

文章编号 1004-924X(2014)09-2312-09

机载设备安装姿态视觉校准中的靶板标定

杨博文*, 张丽艳, 叶南

(南京航空航天大学机电工程学院, 江苏南京 210016)

摘要: 基于飞机机载设备安装姿态视觉校准系统 Archer-M 的研发, 提出针对系统中姿态测量辅助靶板的标定方法。首先, 利用摄像机从不同方位拍摄靶板图像, 在相差一个尺度因子的情况下确定靶点位置关系。然后, 利用单个发光二极管(LED)靶点的多次精确移动和图像叠加的方法恢复绝对尺度, 求解靶点的相对关系。最后, 通过精确控制靶板的位置运动, 利用运动前后各坐标系之间的相对关系, 求解出“靶/座”相对位姿, 并进一步针对只用于物体姿态测量的靶板, 提出了分别沿两个垂直方向运动的简化“靶/座”标定方法, 从而大大降低了标定过程中对标定设备的要求。实验结果表明: 距离为 3~12 m 时, 姿态角度的测量标准差为 0.004~0.017°, 姿态测量精度与激光跟踪仪相当。

关键词: 计算机视觉测量; 机载设备; 姿态测量; 单目视觉; 靶板标定

中图分类号: TP391; V448.22 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20142209.2312

Target plate calibration for vision-based airborne equipment mounted attitude boresight

YANG Bo-wen*, ZHANG Li-yan, YE Nan

(College of Mechanical and Electrical Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

* Corresponding author, E-mail: yang_bw@qq.com

Abstract: On the basis of the development of a novel vision-based airborne equipment mounted attitude boresight system, a calibration method of the target plate for measurement of the object position and attitude was proposed. Firstly, the coordinates of target points on the target plate were acquired from multiple directions by using a camera, and target point locations were determined in a condition of one scale factor difference. Then, the absolute scale factor was recovered by using the multiple accurate movement of a single IR-LED and an image overlay method, and target point locations were obtained. Finally, the “target/base” relative position and attitude were solved by precisely controlling the target plate movement and by using each coordinate relationship before and after the movements. Furthermore, aimed at the target plate for the object attitude measurement, a simplified “target/base” calibration method based on movement along two vertical directions was proposed separately to reduce the equipment requirements in the calibration. Experimental results indicate that at the distance of 3—12 m, the standard deviations of attitude angle measurement are 0.004—0.017°, and the attitude measurement accuracy is the same as that from the laser tracker.

Key words: computer visual measurement; boresight equipment; attitude measurement; monocular vision; target plate calibration

收稿日期: 2013-11-29; 修订日期: 2013-12-21.

基金项目: 国防技术基础科研基金资助项目(No. J152011C001)

1 引言

现代作战飞机一般具有多种火炮、导弹等机载武器,同时还具有平视显示器(HUD)、前视红外成像系统(FLIR)、航姿参考系统(AHRS)以及惯性导航系统(INU)等多种飞机制导与控制系统。本文将这些机载制导系统与机载武器称为机载设备。为了确保飞机的飞行性能以及机载武器攻击的有效性,需要校准这些机载设备的安装姿态^[1-4],使它们相对于飞机水平基准面的俯仰角、倾斜角以及相对于飞机对称面的偏航角等满足精度要求。Archer-M系统正是针对这一问题而研发的飞机机载设备安装姿态校准系统。该系统采用基于离散特征点的单目视觉位姿测量方法,将多块具有已知几何信息的靶板固定在校准目标安装基座以及飞机坐标系基准位置处,摄像机同时对多个靶板进行姿态测量,从而实现各机载设备相对飞机坐标系的安装姿态校准。

自20世纪80年代以来,随着计算机视觉技术的不断发展,国内外的众多学者对基于离散特征点的单目视觉位姿测量方法进行了大量的研究工作^[5-8]。在这些研究中,被测目标基本都处于摄像机的可见范围内,其特征点直接固定于被测物体表面或由物体表面特征生成特征点,因此可由摄像机根据特征点间的几何关系直接计算被测目标的空间位姿。但是由于飞机结构较为复杂,有的机载设备处于机身内部,而有的则被其他结构所遮挡,往往不具有通视性。天津大学陈杉等人利用安装在汽车4个车轮上的平面靶板,基于摄像机对靶板的测量实现了对汽车四轮安装位姿的测量^[9]。由于靶板作为测量几何量的传递结构,因此需要事先标定该结构所传递的位姿关系,且标定精度将直接影响最终目标位姿的测量精度。但是文献中却没有进行靶板与车轮间位姿关系的标定。

