

基于共有星的快速星图识别方法

杨 上,周召发,刘先一

(火箭军工程大学兵器发射理论与技术国家重点学科实验室,陕西 西安 710025)

摘 要:提高星图识别的快速性对于提高数字天顶仪的定位效率具有重要意义。传统的数字天顶仪星图识别需要对旋转拍摄的每幅星图上所有星点单独进行识别,致使星图识别效率较低。考虑到星图间存在着共有星,对此提出了一种基于共有星的星图识别方法。首先对定位循环中间位置拍摄的两幅星图单独进行识别,然后通过建立倾斜修正模型消除了实际拍摄状态下 CCD 平面与水平面之间的小倾角,并在此基础上建立了星点归算模型,以此找出剩余星图与已识别星图间的共有星。实验结果表明:通过星点归算模型找出剩余星图与已识别星图间共有星后,再对新增星进行识别,大大提高了星图识别的效率。

关键词:数字天顶仪;共有星;星图识别

中图分类号:V488.22 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2018.11.020

Fast star identification method based on common star

YANG Shang, ZHOU Zhao-fa, LIU Xian-yi

(State Key Discipline Laboratory of Armament Launch Theory and Technology,
Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China)

Abstract: Improving the rapidity of star identification is of great importance for improving the positioning efficiency of digital zenith camera. The traditional star identification needs to identify all the star points on each star image taken by rotation, which results in the low efficiency of star identification. Considering the existence of a common star between the star maps, a star identification method based on common stars was proposed. First, the two star images in the middle position of Positioning cycle were identified. Then, by setting up the tilt correction model, the small tilt between the CCD plane and the horizontal plane was eliminated. On the basis of tilt correction model, the Star reduction model was established, which found out the common stars between the residual star maps and the recognized star map. The experimental results showed that: The efficiency of star map recognition was greatly improved by identifying newly added stars alone.

Key words: digital zenith camera; common stars; star identification

1 引 言

数字天顶仪是一种高精度天文定位仪器,在大地天文测量领域得到广泛应用^[1-4]。星图识别为数字天顶仪定位提供起算数据,传统数字天顶仪的星图识别是采用三角形星图识别与坐标转换

结合方法对旋转拍摄的16幅星图进行识别^[5]。经大量实验发现,数字天顶仪在一次定位循环拍摄的16幅星图中存在着大量的共有星,即同一恒星会成像在多幅星图中的情况,若对拍摄的16幅星图上所有星点都单独进行识别,增加了星图识

作者简介:杨 上(1993-),男,硕士研究生,主要从事天文定位定向研究。E-mail:1306676498@qq.com

通讯作者:周召发(1971-),男,博士,教授,主要从事定位定向与基准传递技术研究。E-mail:1306676498@qq.com

收稿日期:2018-05-03;修订日期:2018-07-02

别的冗余量,降低了星图识别的效率,进而增加了数字天顶仪的定位所需的时间。对此本文提出了一种基于共有星的快速星图识别方法。该方法的核心思想首先对一个定位循环中在位置 9 和位置 10 拍摄的星图单独进行三角形星图识别,其次建立星点归算模型,找出剩余位置的星图与已识别星图间的共有星,最后对剩余星图上新增星单独进行识别,以此提高星图识别的速度。

本文首先介绍了单幅星图的三角形识别原理,其次通过构造辅助坐标系建立了倾斜修正模型,消除精调平状态下的小倾角,再在此基础上建立了星点归算模型,找出星图间的共有星,最后通过实验数据验证该星图识别方法的合理性。

2 数字天顶仪星图识别原理

数字天顶仪进行星图识别的导航星表是依巴谷星表,依据导航星表可得到恒星的赤经赤纬信息,再经视位置计算和时间补偿可得到恒星的天文经度 α 、天文纬度 δ ,则恒星的天球切平面坐标 (ξ, η) 可按式(1)计算:

$$\begin{aligned} \xi_i &= \frac{\cos\alpha_0 \tan\delta_i - \sin\alpha_0 \cos(\alpha_i - \alpha_0)}{\sin\delta_0 \tan\delta_i + \cos\delta_0 \cos(\alpha_i - \alpha_0)} \\ \eta_i &= \frac{\sin(\alpha_0 - \alpha_i)}{\sin\delta_0 \tan\delta_i + \cos\delta_0 \cos(\alpha_i - \alpha_0)} \end{aligned} \quad (1)$$

