算法。并且利用该方法实现了九块面阵 CCD $23^\circ \times 17^\circ$ 视场的拼接。

关键词: 单心球面系统; CCD 拼接; 相机数学模型

中图分类号: TN386.5 文献标识码: A

Digital camera modeling of butting 9 CCD chips in the concentric spherical lens system

HE Xin, WEI Zhong-hui, HAO Zhi-hang

(*Department of Space Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics
and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022, China*)

Abstract: Multi chip CCD integration is an important approach in research on optical instruments with wide field of view and accurate precision. Comparing some kinds of CCD integration methods, this system is based on the 9 integration area arrays CCD chips in one concentric spherical lens structure. At the end of this paper mathematic modeling of the camera and the image integration arithmetic are presented. Experiments show that the integration of 9 CCD chips with the field of view of $23^\circ \times 17^\circ$ can be implemented.

Key words: concentric spherical lens system; multi chip CCD integration; mathematic modeling

1 引言

电荷耦合器件 CCD 自诞生之日起引起了广大光电设备研制者的重视。随着科学技术的不断进步, CCD 器件无论在像面大小、像元数以及种类上都有了很大的发展。但是在 大视场、高分辨率光测设备中, 单片 CCD 器件仍无法满足测量精度和视场的要求, 因此为了解决这个问题, 各种

CCD 拼接的方法应运而生。

2 CCD 拼接的主要方法

CCD 拼接的方法主要有两类: 外拼接和内拼接。外拼接主要是指外视场分光的方法, 外视场分光由多个光学系统组成, 每个光学系统由 CCD 器件接收成像的独立系统分别占据视场的一部分, 从而组成整个大视场。

内拼接主要有两种途径:一是 CCD 器件直接拼接,二是通过光学系统分光的方法进行光学拼接。直接拼接是指将 CCD 器件在机械上首尾搭接。由于普通 CCD 器件的光敏面以外的边缘以及引脚的影响,直接拼接时 CCD 器件之间会产生缝隙,实现难度比较大。虽然最近已有一些可供进行拼接的 CCD 器件出现,这些 CCD 器件尽管引脚都做在一侧,光敏面以外的边缘也很小,但是实现起来仍十分困难,无法达到无缝隙拼接的目的^[1-2]。

使用光学系统分光的方法进行 CCD 拼接主要有以下两种形式:

a) 光路分光

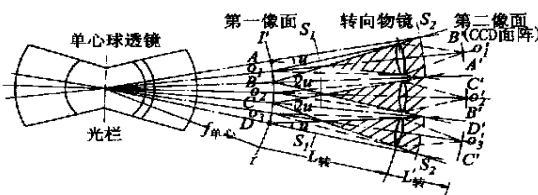
光路分光是通过棱镜将光路分成多路,从而达到拼接的目的。

b) 光束分光

光束分光是一种两次成像的分光系统,将第一次成像像面上的光束分成多束,再通过下列几种方法将各束光分别成像在第二像面上从而达到分光的目的。主要方法有:光纤分束和透镜分束等。

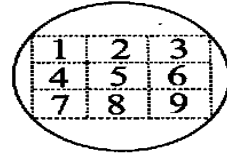
上述拼接方法各有其优缺点,外视场分光优点是光学系统结构简单,成像质量好,缺点是存在视差和死区;光路分光优点是整体性能好,缺点是拼接数量有限并且成像质量不好保证;光纤分束的优点是结构简单,其缺点是由于受光纤直径的限制成像质量差,分辨率甚低,只能用于显示不能用于精密测量;透镜分束的优点是光学系统结构简单,除两组透镜外中间无棱镜、场镜等环节,因此性能稳定,装调容易。其缺点是各个拼接块的成像面在同一平面上,器件位置排列困难。

本文将介绍内视场拼接透镜分束的一种变体即单心球面系统。



(a) 单心球面系统示意图

(a) Concentric spherical lens system



(b) 面阵 CCD 排列示意图

(b) Sketch of area array CCDs ordering

图 1 光学拼接原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the optical butting

3 单心球面系统拼接原理

单心球面系统拼接方法利用透镜分束的拼接原理,即将由第一组透镜成像在第一像面上的光束分成多个,然后由各个小透镜分别成像在第二像面上,从而达到拼接的目的。其拼接原理如图 1 所示,它将第一组透镜改用单心球透镜,由物方来的光束经单心球透镜成像在形状为球面的第一像面上,再经过 9 组转像物镜将第一像面上的像分成 9 路各自独立的光束最后成像在第二像面的 9 个平面上。9 个像的排列如图 1(b) 所示,图 1(a) 中只表示了一个截面,可安置 3 个面阵 CCD 器件。如在 9 个成像平面上安置 CCD 面阵器件即可实现 CCD 光机拼接^[1]。

