

运动目标视觉跟踪测量系统与场地坐标系的快速统一方法

郑学汉^{1,2}, 魏振忠¹, 张广军¹

- (1. 北京航空航天大学 精密光机电一体化技术教育部重点实验室, 北京 100191;
2. 山东建筑大学 信息与电气工程学院, 山东 济南 250101)

摘要: 车载移动式视觉跟踪与测量系统在实际应用中, 快速便捷地进行视觉系统与场地坐标系的全局统一是关键技术。结合视觉系统与现场特点, 阐述了系统标定原理, 给出了视觉跟踪与测量系统相对于场地坐标系转换数学模型。该方法的基本思路是转台视轴分别指向场地坐标系内的两个控制点, 根据两点对应的俯仰角、方位角及距离确定两坐标系的转换关系。仿真分析和实验结果表明: 角度和距离精度分别达到 0.03° 和 0.52% 。该方法便捷、高效, 对移动式视觉测量系统坐标系快速统一有实用价值。

关键词: 位姿测量; 转台; 坐标系快速统一

中图分类号: TP391.41 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)07-2175-07

Expeditions calibration algorithm of visual tracking and measurement system with field coordinate system for moving target

Zheng Xuehan^{1,2}, Wei Zhenzhong¹, Zhang Guangjun¹

- (1. Key Laboratory of Precision Opto-mechatronics Technology, Ministry of Education, Beihang University, Beijing 100191, China;
2. School of Information and Electrical Engineering, Shandong Jiangzhu University, Jinan 250101, China)

Abstract: Expeditious calibration of vision measurement system with field coordinate system is fundamental and crucial, especially for movable visual tracking and measurement system. The calibrating principle of coordinate transformation was elaborated based on their characteristic, and mathematical model of the algorithm was proposed to calibrate the visual measurement system with field coordinate system. Two control points that parallel the axis in field coordinate were used as target. The calibrating results were computed based on azimuth and pitch angle of the visual measurement system when the line-of-sight collimated the control points. Simulation analysis and real data experiment results show that the angle error is 0.03° , and length error is 0.52% . The proposed algorithm is practical, convenient and wieldy to movable vision measurement coordinate system expeditious calibration.

Key words: pose measurement; turn-table; coordinate system expeditious calibration

收稿日期: 2014-11-12; 修订日期: 2014-12-20

基金项目: 国家自然科学基金(61340054), 北京市自然科学基金(3142012), 国家重大科学仪器设备开发专项(2012YQ140032)

作者简介: 郑学汉(1980-), 男, 博士生, 主要研究方向为计算机视觉测量。Email: zxh656@126.com

导师简介: 张广军(1965-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事光电测量、机器视觉及天体传感器等方面的研究。

Email: gjzhang@buaa.edu.cn

0 引言

运动目标运动参数的跟踪测量对于其工作状态评估、性能研究及安全保障有重要作用^[1]。采用转台带动摄像机对运动目标进行连续跟踪和测量的视觉测量系统是一种有效的解决手段。基于视觉图像计算得到的测量结果是基于摄像机坐标系的,为便于分析,通常需要将其转换到人们习惯的场地坐标系下。将系统进行车载式安装,可以有效满足目标的多种测量需求,显著提高系统跟踪测量的灵活性和适应性。因此,坐标系的统一是视觉系统就位后、测量工作开展前的首要工作。以飞行器进近着陆阶段的测量任务为例,由于受天气、目标自身状态等因素影响,往往临近着陆才能确定降落方向和观测地点,尤其是临时更改降落方向时,这不仅要求视觉系统能快速抵达观测地点,而且就位后需尽快展开工作,在数分钟内完成视觉系统与场地坐标系统一工作,且角度与距离精度分别达到 0.1° 和 0.8% 的要求。

