

x_c, y_c 为 O' 在 $O'-XY$ 中的坐标, 焦距 f 单位取为 mm, 可通过对摄影仪的精确检定得到; pix 为 CCD 像元尺寸, 单位取为 mm, λ, φ 为测站天文经纬度, α_0 为视轴指向的第二赤道坐标系中的经度, α, δ 为恒星的赤经、赤纬; 式(1')中 s_c 为摄影瞬间的格林尼治恒星时. 从理论上讲, 只要观测 2 颗恒星即可利用最小二乘平差法求得 $\varphi, \alpha_0, \theta$. 对于某一颗恒星影像量测坐标的误差方程^[6]为

$$V = A \cdot \Delta X + l \tag{2}$$

在 $V^T W V = \min$ 的条件下, (其中, A 为一次误差系数矩阵, W 为三个分量 $\varphi, \alpha_0, \theta$ 的权重矩阵, 在本系统中权重相同, 所以 W 为单位矩阵) 可得

$$\Delta X = -(A^T W A)^{-1} A^T W l \tag{3}$$

式中 $\Delta X = [\Delta\varphi \ \Delta\alpha \ \Delta\theta]^T$

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \varphi} & \frac{\partial x}{\partial \alpha_0} & \frac{\partial x}{\partial \theta} \\ \frac{\partial y}{\partial \varphi} & \frac{\partial y}{\partial \alpha_0} & \frac{\partial y}{\partial \theta} \end{bmatrix} \Bigg|_{\varphi = \varphi_0, \alpha_0 = \alpha_0, \theta = \theta_0} \tag{4}$$

$$l = \begin{bmatrix} x_0 - x \\ y_0 - y \end{bmatrix} \tag{5}$$

因为垂线偏差量很小, 所以, 我们可以用 GPS 测得的大地经纬度作为初始天文坐标值, 即得出误差系数矩阵 A 中的 φ_0, α_0 , 再令 θ_0 等于 $0^\circ \sim 90^\circ$ 中的任意值. 根据初始值用式(1)求出第 i 颗恒星的理论坐标 x_{0i}, y_{0i} 结合它的实测坐标值 x_i, y_i , 代入式(5)求得 l_i ; 再用式(4)求得 A_i , 根据多颗恒星计算出来的结果按如下方式合并:

$$A = [A_1 \ A_2 \ \dots \ A_i \ \dots]^T, \tag{6}$$

$$l = [l_1 \ l_2 \ \dots \ l_i \ \dots]^T$$

把 A, l 代入式(3), 就可以计算出三个未知量的偏差向量 ΔX , 再把此偏差迭加到初始值中求得逼近的解; 再把上一步求得的结果当作初始值, 重复上面的过程, 一般重复 8 次后就可以得出非常精确的解, 再根据(1')求出天文经纬度.

在本文中, 计算所用的恒星赤经、赤纬都是采用曝光时的视位置, 它已经考虑到了岁差、章动、恒星自行、周年光行差和周日光行差等偏差的影响. 以后我们所用到的恒星赤经、赤纬都是指视位置. 视位置可以按天文年历计算, 也可以用电子计算机计算. 像片坐标也是改正大气折光差和矫正物镜畸变以后的修正值.

2 系统结构

垂线偏差测定系统主要由 CCD 传感器、光学系统、CCD 时钟驱动电路、控制及数据交换系统、图象采集卡、计算机、置平系统、GPS 装置、电源模块组成.

系统框图如图 2.

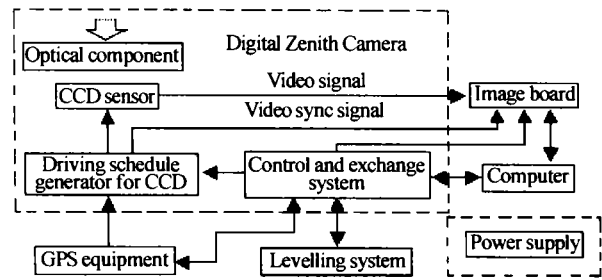


图 2 垂线偏差测定系统结构图

Fig. 2 The Structure of measurement of vertical deflections

GPS 装置采用差分模式, 测得测站点的椭球坐标值 L, B , 精度在 1 m 内; 并且, 将接收到的精确时间信号用作 CCD 时钟驱动电路的脉冲参考信号, 以及确定精确的曝光时刻, 并转换为 GAST (Greenwich Apparent Sidereal Time).

置平系统由常平架、陀螺平台及电子水准器组成, 它使摄影仪垂直指向天顶; 为了确定摄影时刻的方位 ($0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$), 此系统还包括寻北仪; 并且, 将“方位信号”、“置平修正信号”传送到控制及数据采集系统.

CCD 时钟驱动电路主要用来产生 CCD 传感器的各种工作脉冲, 积分时间的确定由控制及数据交换系统控制, 为了使图象采集卡获得的数据与 CCD 像元一一对应, 合成标准的视频信号, 还必须引出外部同步信号标准.