通过光学以及机械方法实现 CCD 拼接仅仅完成大视场拼接的第一步,只有将多个各自独立的 CCD 单元坐标系有机地结合起来,即完成 CCD 数字拼接并建立整个相机的数学模型才算最终完成 CCD 的拼接。

4 相机数学模型的建立

由于将全视场景物成像在 9 块安装在球面的 CCD 上,在建立相机数学模型分为两步:

(1) 将 9 个 CCD 相机分别做为独立的成像单元。建立各自的包含物像映射关系和光学畸变的单元相机数学模型,即给出目标点在物空间坐标系和像空间坐标系之间的对应关系;

(2) 进行数字拼接。将各个独立的像空间坐标系,统一到相机坐标系上,建立最后的整个相机的数学模型。

4.1 中心投影的构像方程

解析法分析摄影测量构像过程,要用公式表

达像点和对应物点间的数学关系, 为此必须在像方和物方空间建立坐标系, 如图 2 所示。

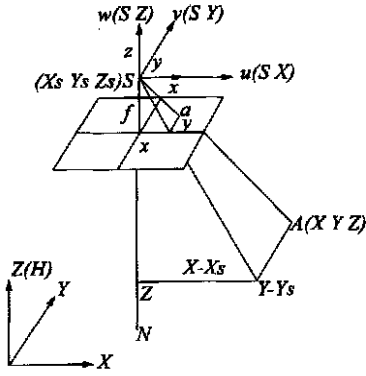


图 2 中心投影原理示意图

Fig. 2 Sketch of the centric projection

像空间坐标系: 坐标原点取摄影中心 S , 坐标在 Z 轴为摄影径向的反方向与 OS 结合, 通过点 S 作平行于像面上 X 和 Y 轴的轴线作为像空间系的 X 轴和 Y 轴。

物空间坐标系 X, Y 轴形成水平面, Z 轴垂直向上。

设物空间坐标系中一物点的坐标为 (X, Y, Z) 而该点对应的像点在像空间的坐标为 (x, y) , 摄影中心 S 在物空间坐标系的坐标为 (X_s, Y_s, Z_s)

则根据中心摄影原理给出中心摄影的构像方程式:

$$x = -f \frac{a_1(x - x_s) + b_1(y - y_s) + c_1(z - z_s)}{a_3(x - x_s) + b_3(y - y_s) + c_3(z - z_s)}, \quad (1)$$

$$y = -f \frac{a_2(x - x_s) + b_2(y - y_s) + c_2(z - z_s)}{a_3(x - x_s) + b_3(y - y_s) + c_3(z - z_s)}, \quad (2)$$

$a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3, c_1, c_2, c_3$, 是空间坐标轴和空间坐标轴间的夹角余弦(方向余弦), f 镜头主距^[3]。

4.2 成像空间的变换

成像的几何模型包括两种变换: (1) 从物空间坐标系到像空间坐标系的变换; (2) 从图像空间坐标系到数字图像坐标系的变换。在变换中引入两种误差, 与第一种变换相关的是光学畸变差, 与第二种变换有关的是数字畸变。这种数字畸变是指

由于电气噪声、电子学硬件、电源等不稳定引起的误差。随着 CCD 的发展这种误差比较小, 可以忽略。

将这几种畸变综合起来, 得到了修正后的摄影测量的基本方程式:

$$x - x_0 + \Delta x_r + \Delta x_t = -f \frac{a_1(x - x_s) + b_1(y - y_s) + c_1(z - z_s)}{a_3(x - x_s) + b_3(y - y_s) + c_3(z - z_s)}, \quad (3)$$

$$y - y_0 + \Delta y_r + \Delta y_t = -f \frac{a_2(x - x_s) + b_2(y - y_s) + c_2(z - z_s)}{a_3(x - x_s) + b_3(y - y_s) + c_3(z - z_s)}, \quad (4)$$

如果已知目标的方位角 α_0 高低角 ω_0 , 则目标视线的方向

$$\begin{cases} \lambda = \sin \alpha_0 \cos \omega_0 \\ \mu = \cos \alpha_0 \cos \omega_0 \\ \gamma = \sin \omega_0 \end{cases}, \quad (5)$$

则前式可表示为:

$$x - x_0 = -f \frac{a_1 \lambda + b_1 \mu + c_1 \gamma}{a_3 \lambda + b_3 \mu + c_3 \gamma} + \Delta x_r + \Delta x_t, \quad (6)$$

$$y - y_0 = -f \frac{a_2 \lambda + b_2 \mu + c_2 \gamma}{a_3 \lambda + b_3 \mu + c_3 \gamma} + \Delta y_r + \Delta y_t, \quad (7)$$