在摄影测量学中,采用绝对定向的方法,根据地面控制点,通过迭代解算摄像机坐标系在固定坐标系的位置和方向^[2],实现摄像机与场地坐标系的统一。无论光电经纬仪移动到固定控制场的什么位置,只要用经纬仪测定三个控制点坐标,然后用摄影测量绝对定向的方法,求解两坐标系之间的旋转矩阵和坐标系中心的平移量。由于光电经纬仪中摄像机坐标系与经纬仪坐标系关系是固定的,只要光电经纬仪预先进行标定,当经纬仪的姿态确定后,摄像机的姿态也就随之确定^[3]。可实现场地坐标系、摄像机坐标系和经纬仪坐标系的统一。此类方法适用于摄像机视轴与控制场所成角度较大的应用,对于文中所述车载移动式视觉测量系统,其摄像机视轴与场地平面夹角很小,会引入较大的观测误差,导致标定的精度不高。

计算机视觉中的相机标定技术^[4],如 Tsai 的两步法^[5]及 Weng 对该法的改进^[6]、张正友的标定方法^[7]等可较高精度地实现靶标与相机之间的转换,如将靶标建立在场地坐标系内,则可以实现场地坐标系到摄像机坐标系之间的转换。根据系统工作的远距离、大空间范围等实际特点,要求靶标尺寸大且

方便布置,会存在加工难度大、现场布置耗时长以及精度难以保证等问题。

上述各种方法考虑了相机的畸变等非线性因素,采用迭代或者非线性寻优的解算方法,经过长期的实践检验,具有较高精度和普适性。但是,对于车载移动式的视觉跟踪与测量系统,尤其是面对要求快速部署的应用时,在方便性、快速性和精度等方面很难满足坐标系快速转换要求。

1 系统工作原理

车载移动式视觉跟踪与测量系统可以根据需要在场地坐标系中移动,满足运动目标的多种测量需求。因目标运动速度快,往往需要快速的部署并展开测量。涉及目标坐标系 $Ox_p y_p z_p$ 、摄像机坐标系 $Ox_c y_c z_c$ 、转台末端执行器坐标系 $Ox_r y_r z_r$ 和场地坐标系 $Ox_g y_g z_g$,如图 1 所示。

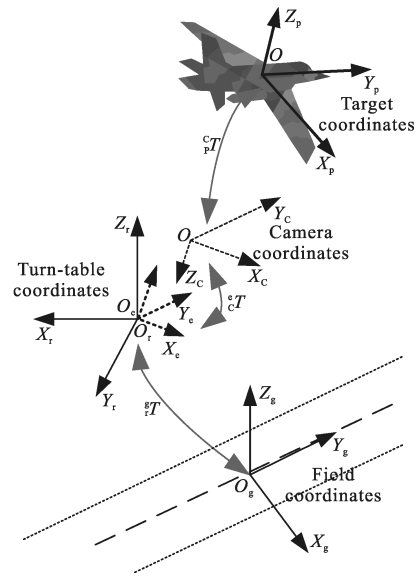


图 1 视觉跟踪与测量系统坐标系

Fig. 1 Coordinate system of visual tracking and measurement system

目标坐标系到摄像机坐标系之间的转换 T 是摄像机坐标系下的目标位姿测量结果,系统工作过程中,随着目标的运动 T 实时变化。

摄像机固定安装在转台的执行器末端(俯仰框架内),摄像机坐标系与转台执行器末端的关系 T 是固定的,可预先标定。在设备经过出厂标校的情况下,可认为摄像机的光轴 Z_c 与转台的 Y_r 轴重合。

转台坐标系与其执行器末端坐标系在转台的方位和俯仰角为零时两坐标系重合,转台的方位和俯仰轴分别为 Z 轴和 X 轴,因此两坐标系之间没有平移,只有旋转变换。在转台跟踪目标运动的过程中, ${}^c T_r$ 是变化的,通过公式可实时计算该转换关系。