CCD 传感器将光学系统所成的天空星象转换为电信号, 形成原始的模拟图象信号.

图象采集卡是将 CCD 传感器的原始的图象信号进行预处理、合并、调整、转换为计算机能识别、处理的数字恒星影像.

控制及数据交换系统主要起各分系统的协调、控制作用. 开始时, 它采集置平系统的“置平准备好”信号, 得到确认后, 再采集并寄存“方位信号”和“置平修正信号”; 接着, 向 GPS 装置发送“准备好”信号, 接受并寄存椭球坐标值, 同时向 CCD 时钟驱动电路发送“开始工作信号”以及“积分时间信号”, 记下 CCD 工作的时刻, 待一定时间延迟后, 向图象采集卡发送“采集开始信号”; 并且将前面采集的各种信号都送到计算机; 改变方位, 得到计算机发出的“下一方位测量”信号后, 继续测量, 直到此测站点的四个方位都测量完毕为止.

计算机向控制及数据交换系统发送曝光时间信号和整个系统开始工作指令, 待其他分系统完成工作后, 根据从控制及数据交换系统采集的置平修正信号、曝光时刻信号, 并且对数字恒星影像进行图象分割、目标搜索、细分定位、计算、修正, 解算后得到

测站的天文坐标。如此测得测站点的一个方位的天文坐标,然后再测量其他三个方位的天文坐标,作均值处理和换算后得到最终测站的垂线偏差。

3 图象和数据处理

为了获得高精度的测量值,必须拍摄到足够多的恒星(不少于 15 颗),它可以通过提高探测星等和视场范围来保证。当探测极限星等为 7 等时,根据中国大地测量星表(CGSC)对我国境内星数分布统计,要求光学系统的矩形视场角大于 10° ;为了保证系统的高分辨率、高精度就需要采用长焦光学系统和大面阵 CCD 芯片,获得的数字图象也就非常大。对于本系统,恒星影像个数少,图象面大,分布密度低,如果采用传统的星点搜索法,必须花费大量的时间,这严重影响了系统的工作效率和可靠性。我们充分利用系统自身先验知识,提出了新的基于图象分割的星点搜索法,剔除了不必要的搜索面元。具体步骤如下:

- 1) 参考基本数学模型,把 GPS 测得的大地坐标 L, B 用作视轴的天球坐标 α, δ 。
- 2) 以 α, δ 为中心,以系统的视场角为视场范围,在电子星表中找出足够多的恒星($S_1 \dots S_n$)。
- 3) 根据式(1)计算出各星点中心的靶面坐标值 $(x_1, y_1) \dots (x_n, y_n)$ 。
- 4) 在实际拍摄星影像时,需要在四个方向上摄影,各方向的投影坐标值有所不同;所以,必须根据拍照时的具体方位,对步骤 3) 的靶面坐标值进行转换,其中 0° 时表示 CCD 的 Y 轴指向正北, X 轴指向正东,以顺时针旋转方式变换方位。具体坐标转换见表 1。此时可能因为旋转轴的定位误差等,会有 1 个像元的偏差。

表 1 坐标变换

	0°	90°	180°	270°
X-axis	$x = x_0$	$x = y_0$	$x = N - x_0$	$x = N - y_0$
Y-axis	$y = y_0$	$y = N - x_0$	$y = N - y_0$	$y = x_0$

注: x_0, y_0 为原始数据计算出来的坐标值, x_1, y_1 为转换后的坐标值。

由于垂线偏差的影响,使上面的靶面坐标值与实拍的恒星坐标不一致;但是因为垂线偏差的幅值是有限的,它引起的星像的坐标偏差也就有限。取焦距 460 mm, 矩形视场角 10° , 垂线偏差幅值 $30''$, 通过模拟计算得星点影像坐标的最大偏移量小于 10 个像元, 分别以步骤 4) 得出的坐标值 $(x_1, y_1) \dots (x_n, y_n)$ 为中心, 加上旋转轴引起的半径为 1 像元偏差, 垂线偏差引起的半径为 10 像元偏差, 再加上半径为 3 像元的星点大小及其他偏差影响;可以

估计、划分出 n 个 30×30 像元的子星图, 各星点落在子星图中, 实际应用时完全可以用稍大一点的子图。

5) 有可能多颗恒星落在同一个子图内, 在搜索时会发生对同一颗恒星和同一图象区域搜索多次的情况; 所以有必要对重叠的子图合并, 重新划分成多个独立的子图。

6) 在子图中, 检测每个像素的邻域并对灰度变化率进行量化, 判断该点是目标星还是噪声点, 这样提高了算法对目标及背景变化的适应能力。找到星点后, 对该星点采用 3×3 像元修正型矩心(质心)法进行细分、定位^[5]; 然后对此子图象的灰度值置零, 使下一行搜索时不重复计算已经解算出的此目标。

这种新的搜索方法, 对于双星和远离星点的噪声影响有很好的抑制能力。还可以根据具体位置的星空图, 挑选高质量的恒星, 它对于后面的星图的自动识别有很好的指导作用。对伪星、非星表内星、星表内未拍星、较亮的星云等干扰有很大的抑制作用。