其中, (α_0, δ_0) 为 GPS 提供的概略天文经纬度。

恒星的理论 CCD 像点坐标为:

$$\begin{aligned} X_i &= f \frac{\cos\alpha_0 \tan\delta_i - \sin\alpha_0 \cos(\alpha_i - \alpha_0)}{\sin\delta_0 \tan\delta_i + \cos\delta_0 \cos(\alpha_i - \alpha_0)} \\ Y_i &= f \frac{\sin(\alpha_0 - \alpha_i)}{\sin\delta_0 \tan\delta_i + \cos\delta_0 \cos(\alpha_i - \alpha_0)} \end{aligned} \quad (2)$$

恒星的理论像距可按下式计算:

$$d_{ij} = \sqrt{(X_i - X_j)^2 + (Y_i - Y_j)^2} \quad (3)$$

理想情况下, CCD 平面为水平面,恒星光通过数字天顶仪的焦距成像在 CCD 平面上,假设像点坐标为 (x_m, y_m) , (x_n, y_n) ,则恒星像点像距按下式计算:

$$d_{mn} = \sqrt{(x_m - x_n)^2 + (y_m - y_n)^2} \quad (4)$$

若恒星理论像点组成的三角形与恒星像点组成的三角形满足下式则匹配成功:

$$\begin{cases} |d_{ij} - d_{mn}| \leq \varepsilon \\ |d_{ik} - d_{mh}| \leq \varepsilon \\ |d_{jk} - d_{nh}| \leq \varepsilon \end{cases} \quad (5)$$

其中, ε 为测量不确定度。

若对数字天顶仪拍摄的星图都采用三角形星图识别,则计算量较大,原因在于观测三角形与导航三角形容量较大^[6],降低了数字天顶仪星图识别效率,对此数字天顶仪采用三角形识别与坐标转换相结合的方式对星图识别,识别过程如下:

(1) 采用三角形星图识别原理识别出 6 颗亮星。

(2) 利用已识别出亮星的理论像点坐标与 CCD 像点坐标,建立仿射变换模型^[7],如下式:

$$\begin{cases} x_i = a_1 X_i + b_1 Y_i + c_1 \\ y_i = a_2 X_i + b_2 Y_i + c_2 \end{cases} \quad (6)$$

其中,仿射变换模型的参数可由最小二乘法计算得到。

(3) 计算数字天顶仪视场内恒星的理论像点坐标。

(4) 利用式(6)计算出转换后的恒星像点坐标 (x'_i, y'_i) 。

(5) 将转换后的像点坐标与 CCD 像点坐标进行匹配,若满足下式则匹配成功:

$$\begin{cases} |x_i - x'_i| \leq \varepsilon \\ |y_i - y'_i| \leq \varepsilon \end{cases} \quad (7)$$

3 倾斜修正

传统的数字天顶仪星图识别是在精密整平状态下进行的,认为 CCD 平面是水平面,但即使在精调平状态下其 CCD 平面与水平面仍存在 $\pm 10''$ 内的小倾角^[8],由下文第 4 节可知,建立的星点归算模型与 CCD 北向基准坐标有关,而北向基准坐标的建立与水平面为基准^[2],为此需要修正实际拍摄状态下存在的小倾角。

实际拍摄状态下,由文献[9]和文献[10]可知,经过较标的倾角仪敏感轴组成的平面与 CCD 平面平行,故可通过倾角仪测出 CCD 图像坐标系两坐标轴与水平面之间的夹角,假设 CCD 图像坐标系两坐标轴与水平面之间的夹角 θ_1, θ_2 ,可按下式计算得到:

$$\begin{cases} \theta_1 = m \cos\phi + n \sin\phi \\ \theta_2 = m \sin\phi - n \cos\phi \end{cases} \quad (8)$$