转台坐标系与场地坐标系的转换 ${}^c T_r$: 车载移动式视觉跟踪与测量系统每次移位后 ${}^c T_r$ 均会发生变化,需要现场标定。

通过上述转换关系,即可将摄像机坐标系下的测量结果转换到场地坐标系下,便于对目标进行工作状态评估、性能研究及安全保障。因此,系统在场内就位后,涉及的坐标系快速统一是系统正常工作的重要前提之一,转台坐标系与场地坐标系的统一是首要任务。

2 全局统一方法

2.1 坐标系统一思路

车载移动式视觉跟踪与测量系统在场内就位后,首先对转台进行调平,调平后的转台坐标系与场地坐标系竖直向上的坐标轴平行;然后驱动转台使摄像机光轴指向场地内的控制点,根据控制点对应的转台方位、俯仰角读数以及控制点间的位置参数,可确定转台与场地坐标系的转换关系 ${}^c T_r$ 。摄像机坐标系下的测量结果 ${}^c T_p$ 即可通过预先标定的 ${}^c T_r$ 、实时变化的 ${}^c T_r$ 和现场标定的 ${}^c T_r$ 转换到场地坐标系下。

2.2 坐标系转换(统一)数学表达

由图 1 可知,摄像机坐标系下测量的结果转换到场地坐标系下的公式为^[8]:

$${}^c T = {}^c T_r^c T_p^c T_r^c T \quad (1)$$

两坐标系之间的典型转换如公式(2)所示:可以将所有转换参数采用一个齐次矩阵表达,或分解为绕三个坐标轴依次旋转使得两坐标系方向一致,然后将坐标系平移,实现转换后的两坐标系重合,完成两者之间关系的统一。

$$T = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & X \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & Y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & Z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & X \\ 0 & 1 & 0 & Y \\ 0 & 0 & 1 & Z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times$$

$$\begin{bmatrix} \cos \varphi & 0 & -\sin \varphi & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \varphi & 0 & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & \sin \phi & 0 \\ 0 & -\sin \phi & \cos \phi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos \psi & \sin \psi & 0 & 0 \\ -\sin \psi & \cos \psi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

(1) 坐标系 $Ox_r y_r z_r$ 与 $Ox_c y_c z_c$ 之间的转换关系 ${}^c T_r$: 因两坐标系原点重合,转台具有方位角和俯仰角两个自由度,假设转过的角度为 α 和 β ,则 ${}^c T_r$ 简化为:

$${}^c T_r = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \beta & \sin \beta & 0 \\ 0 & -\sin \beta & \cos \beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos \psi & \sin \alpha & 0 & 0 \\ -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

在转台跟踪目标运动的过程中, ${}^c T_r$ 随着转台角度的变化实时变化。

(2) 转台在场内定位后,其坐标系到场地坐标系之间的转换关系 ${}^c T_r$ 需要现场标定。

场地坐标系:工作场地(机场)在精度允许范围内可认为是水平面,场地内的中轴线作为场地坐标系的 Y_g 轴,其上的刻度数字标志其与端点的距离,沿 O_g 竖直向上作为 Z_g , X_g 由右手法则定义。

转台坐标系:系统工作前转台需要精确调平,转台坐标系调平后,方位转轴竖直向上作为 Z_r 轴,俯仰轴作为 X_r ,则由右手法则定义的 Y_r 为视轴方向。

Z_r 轴与 Z_g 轴均垂直水平面竖直向上,因此 Z_r 轴与 Z_g 轴平行,转台坐标系 $Ox_r y_r z_r$ 和场地坐标系 $Ox_g y_g z_g$ 之间经过一次绕 Z 轴的旋转 $\Delta\psi$ 可实现方向的统一;求解出转台坐标系在场地坐标系的位置 X 、

Y, Z 参数即可确定该转换关系, ${}^s T$ 的表达得到很大程度的简化为:

$${}^s T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & X \\ 0 & 1 & 0 & Y \\ 0 & 0 & 1 & Z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos \Delta\psi & \sin \Delta\psi & 0 & 0 \\ -\sin \Delta\psi & \cos \Delta\psi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