获得恒星的测量坐标值后, 以星对角距^[3](星与星之间与地球的球心角表示) 为识别的基本特征, 多颗恒星之间的几何关系为识别特征, 与参考星图匹配^[2], 从而识别出所拍摄的恒星标号, 一般星图识别时间不超过 0.5 s ^[4]。利用星表中恒星的天球坐标值 α, δ , 根据式(1) ~ (5) 和 (1'), 反解出测站的天文坐标 λ, φ , 计算测站点的垂线偏差。

4 结论

考虑到系统对精度的要求及天空中恒星分布的统计数据; 拟采用仙童公司的 CCD595 面阵帧转移图象传感器, 像敏单元个数为 9216×9216 , 像元尺寸为 $8.75 \mu\text{m} \times 8.75 \mu\text{m}$, CCD 面阵尺寸为 $80.64 \text{ mm} \times 80.64 \text{ mm}$, 光学系统的焦距为 460 mm, 光学口径为 63 mm, 矩形视场角为 10° 。如果用传统方法搜索, 对这样的大图象做最基本的运算、细分、定位至少需要 2.8 个小时(用 MATLAB 模拟); 采用新方法, 包括查表、分割图象、细分定位等步骤在 15 s 内能完成, 其效率是显然的。考虑实际误差一般稍大于理论误差, 我们利用上面的数据做了大量的软件模拟。在纬度为 $53^\circ 13' 42''$ 处的视场角范围内, 随机生成 15 颗恒星的天文坐标值, 据此生成量测坐标值(由于星移的影响, 寻北后, 弥散斑大小为 4×3 像元), 加入各种影响测量坐标值的误差源, 通过 300 次的精度模拟分析得: 恒星影像的细分、定位精度达到 $1/12$ 像元, 纬度误差方差值 $0.2037''$, 经度误差方差值 $0.3650''$ (理论上与纬度有关); 由误差

的传递性可知,最终系统的总体精度与纬度精度一致,优于 $0.3''$ 。所以,采用 CCD 天顶摄影技术达到了快速、精确地测定垂线偏差的目的。

参考文献

- 1 Hirt C, Buerki B. The Digital Zenith Camera-A New High-Precision And Economic Astrogeodetic Observation System for Real-Time Measurement of Deflections of the Vertical. Proceed. of the 3rd Meeting of the International Gravity and Geoid Commission of the International Association of Geodesy, Thessaloniki, Greece (to published)
- 2 Quine B, Durrant-Whyte H F. Rapid star pattern identification. *Proceeding of SPIE*, 1996, **2739**: 351 ~ 360
- 3 Scholl M S. Star field identification algorithm-performance verification using simulate star field. *Proceeding of SPIE*, 1993, **2019**: 275 ~ 290
- 4 海峰,袁家虎,毛羽国. 快速星图匹配算法的研究. *光电工程*, 1998, **25**(6): 70 ~ 74
Hai F, Yuan J H, Mao Y G. *Opto-Electronic Engineer*, 1998, **25**(6): 70 ~ 74
- 5 陈邓云,沈忙作. 阵列探测器的像点亚像素定位精度. *光学学报*, 1993, **13**(10): 953 ~ 955
Chen D Y, Shen M Z. *Acta Optica Sinica*, 1993, **13**(10): 953 ~ 955
- 6 Mikhail E M, Gracie G. 游祖吉等译. 测量数据分析与平差. 北京:测绘出版社, 1987. 179 ~ 189
Mikhail E M, Gracie G. The analysis and adjustment of the measuring data. Beijing: Measuring publishing company, 1987. 179 ~ 189

The Image Processing in The Digital Zenith Camera

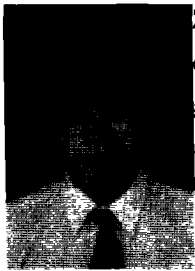
Zeng Zhixiong, Hu Xiaodong, Gu Lin, Li Hua

Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710068

Received date: 2003-04-07

Abstract The efficiency of measurement of vertical deflections was low-level due to the fact that the determination of astronomical coordinates still was difficult. In order to improve it, the digital zenith camera composed of a large-area CCD came into use. The basic principle of measurement mentioned: Firstly practice photography to zenith, searching and subdividing the objects in the sidereal image, computing the astronomical coordinate of the measure position, then combining with the geodetic coordinates measured GPS-equipment (Global Position System), lastly calculate the vertical deflections. With the system itself information, a new arithmetic advanced about rapidly searching for sidereal. This method is verified using process simulation.

Keywords Vertical Deflection; Image Processing; Astronomical Measurement Technique; Digital Zenith Camera



Zeng Zhixiong was born in Hubei, China. He received the Bachelor degree in the Department of Electric Technic & Computer Science in Hubei Polytechnic University in 2000. Now he is a graduate in the Xi'an Institute of Optics & Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, and majoring in electronics and communication.