式中, m, n 为倾角仪的输出值; ϕ 为倾角仪 m 轴与 CCD 图像坐标系 x 轴之间的夹角。

如图 1 所示,实线框为拍摄位置的水平面,坐

标系 $O - x_T y_T z_T$ 为实际拍摄状态下 CCD 图像坐标系,其中 CCD 图像坐标系的坐标原点在 CCD 敏感器的中心,两坐标轴分别与 CCD 敏感器的两条边平行。 OC, OD 为 Ox_T 轴与 Oy_T 轴在水平面上的投影, OC, OD 不一定垂直,则 $\angle COx_T = \theta_1$, $\angle DOy_T = \theta_2$, AB 为实际拍摄状态下的 CCD 平面与水平面之间的交线。

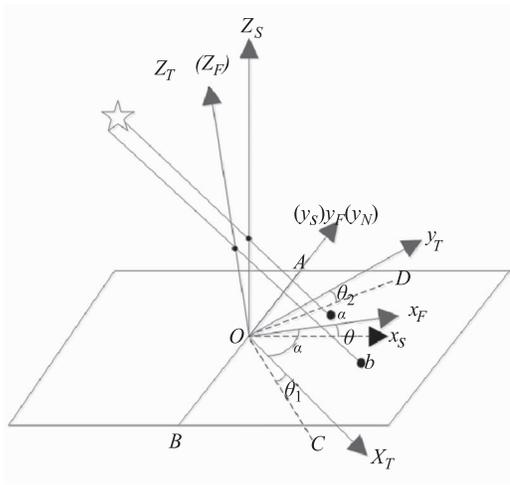


图1 CCD 倾斜修正
Fig.1 CCD tilt correct

由二面角的相关定理,可得实际拍摄状态下的 CCD 平面与水平面之间构成的二面角 θ 为:

$$\theta = \arcsin(\sqrt{\sin^2 \theta_1 + \sin^2 \theta_2}) \quad (9)$$

如图 1 所示,构造辅助坐标系 $O - x_F y_F z_F$,其中 Ox_F 轴在实际拍摄状态下的 CCD 平面内且 $Ox_F \perp AB$, Oy_F 轴沿 AB 方向, Oz_F 轴与 Ox_F 轴和 Oy_F 轴符合右手定则, Ox_S 轴为 Ox_F 轴的投影,则 $\angle x_F Ox_S = \theta$ 。设 $\angle x_F Ox_T = \alpha$,由二面角的相关定理可得:

$$\alpha = \frac{\pi}{2} - \arcsin\left(\frac{\sin \theta_2}{\sin(\sqrt{\sin^2 \theta_1 + \sin^2 \theta_2})}\right) \quad (10)$$

根据方向余弦坐标变换原理可得存在方向余弦矩阵 C_1 ,可将坐标系 $O - x_T y_T z_T$ 中的星点坐标转换到坐标系 $O - x_F y_F z_F$ 中,即:

$$\begin{bmatrix} x_F \\ y_F \\ 0 \end{bmatrix} = C_1 \begin{bmatrix} x_T \\ y_T \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha & 0 \\ -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_T \\ y_T \\ 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

以水平面为基准,建立水平状态下的坐标系 $O - x_S y_S z_S$,其中 Ox_S 轴为 Ox_F 轴的投影, Oy_S 轴与 Oy_F 轴重合, Oz_S 轴与 Ox_S 轴和 Oy_S 轴满足右手定则,则辅助坐标系 $O - x_F y_F z_F$ 可绕 Oy_F 旋转 θ 角与坐标系

$O - x_S y_S z_S$ 重合,则在辅助坐标系 $O - x_F y_F z_F$ 中,存在方向矢量 $(x_F, y_F, -f)$ 满足下式:

$$\begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_F \\ y_F \\ -f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_F \cos \theta + f \sin \theta \\ y_F \\ x_F \sin \theta - f \cos \theta \end{bmatrix} \quad (12)$$

恒星位于无穷远处,发出的光为平行光,假设恒星成像在水平坐标系中的星点坐标为 $(x_S, y_S, 0)$,则存在方向矢量 $(x_S, y_S, -f)$ 满足下式:

$$\frac{x_S}{x_F \cos \theta + f \sin \theta} = \frac{y_S}{y_F} = \frac{-f}{x_F \sin \theta - f \cos \theta} \quad (13)$$