2.3 坐标系统一方法与步骤

视觉跟踪与测量系统固定于场地周边如图 2 所示, 距离场地中轴线 $O_g Y_g$ 距离 DE , 相对场地 $O_x y_g$ 高度 AD , 转台坐标系原点位于 A 点, D 为 A 点在水平面 $O_x y_g$ 的投影, 该水平面内的控制点为位于中轴线上的两点 $B(0, Y_B, 0), C(0, Y_C, 0)$; 在 BCD 组成的三角形中, 由 D 点向 BC 边做垂线交 BC 于点 E 。

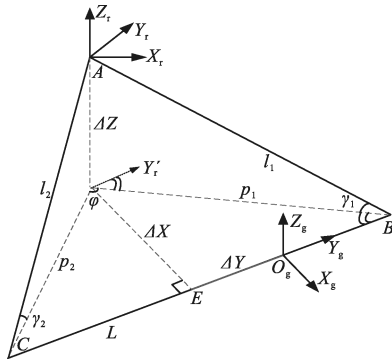


图 2 标定原理图
Fig.2 Calibration schema

已知条件: BC 两点之间的距离 L 可通过轴线上的标志快速获取, l_1, l_2 为转台、相机指向控制点 B, C (摄像机画面中心与控制点重合) 时的视轴, 其对应的方位、俯仰角分别为 α_1, α_2 和 β_1, β_2 , 则 $\varphi = |\alpha_1 - \alpha_2|$, $\gamma_1 = |\beta_1|$, $\gamma_2 = |\beta_2|$ 。

由图 2 可知, DE 为 ΔX , AD 为 ΔZ , $O_g E$ 为 ΔY , 由此可获得转台坐标原点在场地坐标系内的位置。转台坐标系与场地坐标系之间求解出 Y_g 与 Y_r 在水平面的夹角即为 $\Delta\psi$ 。

步骤(1) 由已知可得:

$$p_1 = \frac{\Delta Z}{\tan \gamma_1} \quad (5)$$

$$p_2 = \frac{\Delta Z}{\tan \gamma_2} \quad (6)$$

$$\cos \varphi = \frac{p_1^2 + p_2^2 - X^2}{2p_1 p_2} = \frac{\left(\frac{\Delta Z}{\tan \gamma_1}\right)^2 + \left(\frac{\Delta Z}{\tan \gamma_2}\right)^2 - L^2}{2 \frac{\Delta Z}{\tan \gamma_1} \frac{\Delta Z}{\tan \gamma_2}} \quad (7)$$

$$\Delta Z = \frac{\sqrt{\frac{L^2 \tan \gamma_1 \tan \gamma_2}{2 \left(\frac{\tan \gamma_2}{2 \tan \gamma_1} + \frac{\tan \gamma_1}{2 \tan \gamma_2} - \cos \varphi\right)}}}{\frac{L \tan \gamma_1 \tan \gamma_2}{\sqrt{\tan^2 \gamma_1 + \tan^2 \gamma_2 - 2 \cos \varphi \tan \gamma_1 \tan \gamma_2}}} \quad (8)$$

步骤 (2)

$$p_1 = \frac{\Delta Z}{\tan \gamma_1} = \frac{L \tan \gamma_2}{\sqrt{\tan^2 \gamma_1 + \tan^2 \gamma_2 - 2 \cos \varphi \tan \gamma_1 \tan \gamma_2}} \quad (9)$$

$$p_2 = \frac{\Delta Z}{\tan \gamma_2} = \frac{L \tan \gamma_1}{\sqrt{\tan^2 \gamma_1 + \tan^2 \gamma_2 - 2 \cos \varphi \tan \gamma_1 \tan \gamma_2}} \quad (10)$$

设: $K = \frac{L + p_1 + p_2}{2}$

三角形 BCD 的面积:

$$S = \sqrt{K(K-L)(K-p_1)(K-p_2)} \quad (11)$$

则根据点 D 在 $O_x y_g$ 平面坐标系中所处的象限:

$$\Delta X = \begin{cases} \frac{2 \cdot S}{L} & (\text{quadrant } 1, 4) \\ -\frac{2 \cdot S}{L} & (\text{quadrant } 2, 3) \end{cases} \quad (12)$$