本文基于机载设备安装姿态视觉校准系统Archer-M的研发,设计了一种具有伸出结构的靶板。将特征点固定在一个面板上,伸出结构与被测设备的安装基座固联,实现了将对隐藏部位的测量转换为对可见特征点的测量,并对靶板进行了实验标定及精度验证。

2 Archer-M系统构成以及工作原理

Archer-M系统结构主要由计算机、数字摄像

机、靶点控制器、位姿测量辅助靶板构成,如图1所示。多个靶板分别安装在机载设备的安装基座上以及飞机坐标系的基准位置处。靶板上布置红外LED作为目标靶点,靶点控制器根据各靶点与摄像机的距离自适应调节每个靶点的发光强度,使得各靶点在摄像机中都能生成理想的光斑图像。摄像机同时对多个靶板进行图像采集,利用单目视觉原理来获得各机载设备安装基座在摄像机坐标系下的姿态。操作人员根据测量系统在软件界面上实时显示的三个姿态角的偏差数据,不断调节机载设备安装基座的姿态,直至满足设计要求,从而实现机载设备姿态的实时检测校准。

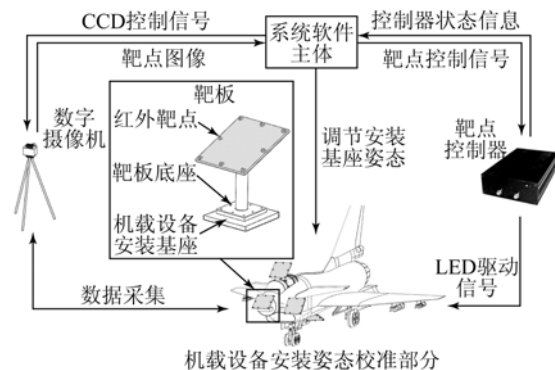


图1 单目视觉机载设备安装姿态校准系统原理图

Fig. 1 Schematic of monocular-based airborne equipment mounted position boresight system

应用单目视觉原理校准机载设备的安装姿态是一种新的校准方法。在Archer-M系统进行精确测量之前,需要对所使用的靶板进行标定,该标定任务主要包括靶点位置关系标定和靶点坐标系与被测设备坐标系位姿关系标定(“靶/座”标定)两部分。

红外LED作为目标靶点,具有主动发光、亮度可调以及可与背景光分离等优点,适合大空间范围内的视觉测量。但是红外LED的物理中心,即该电子元件的发光单元在元件中的空间位置未知,因此即使是安装在同一平面的红外LED,其内部发光单元也无法保证处于同一平面。现有的几何量直接测量手段,例如万能工具显微镜或三坐标测量仪等都无法测量多个靶点的相对位置,因此本文提出了一种标定靶点之间位置关系的新方法。

利用单目视觉原理测量目标位姿时,系统只能直接获得由靶点构成的靶点坐标系的空间位姿,若要测量被测目标,则必须获得靶点坐标系与被测设备坐标系的位姿关系。由于靶板与机载设

备都是通过相同的配合连接安装在设备基座之上,所以可由靶板底座表征被测设备坐标系。由于靶点坐标系只能通过视觉系统测得,而靶板底座坐标系由基准特征(基准面、凸台、孔等)构成,无法被视觉系统识别,因此需要标定靶点坐标系与靶板底座坐标系之间的相对关系,简称为“靶/座”标定。

3 靶点位置关系标定

本文利用摄影测量原理^[10-11],采用经过标定的单个摄像机,从多个方位对靶板进行图像采集,利用多个视图中相同靶点间的匹配约束关系,求解相差一个比例系数下各靶点的三维坐标。为了精确确定绝对比例尺度,本文利用一个辅助靶点,精确控制该靶点移动多个距离,配合摄像机在同一方位采集它每次移动前后的图像,然后将多幅图像合成,构造出多个已知距离的靶点,从而完成绝对尺度下靶点三维坐标的标定。具体步骤为:

(1)使用一个红外 LED 靶点作为辅助靶点,固定在可精确控制移动的运动部件上(例如三坐标测量机或数控机床),在其行程空间中取 k 个预定位置,并将靶板固定在该行程空间中,靶板中固定有 n 个靶点。