化简上式可得:

$$x_S = \frac{-f(x_F \cos \theta + f \sin \theta)}{x_F \sin \theta - f \cos \theta} \quad (14)$$

$$y_S = \frac{-f y_S}{x_F \sin \theta - f \cos \theta}$$

综上所述,通过构造辅助坐标系,依据倾角仪输出值和坐标变换原理,可得到恒星成像在水平面上的恒星像点坐标,并将式(14)称之为 CCD 像点修正模型。

4 星点归算模型

如图 2 所示,数字天顶仪旋转拍摄星图过程中,数字天顶仪在不同拍摄位置的视场存在重合,同一颗恒星可能成像在不同拍摄位置的 CCD 敏感器上。并且在拍摄过程中,CCD 平面既有地球自转引起的转动,也有数字天顶仪自身的旋转引起的转动,为建立星点归算模型,需要考虑这两种转动引起的像点 CCD 坐标的变化。

首先考虑地球自转引起 CCD 平面的转动,以水平面为基准建立 CCD 北向基准坐标系 $O - x_N y_N z_N$,其中 Oz_N 轴过 CCD 敏感器中心并与垂直轴重合, Ox_N 轴与纬线圈相切,方向指向东, Oy_N 轴与经线圈相切,方向指向北。对于两个拍摄位置,假设数字天顶仪从前一拍摄位置旋转到下一拍摄位置,CCD 北向基准坐标系由 $O - x_N y_N z_N$ 变为 $O - x'_N y'_N z'_N$,如图 2 所示。

初值时刻,水平状态下 CCD 图像坐标系 $O - x_S y_S z_S$ 与 CCD 北向基准坐标系 $O - x_N y_N z_N$ 之间存在方位角 A ,根据坐标转换原理可得:

$$\begin{bmatrix} x_N \\ y_N \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos A & \sin A & 0 \\ -\sin A & \cos A & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_S \\ y_S \\ 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

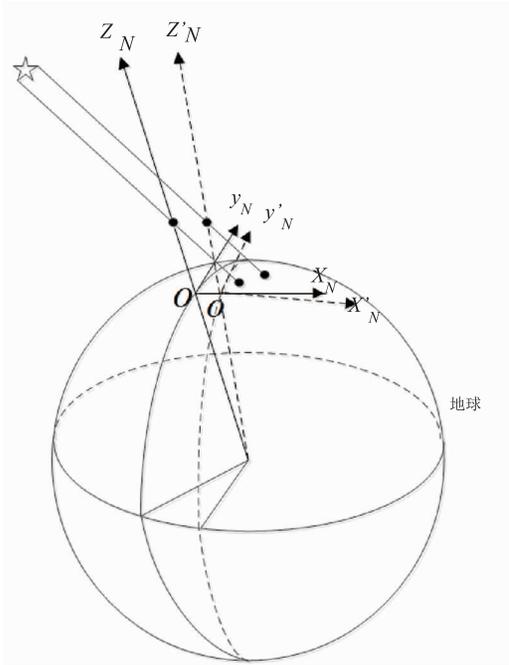


图 2 CCD 北向基准坐标系

Fig. 2 CCD north reference coordinate

其反变换为:

$$\begin{bmatrix} x_S \\ y_S \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos A & -\sin A & 0 \\ \sin A & \cos A & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_N \\ y_N \\ 0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

由第 2 节可知,在对单幅星图进行识别过程中建立了放射变换模型,其方位角 A 可由下式得到^[8]:

$$A = \arctan\left(-\frac{b_1}{a_1}\right) = \arctan\left(\frac{a_2}{b_2}\right) \quad (17)$$

在坐标系 $O-x'_N y'_N z'_N$ 中存在与地球自转轴平行的方向矢量 $u = (0, \cos\delta, \sin\delta)$, 可使坐标系 $O-x_N y_N z_N$ 绕旋转地轴旋转地球自转角 θ 后与坐标系 $O-x'_N y'_N z'_N$ 平行, 则存在四元数 Q :

$$Q = \cos \frac{\theta}{2} + \sin \frac{\theta}{2} (j \cos\delta + k \sin\delta) \quad (18)$$