步骤 (3)

$$\Delta Y = \begin{cases} Y_B + \sqrt{p_1^2 - \Delta X^2} & (\text{quadrant } 1, 4) \\ Y_B - \sqrt{p_1^2 - \Delta X^2} & (\text{quadrant } 2, 3) \end{cases} \quad (13)$$

步骤 (4) 点 E 所对应视轴方向方位角为 ω (按照右手定则确定旋转正方向), 当 DE 在 DB 的顺时针方向时:

$$\omega = \alpha_1 - \arccos \frac{\Delta X}{p_1} \quad (14a)$$

当 DE 在 DB 的逆时针方向:

$$\omega = \alpha_1 + \arccos \frac{\Delta X}{p_1} \quad (14b)$$

$$\Delta \psi = \begin{cases} \omega - \frac{\pi}{2} & (\text{quadrant } 1, 4) \\ \omega + \frac{\pi}{2} & (\text{quadrant } 2, 3) \end{cases} \quad (15)$$

转台的初始坐标系绕 Z 轴沿正方向旋转 $\Delta\psi$ 角度时, 与场地坐标系方向相同。由公式 (4)、(8)、(12)、(13)、(15) 得:

$${}^E T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \Delta X \\ 0 & 1 & 0 & \Delta Y \\ 0 & 0 & 1 & \Delta Z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos \Delta\psi & \sin \Delta\psi & 0 & 0 \\ -\sin \Delta\psi & \cos \Delta\psi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \Delta\psi & \sin \Delta\psi & 0 & \Delta X \\ -\sin \Delta\psi & \cos \Delta\psi & 0 & \Delta Y \\ 0 & 0 & 1 & \Delta Z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

3 仿真分析

该方法的输入条件为转台的方位角差、俯仰角以及两控制点间的距离，待求解参数为两坐标系的位置关系和两坐标系的夹角。设：

$$k_1 = \frac{\tan \gamma_2}{\sqrt{\tan^2 \gamma_1 + \tan^2 \gamma_2 - 2 \cos \varphi \tan \gamma_1 \tan \gamma_2}}$$

$$k_2 = \frac{\tan \gamma_1}{\sqrt{\tan^2 \gamma_1 + \tan^2 \gamma_2 - 2 \cos \varphi \tan \gamma_1 \tan \gamma_2}}$$

$$k_t = (1 + k_1 + k_2) \times (1 + k_1 - k_2) \times (1 - k_1 + k_2) \times (k_1 + k_2 - 1)$$

公式(11)可表达为：

$$S = \frac{L^2}{4} \sqrt{k_t}$$

则：

$$\frac{\partial \Delta X}{\partial L} = \pm \frac{1}{2} \sqrt{k_t} \quad (17)$$

$$\frac{\partial \Delta Y}{\partial L} = \pm \sqrt{k_1 - \frac{1}{4} k_t} \quad (18)$$

$$\frac{\partial \Delta Z}{\partial L} = \tan \gamma_1 \cdot k_1 \quad (19)$$

$$\frac{\partial \Delta\psi}{\partial L} = 0 \quad (20)$$

通过上述公式可知： L 与位置参数为线性关系，与角度参数无关，只要测量保持足够的精度即可。转台的方位角差、俯仰角与各个待求解参数关系是非线性的，是影响精度的主要因素，作为重点讨论。考虑到目标的飞行安全，转台安装位置与场地坐标系距离 DE 较大，高度 AD 相对 DE 小很多；所以俯仰角绝对值的取值范围为 $1^\circ \sim 10^\circ$ ，方位角差受限制较

小，取值范围为 $10^\circ \sim 110^\circ$ 。分别对俯仰角和方位角差施加标准差为 $20''$ （转台的动态角度输出精度 $20''$ ）、均值为零的高斯噪声，通过仿真观察角度改变的过程中噪声对解算结果的影响。