(2)当摄像机在第 j 个方位时(见图 2),移动辅助靶点分别到达 k 个预订位置,当辅助靶点到达一个预定位置后同时对靶板和辅助靶点进行图像采集。将该摄像机方位下拍摄的 k 张图像叠加,合成一张图像,合成后的图像中共有 $n+k$ 个靶点图像。

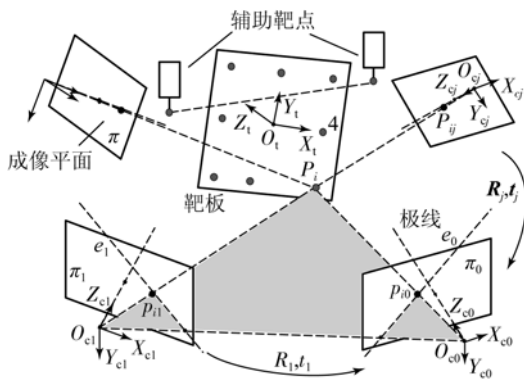


图 2 多视图标定靶点相对位置示意图

Fig. 2 Schematic of relative position calibration of target points from multiple view

(3)变换摄像机的拍摄方位重复上述拍摄及图像合成过程,直至完成第 m 个方位的摄像机拍摄。

(4)令第一个摄像机方位为初始方位($j=0$),该方位下的摄像机坐标系设定为世界坐标系($O_{c0}-X_{c0}Y_{c0}Z_{c0}$),其他摄像机方位 $j(j=1,2,\dots,m-1)$ 分别与该方位拍摄的图像构成双视图。利用对极几何原理恢复第 j 个摄像机方位相对初始摄像机方位得到旋转矩阵 R_j 以及平移向量 t_j 。最后采用光束平差法同时对所有摄像机的位姿参数以及靶点的三维坐标进行整体优化。

根据对极几何原理,摄像机从初始方位和第 $j(j=1,2,\dots,m-1)$ 个方位拍摄靶板所获得的两幅图像中的靶点存在如下关系:

$$p_0^T F p_j = 0, \quad (1)$$

其中: p_0, p_j 分别为初始摄像机方位与第 j 个摄像机方位下拍摄的图像中对应靶点 P_i 的图像坐标, F 为 3×3 的基本矩阵。利用文献[12]的方法求得两幅图像中靶点的图像坐标,并建立两幅图像之间靶点的对应关系 $p_0 \leftrightarrow p_j (i=1,2,\dots,n+k)$, 采用随机抽样最大似然估计法(Maximum Likelihood Estimation by Sample and Consensus, MLESAC)^[13] 计算基本矩阵 F 。根据基本矩阵 F 求出两幅图像的本质矩阵:

$$E = K^T F K = [{}^0_j t]_{\times} {}^0_j R, \quad (2)$$

其中: K 为摄像机内参数矩阵,通过摄像机标定; ${}^0_j R, {}^0_j t$ 分别表示第 j 个摄像机坐标系在初始摄像机坐标系下的旋转矩阵和归一化平移向量, $[{}^0_j t]_{\times}$ 为 ${}^0_j t$ 的反对称矩阵,若 ${}^0_j t = (x, y, z)^T$, 则有:

$$[{}^0_j t]_{\times} = \begin{bmatrix} 0 & -z & y \\ z & 0 & -x \\ -y & x & 0 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

对本质矩阵 E 进行奇异值分解(SVD),即可求解 ${}^0_j R$ 和 ${}^0_j t$ 。

当 $m-1$ 对视图计算完毕后,对所有摄像机位姿参数以及靶点三维坐标进行整体优化,采用光束平差法建立所有视图中靶点重建坐标的再投影误差,累加为最小的目标函数:

$$\min \sum_{j=1}^{m-1} \left(\sum_{i=1}^{n+k} \| p_{ij} - \hat{p}_{ij}({}^0_j R, {}^0_j t, P_i) \| \right), \quad (4)$$

其中: \hat{p}_{ij} 为第 i 个靶点的三维坐标 P_i 再投影到第 j 个图像平面的图像坐标。利用 Levenberg-Marquardt 迭代算法优化求解式(4)中的优化变量 ${}^0_j R, {}^0_j t (j=1,2,\dots,m-1)$ 和 $P_i (i=1,2,\dots,n+k)$ 。