式中, $\theta = w_{re} t$, w_{re} 为地球自转角速度。取 $w_{re} = 7.292115 \times 10^{-5} \text{ rad/s}$; t 为拍摄任意两幅星图间的时间间隔, 可由天顶仪测得输出; δ 为测站点的天文纬度。

令 $q_0 = \cos \frac{\theta}{2}$, $q_1 = \sin \frac{\theta}{2} \cos\delta$, $q_2 = \sin \frac{\theta}{2} \sin\delta$, 则由坐标系 $O-x_N y_N z_N$ 至坐标系 $O-x'_N y'_N z'_N$ 的方向变换矩阵 C 为:

$$C = \begin{bmatrix} 1 - 2(q_1^2 + q_2^2) & -2q_0 q_2 & 2q_0 q_1 \\ 2q_0 q_2 & 1 - 2q_2^2 & 2q_1 q_2 \\ -2q_0 q_1 & 2q_1 q_2 & 1 - 2q_1^2 \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$\text{为方便描述, 令 } C = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{bmatrix},$$

设恒星星光通过数字天顶仪的焦点成像在前一位置的 CCD 北向基准坐标系中的坐标为 $(x_N, y_N, 0)$ 。则在前一位置的 CCD 北向基准坐标系 $O-x_N y_N z_N$ 中, 像点与焦点构成的方向矢量 $r = (x_N, y_N, -f)$ 满足:

$$\begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_N \\ y_N \\ -f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_N c_{11} + y_N c_{12} - f c_{13} \\ x_N c_{21} + y_N c_{22} - f c_{23} \\ x_N c_{31} + y_N c_{32} - f c_{33} \end{bmatrix} \quad (20)$$

对于同一颗恒星, 假设恒星成像在下一位置的 CCD 北向基准坐标系中的坐标为 $(x'_N, y'_N, 0)$, 由于位于无穷远的恒星发出的星光可认为是平行光, 则在下一位置的 CCD 北向坐标系 $O-x'_N y'_N z'_N$ 中, 像点与焦点构成的方向矢量 $r' = (x'_N, y'_N, -f)$ 满足:

$$\frac{x'_N}{x_N c_{11} + y_N c_{12} - f c_{13}} = \frac{y'_N}{x_N c_{21} + y_N c_{22} - f c_{23}} = \frac{-f}{x_N c_{31} + y_N c_{32} - f c_{33}} \quad (21)$$

由上式可得恒星成像在下一位置 CCD 北向基准坐标系上的坐标为:

$$\begin{cases} x'_N = \frac{-f(x_N c_{11} + y_N c_{12} - f c_{13})}{x_N c_{31} + y_N c_{32} - f c_{33}} \\ y'_N = \frac{-f(x_N c_{21} + y_N c_{22} - f c_{23})}{x_N c_{31} + y_N c_{32} - f c_{33}} \end{cases} \quad (22)$$

坐标变换矩阵中包含未知数 δ , 由于位置 9 与位置 10 拍摄的星图已经单独识别出来, 则可得到两幅星图上的共有星, 故 δ 角可通过将位置 9 与位置 10 之间共有星的 CCD 图像坐标代入公式(21)求得。

联立公式(16)和公式(22), 可得:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos A & -\sin A \\ \sin A & \cos A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{-f(x_N c_{11} + y_N c_{12} - f c_{13})}{x_N c_{31} + y_N c_{32} - f c_{33}} \\ \frac{-f(x_N c_{21} + y_N c_{22} - f c_{23})}{x_N c_{31} + y_N c_{32} - f c_{33}} \end{bmatrix} \quad (23)$$