3.1 俯仰角变化的仿真

图 3 与图 4 横坐标为俯仰角变化范围，纵坐标分别为俯仰角施加噪声时位置相对误差和角度误差。

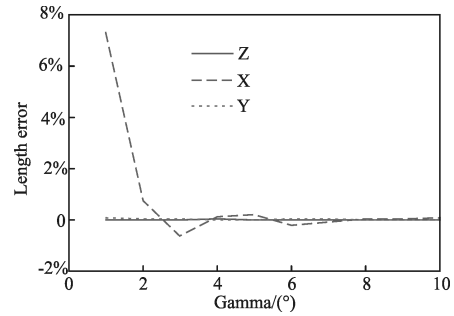


图 3 定位误差

Fig.3 Position error

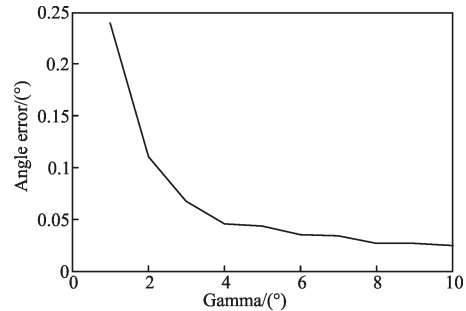


图 4 角度误差

Fig.4 Angle error

通过仿真可知，当俯仰角增大，定位误差和角度误差均显著减小，其中 X 方向误差较 Y、Z 方向对噪声更敏感；俯仰角的取值越大，误差越小。但囿于系统的具体条件，转台架设的高度有限，而为保证目标的安全，系统距离目标场地的距离较远，俯仰角取值会很小，但最好不小于 2° 。

3.2 方位角差变化的仿真

图 5 与图 6 横坐标为方位角差变化范围，纵坐标分别为俯仰角施加噪声时定位距离相对误差和角度误差。

保持固定的俯仰角，增大方位角差，方位和角度误差呈显著减小的趋势；方位角差的理想取值范围为 $40^\circ \sim 80^\circ$ 。

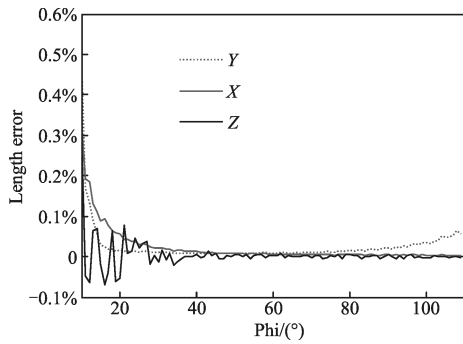


图5 定位误差

Fig.5 Position error

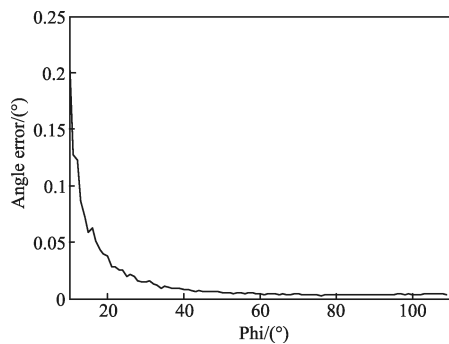


图6 角度误差

Fig.6 Angle error

转台在场地坐标系定位后,增大方位角差(增加控制点间的距离),相应地会减小俯仰角;而欲实现较大的俯仰角必然要求控制点要靠近转台观察

点,导致方位角差减小,因此实际情况较仿真的结果复杂,需要在两者之间折衷处理以获取较为满意的结果。

4 实验结果

实验测试对象为某车载运动目标视觉跟踪与测量系统,视觉系统布置于跑道的侧面。转台-场地坐标系转换关系经过 GPS 技术精确标定作为真值:两坐标系角度差为 66.1409° ,高度差为 4.544 m ,X 向距离为 65.885 m 。