经以上分析, 得到了成像空间的几何模型, 使物点和像点有了明确的对应关系。

5 CCD 的数字拼接

CCD 数字拼接的含义是将安装在球面上的九块 CCD 相机(相机排列如图 1(b) 所示)所测得的目标坐标转换到相机坐标系中, 相机坐标系为 $Y = [Y_1, Y_2, Y_3]^T$, 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 $X_i = [X_{i1}, X_{i2}, X_{i3}]^T$, 每个坐标系的原点亦是相机主点与相机坐标系原点重合, 其构成方式与相机坐标系相同, 由此可见中心 CCD 相机(5#)单元坐标系与相机坐标系重合, 这样, 坐标变换即是将各块 CCD 相机单元坐标系都转换到中心 CCD 相机(5#)所代表的单元坐标系平面上。

在系统中, 整个成像过程都是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 , 其坐标都可做如下表示:

$$Y = \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ Y_3 \end{bmatrix} = r \cdot a_i \cdot \begin{bmatrix} X_{i_1} \\ X_{i_2} \\ X_{i_3} \end{bmatrix} = r \cdot a_i \cdot \begin{bmatrix} f_i \\ \zeta_i \\ \eta_i \end{bmatrix}, \quad (8)$$

式中 $r = |M|$ 是 M 点到相机的矢径

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

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_{i_2} 方向)

η_i 为 i 单元水平方向偏移量(沿 X_{i_3} 方向)

由于 X_5 单元坐标系与 Y 相机坐标系重合, 所以 M 点在相机坐标系的坐标为

$$Y = \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ Y_3 \end{bmatrix} = r \cdot a_5 \cdot \begin{bmatrix} X_{5_1} \\ X_{5_2} \\ X_{5_3} \end{bmatrix} = r \cdot a_5 \cdot \begin{bmatrix} f_5 \\ \zeta_5 \\ \eta_5 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

设 A_i, B_i 为各单元坐标系 X_i 相对于相机坐标系 Y 的方位、高低轴角, 则对于 M 点, 各单元坐标系有

$$Y = \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ Y_3 \end{bmatrix} = Q_i \cdot P_i \cdot r \cdot a_i \cdot \begin{bmatrix} X_{i_1} \\ X_{i_2} \\ X_{i_3} \end{bmatrix}, \quad (10)$$

其中 Q_i 是方位方向的作用矩阵

$$Q_i = \begin{bmatrix} \cos A_i & 0 & \sin A_i \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin A_i & 0 & \cos A_i \end{bmatrix}, \quad (11)$$

参考文献:

- [1] PARK H S. Realtime tracking system for the wide field of view telescope project [J]. *SPIE*, 1989, 1111: 196-203.
- [2] 李朝晖, 王肇勋. 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.
LI ZH H, WANG Z X. CCD focal plane integration in space camera [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2000, 8, (3): 217-220. (in Chinese)
- [3] 王之卓. 摄影测量原理 [M]. 北京: 测绘出版社, 1979.
WANG ZH ZH. *Photogrammetry Theory* [M]. Beijing: Mapping publishing company, 1979. (in Chinese)
- [4] 张兆礼. 现代图像处理技术及 MATLAB 实现 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2001.
ZHANG ZH L. *Modern image pressing and MATLAB realization* [M]. Beijing: People's post and telecom publishing company, 2001. (in Chinese)

作者简介: 何 昕(1966-), 男, 吉林长春人, 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所在读博士研究生, 主要从事数字图像处理、计算机应用等方面的工作。

P 是高低方向的作用矩阵

$$P = \begin{bmatrix} \cos B_i & -\sin B_i & 0 \\ \sin B_i & \cos B_i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (12)$$

由上几式联立可得:

$$r \cdot a_5 \cdot \begin{bmatrix} f_5 \\ \zeta_5 \\ \eta_5 \end{bmatrix} = Q_i \cdot P_i \cdot r \cdot a_i \cdot \begin{bmatrix} X_{i_1} \\ X_{i_2} \\ X_{i_3} \end{bmatrix}, \quad (13)$$

消去 r 有

$$a_5 \cdot \begin{bmatrix} f_5 \\ \zeta_5 \\ \eta_5 \end{bmatrix} = Q_i \cdot P_i \cdot a_i \cdot \begin{bmatrix} X_{i_1} \\ X_{i_2} \\ X_{i_3} \end{bmatrix} = Q_i \cdot P_i \cdot a_i \cdot \begin{bmatrix} f_i \\ \zeta_i \\ \eta_i \end{bmatrix}, \quad (14)$$

由于等式两边的 f_5 和 f_i 是已知的, $Q_i \cdot P_i$ 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 的数字拼接。

6 结 论

在实时多目标弹道测量系统中利用单心球面系统实现了九块面阵 CCD $23^\circ \times 18^\circ$ 视场的拼接, 并在实际应用中取得了良好的效果。