其次考虑数字天顶仪镜筒的旋转, 假设数字天

顶仪旋转角为 ϕ , 则:

$$\begin{bmatrix} x_s \\ y_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(A + \phi) & -\sin(A + \phi) \\ \sin(A + \phi) & \cos(A + \phi) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{-f(x_N c_{11} + y_N c_{12} - f c_{13})}{x_N c_{31} + y_N c_{32} - f c_{33}} \\ \frac{-f(x_N c_{21} + y_N c_{22} - f c_{23})}{x_N c_{31} + y_N c_{32} - f c_{33}} \end{bmatrix} \quad (24)$$

式(24)称之为星点归算模型。

综上所述,为寻找位置 1 至位置 8 拍摄的星图与位置 9 拍摄星图之间的共有星,以及位置 11 至位置 16 拍摄的星图与位置 10 拍摄的星图之间的共有星,可按如下步骤进行:

(1) 将数字天顶仪拍摄的 16 幅星图按式(11)计算得到辅助坐标系下的 CCD 图像坐标 (x_F, y_F) 。

(2) 按式算出各位置在水平状态下的 CCD 图像坐标 (x_s, y_s) 。

(3) 结合位置 9 与位置 10 得到的星图上的像点 CCD 坐标按式(24)进行计算,得到转换后的 CCD 图像坐标 (x'_s, y'_s) 。

(4) 若满足下式,则表示位置 9 与位置 10 的星图与其他位置星图间存在共有星。

$$\begin{cases} |x_s - x'_s| \leq \varepsilon \\ |y_s - y'_s| \leq \varepsilon \end{cases} \quad (25)$$

式中, ε 为给定的阈值(一般取 3pixel 左右)。

5 实验结果分析

2017 年 11 月,利用数字天顶仪采用在西安某地拍摄了大量星图,实验过程中数字天顶仪的焦距为 (600 ± 4) mm,数字天顶采用美国 FLI 公司生产的 ML16803 数码相机,CCD 敏感器为 Kodak 公司生产的 KAF-16803 型面阵 CCD。为实现对星图的识别,首先将依巴谷星表中恒星的位置信息转换拍摄时刻的视位置,在此基础上对星图进行识别,由于篇幅的限制,这里对一个定位循环的星图数据进行分析。其中表 1 为位置 9 星图识别的结果,表 2 为位置 1 星图识别的结果。

由表 1 与表 2 的星图识别结果可知,两幅星图之间的共有星为 11 颗,超过星图识别数量的 50%,由此可见星图间存在着大量的共有星。

结合公式(24),将位置 10 星图上的星点坐标归算到位置 16 上拍摄的星图上,为直观表示出两幅星图上的共有星,可得到如图 3 所示。

表 1 位置 9 星图识别结果

Tab.1 Identification results of star map 9

星号	CCD X/pixel	CCD Y/pixel	天文经度/(°)	天文纬度/(°)
54465	2326.044	141.866	109.224	35.933
54734	1160.270	1359.788	110.168	34.707
54581	1794.811	836.900	109.628	35.257
54460	2037.758	1619.858	109.215	34.639
54702	971.508	2765.432	110.059	33.491
54548	1805.843	1346.541	109.509	34.830
54567	1209.854	4048.632	109.554	32.453
54134	2614.006	3774.445	108.203	32.918
54239	2786.836	1192.592	108.532	35.125
55143	17.226	1040.984	111.406	34.766
54713	695.170	3842.965	110.1106	32.537
54369	2331.024	1528.99	108.933	34.766
54183	2456.409	3913.857	108.334	32.775
54772	1287.867	265.495	110.274	35.649
54165	3114.304	774.731	108.276	35.530
54491	1855.966	2074.954	109.307	34.225
55015	303.497	1386.752	111.036	34.529
54119	2933.680	2226.359	108.177	34.275
54086	2992.809	2391.118	108.085	34.146
53801	3886.970	2269.725	107.194	34.388
54084	3141.046	1640.252	108.079	34.804
54936	510.482	1424.854	110.817	34.535
54471	1815.891	2578.583	109.245	33.794