预先在跑道中轴线(场地坐标系 Y 轴)上确定控制点,控制点间距离已知。系统就位、调平等工作完成后,驱动转台指向各控制点,记录相应的 α 和 β 数据。将测试数据分组按照上述公式计算,结果如表 1 所示(因 Y 向偏差误差等级与 Z 向分量相同,受篇幅所限,表 1 中未予列出)。基于两个控制点即可得出一定精度的标定结果;采用多组数据结果进行均值处理,可提高结果的稳定性和精度:角度误差约为 0.03° ,距离相对误差约为 0.5% ,满足角度误差不大于 0.1° 、距离相对误差不大于 0.8% 的要求;且上述标定工作不需其他器材、设备等辅助条件,操作简便,可在 5 min 内完成,满足视觉系统快速部署和测量的要求。

表 1 测试结果表

Tab.1 Test result

Sampled data				Angle/(°)		Altitude Z		Distance X	
L/m	Phi/(°)	Gamma1/(°)	Gamma2/(°)	Result/(°)	Error/(°)	Z	Error	X	Error
100	74.647 0	-3.117 6	-3.203 9	66.283 5	0.142 6	4.552	0.18%	65.545	-0.52%
60	49.135 8	-3.611 8	-3.653 7	66.139 1	-0.001 8	4.581	0.80%	65.610	-0.42%
20	17.364 8	-3.847 9	-3.858 9	65.912 7	-0.228 2	4.462	-1.81%	65.479	-0.62%
Average				66.111 8	-0.029 1	4.532	-0.28%	65.545	-0.52%

5 结论

文中提出了一种车载移动式视觉跟踪测量系统与场地坐标系快速统一方法,通过先调平转台,然后在场地坐标系水平面上选取两个控制点,转台驱动摄像机视轴指向控制点,记录相应的方位、俯仰角,只要已知场地坐标系水平面内控制点坐标,无需考虑图像畸变等非线性因素造成的影响以及非线性解

算和优化手段,即可快速实现转台与场地坐标系的统一。转台调平简便,可广泛应用于类似系统的坐标系快速统一。仿真和实验结果表明:合理选择控制点的分布,可满足系统标定精度要求,该方法具有良好的适应性和快速性。

当转台固定位置与场地距离远且两坐标系高差较小时,转台俯仰角很小,会显著影响标定的精度,关于这一点需要在具体实践中采用辅助技术手段予

以克服。

参考文献:

- [1] Zhang Guangjun. Vision Measurement [M]. Beijing: Science Press, 2008. (in Chinese)
张广军. 视觉测量[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [2] Wang Zhizhuo. Photogrammetry Theory [M]. Beijing: The Napping Press, 1979. (in Chinese)
王之卓. 摄影测量原理[M]. 北京: 测绘出版社, 1979.
- [3] Su Guozhong. Research on the method of aircraft pose surveying from image sequences obtained by photoelectric theodolite[D]. Wuhan: Wuhan University, 2004. (in Chinese)
苏国中. 基于光电经纬仪影像的飞机姿态测量方法研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2004.
- [4] Qiu Maolin, Ma Songde, Li Yi. Overview of camera calibration for computer vision [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2000: 43–55. (in Chinese)
邱茂林, 马颂德, 李毅. 计算机视觉中摄像机定标综述[J]. 自动化学报, 2000, 26: 43–55.
- [5] Tsai R Y. An efficient and accurate camera calibration technique for 3D machine vision[J]. *CVPR*, 1986: 364–374.
- [6] Weng J, Cohen P, Herniou M. Camera calibration with distortion models and accuracy evaluation [J]. *IEEE Trans PAMI*, 1992, 14(10): 965–980.
- [7] Zhang Z Y. A flexible new technique for camera calibration [J]. *IEEE Trans PAMI*, 2000, 22(11): 1330–1334.
- [8] Bruno Siciliano. Springer Handbook of Robotics[M]. Beijing: China Machine Press, 2013. (in Chinese)
Bruno Siciliano. 机器人手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2013.