表 2 位置 1 星图识别结果

Tab.2 Identification results of star map 1

星号	CCD X/pixel	CCD Y/pixel	天文经度/(°)	天文纬度/(°)
53426	2003.187	3773.025	107.636	33.43
53229	3013.279	3785.866	107.031	34.137
53377	2614.518	3577.193	107.444	33.958
53673	1387.612	3263.346	108.426	33.24
53525	3444.169	2393.39	107.972	35.122
53305	2816.214	3671.145	107.245	34.055
53986	3809.749	563.988	109.361	36.26
54134	317.111	2333.833	109.828	32.918
54471	620.506	928.456	110.87	33.794
54491	1010.267	606.747	110.932	34.225
54460	1463.807	420.687	110.84	34.64
54239	2291.961	661.747	110.157	35.125
54119	1651.49	1486.476	109.803	34.276
54086	1574.282	1643.557	109.71	34.146
53801	2283.304	2201.104	108.819	34.388
54369	1733.178	568.247	110.558	34.766
54548	1498.79	63.711	111.135	34.83
54183	107.267	2317.66	109.959	32.775
53726	3977.316	1324.939	108.589	36.016
53563	4008.855	1898.608	108.067	35.762

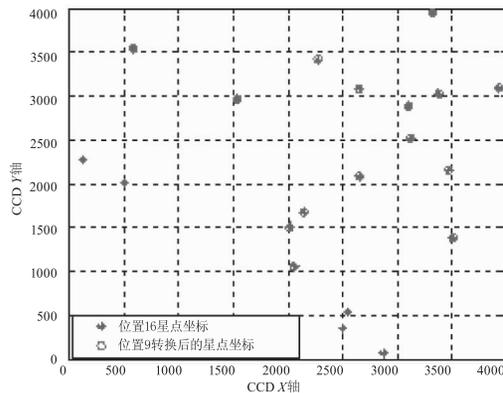


图3 共有星

Fig. 3 Common stars

由图3分析可知,位置10与位置16拍摄的星图上存在14颗共有星,且共有星的分布较为集中。其中将位置10星图上的共有星按式转换后,与位置16上共有星的CCD图像坐标相比,其中 X 坐标最大相差2.782 pixel, Y 坐标最大相差2.629 pixel, X 坐标与 Y 坐标最大差值均不超过3 pixel,由此可知由式(24)构造的坐标归算模型满足寻找星图间共有星的需求。

为进一步说明星图间存在着共有星,再任意选取一个定位循环拍摄的星图进行分析,将位置9星图上星点坐标归算到顺时针拍摄的8幅星图上来寻找与星图1至星图8与星图9的共有星,将位置10星图上的星点归算到逆时针拍摄的6幅星图上来寻找与星图11至星图16之间的共有星,如表4所示。

表4 共有星的数量

Tab. 4 The number of common star

	星图 1	星图 2	星图 3	星图 4	星图 4	星图 6	星图 7	星图 8
共有星/颗	15	16	16	17	18	19	20	21
	星图 11	星图 12	星图 13	星图 14	星图 15	星图 16		
共有星/颗	19	19	17	16	15	14		

由表4可知,与星图8之间的共有星最少15颗,与星图10之间的共有星最少为14颗。在实验过程中,利用数字天顶仪拍摄的单幅星图识别的恒星数量为25颗左右,通过坐标归算模型找出星图间的共有星,再对剩余的新增星单独进行识别,将大大提高星图识别的准确性。例如,假设一幅星图上有 n 颗观测星点,则可以组成 C_n^3 个观测三角形,有 n 颗导航星与其匹配,则可以组成 C_n^3 个导航三角形,并且假设每一个观测三角形需要与每次匹配后剩余的所有导航三角形匹配一次,那么对星图上所有的星点组成的观测三角形进行匹

配,需要进行 $\left(\sum_{i=0}^{\frac{n(n-1)(n-2)}{6}} C_n^3 - i\right)$ 次匹配。若采用星点归算模型找出共有星后,假设存在 j 颗共有星,则对剩余的 $(n-j)$ 颗新增星进行识别,则需要

进行 $\left(\sum_{i=0}^{\frac{(n-j)(n-j-1)(n-2)}{6}} C_{n-j}^3 - i\right)$ 次匹配。在本次实验定位循环中,位置16提取出21颗观测星,与位置10之间存在14颗共有星,若对所有星点单独进行识别需要构建1330个观测三角形,并且需进行

883785次匹配;若提取出14颗共有星后,只需要构建35个观测三角形,只进行45920次匹配,相比于原来,匹配次数大大减少,由此可以看出星图识别的速度得到较大的提高。

6 结论

通过建立星点归算模型,能够依据位置9与位置10拍摄星图上星点信息找出其他星图上的共有星,单独对其他星图的新增星进行识别,将大大减少匹配三角形的个数和匹配的次数,提高星图识别的速度。

参考文献:

- [1] WANG Bo, TIAN Lili, WANG Zheng, et al. The image and data processing in digital zenith camera[J]. Chin. Sci. Bull, 2014, 59(12): 1100-1107. (in Chinese)
王博,田立丽,王政,等. 数字化天顶望远镜观测图像及数据处理[J]. 科学通报, 2014, 59(12): 1100-1107.
- [2] GUO Min, ZHANG Hongyin. Application of CCD Digital Photography in Astronomical Positioning Measurement [J]. Geomatics Technology and Equipment. 2005, 7(1): 28-29. (in Chinese)
郭敏,张红英. CCD数字摄影在天文定位测量中的应

- 用探讨[J]. 测绘技术装备, 2005, 7(1): 28 - 29.
- [3] ZHANG Xinshuai, ZHOU Zhaofa, HUANG Xianxiang. Improved positioning method for digital zenith camera [J]. Infrared And Laser Engineering, 2015, 44(4): 1254 - 1259. (in Chinese)
张新帅, 周召发, 黄先祥. 改进的数字天顶仪定位方法 [J]. 红外与激光工程, 2015, 44(4): 1254 - 1259.
- [4] LIU Xianyi, ZHOU Zhaofa, ZHANG Zhili, et al. Improvement of star identification based on star trace in images [J]. Measurement, 2017, 4(6): 158 - 163.
- [5] ZHAI Guangqin, Ai Guibin. Digital zenith camera astronomical positioning measurement of project implementation [J]. Journal of Geomatics Science and Technology, 2014, 31(3): 232 - 235. (in Chinese)
翟广卿, 艾贵斌. 数字天顶摄影天文定位测量的工程实现 [J]. 测绘科学技术学报, 2014, 31(3): 232 - 235.
- [6] ZHANG Guangjun. Star Identification [M]. Beijing: Nation Defence Industry Press, 2011. (in Chinese)
张广军. 星图识别 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.
- [7] LIU Xianyi, ZHOU Zhaofa, ZHANG Zhili, et al. Research on the Transformation of Coordinates Astronomical Fixation [J]. Electronics Optics & Control, 2016, 23(1): 11 - 14. (in Chinese)
- 刘先一, 周召发, 张志利, 等. 基于天文定位的坐标转换方法研究 [J]. 电光与控制, 2016, 23(1): 11 - 14.
- [8] ZHANG Xihui, ZHOU Zhaofa, LIU Xianyi, et al. Analysis of the fast positioning method of digital zenith camera in tilt state [J]. Infrared And Laser Engineering, 2018, 47(2): 02170021 - 02170026. (in Chinese)
张西辉, 周召发, 刘先一, 等. 倾斜状态下数字天顶仪快速定位方法分析 [J]. 红外与激光工程, 2018, 47(2): 02170021 - 02170026.
- [9] ZHOU Zhaofa, LIU, Xianyi, ZHANG Zhili, et al. Research on Two-axis Tilt Sensor Based on Digital Zenith Camera [J]. Acta Photonica Sinica, 2015, 44(8): 08120021 - 08120026. (in Chinese)
周召发, 刘先一, 张志利, 等. 基于数字天顶仪的双轴倾角研究 [J]. 光子学报, 2015, 44(8): 08120021 - 08120026.
- [10] LIU Xianyi, ZHOU Zhaofa, ZHANG Zhili, et al. Calibration of inclinometer parameters in digital zenith camera [J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24(9): 2325 - 2331. (in Chinese)
刘先一, 周召发, 张志利, 等. 数字天顶仪中倾角仪参数的标定 [J]. 光学精密工程, 2016, 24(9): 2325 - 2331.