平移向量 0t 始终为相差一个比例因子的归一化平移向量,因此整个多视图几何系统的绝对尺度还需要恢复比例因子 λ 。如图 2 所示,精确控制辅助靶点的移动,在空间中虚拟出多个精确的已知距离 L_i ,根据其重建距离 L'_i 和已知距离即可求得比例因子:

$$\lambda = \frac{\sum_{i=1}^k L_i}{\sum_{i=1}^k L'_i} \quad (5)$$

根据优化结果中得到的光学靶板上的 n 个靶点坐标建立靶面坐标系。以图 2 中靶点分布的靶板为例,令 8 个靶点空间分布的形心为坐标原点,根据 8 个靶点拟合 $O_t X_t Y_t$ 平面。选取图 2 中 4 号靶点与坐标原点的连线在 $X_t Y_t$ 平面的投影作为 X_t 方向,建立坐标系 $O_t - X_t Y_t Z_t$,并将 $P_i (i=1, 2, \dots, 8)$ 变换到 $O_t - X_t Y_t Z_t$ 坐标系下,至此靶点位置关系标定完毕。需要指出的是,根据 $P_i (i=1, 2, \dots, 8)$,可以按不同的规则建立不同的靶点坐标系,但这并不会影响系统的测量结果,因为本文还要标定所建立的靶点坐标系与底座坐标系的相对位姿关系(“靶/座”标定)。

4 “靶/座”标定

4.1 基于精确运动控制的“靶/座”标定算法

如图 3 所示, $C_t (O_t - X_t Y_t Z_t)$ 为靶点坐标系, $C_s (O_s - X_s Y_s Z_s)$ 为底座坐标系, $C_c (O_c - X_c Y_c Z_c)$ 为摄像机坐标系。将摄像机坐标系看作世界坐标系,由于靶点在 C_t 中的坐标已经过标定,因此,根据单目视觉原理由摄像机测得 C_t 在 C_c 中的姿态 \mathbf{R}_t 和位置 t_t 。为了获得 C_s 在 C_c 中的姿态 \mathbf{R}_s 和位置 t_s ,就必须知道 C_s 与 C_t 之间的相对位姿 \mathbf{R}, t 。由于靶板的靶点与底座相对位姿固定,因此 \mathbf{R}, t 为常量,一经标定后如无拆解或变形,则不需要重新标定。

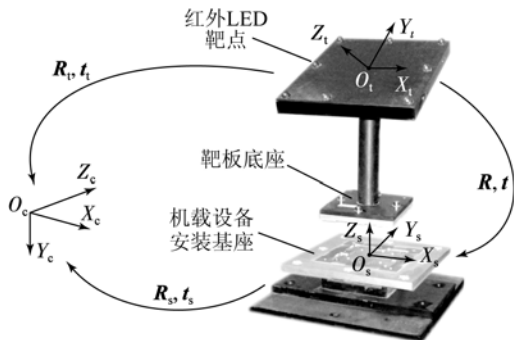


图 3 “靶/座”关系示意图

Fig. 3 Schematic of “target/base” relationship

本文提出的辅助靶板“靶/座”标定的基本原理为:固定摄像机,利用运动装置带动靶板运动到不同的方位,由摄像机测量出靶点坐标系的方位以及控制装置预设的运动方位,进而推导出 \mathbf{R}, t 。

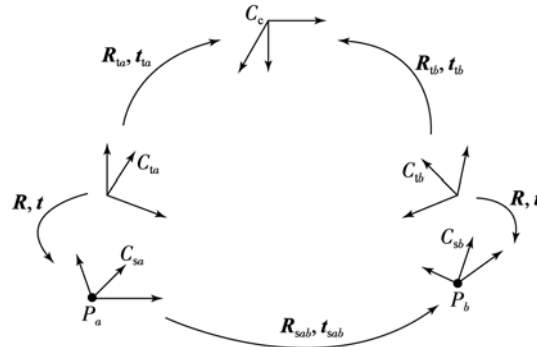


图 4 靶板移动前后各坐标系的相对关系

Fig. 4 Relations among target, scale and base coordinate systems before and after target movements

如图 4 所示,移动装置承载靶板从位置 P_a 移动至 P_b ,由摄像机测量获得靶板在摄像机坐标系 C_c 下的方位,分别为 $\mathbf{R}_{t_a}, t_{t_a}$ 和 $\mathbf{R}_{t_b}, t_{t_b}$ 。由于运动装置需要精确控制靶板在空间中的旋转和平移,因此靶板底座与控制装置之间同样需要配合连接。如果将运动控制装置的坐标系与底座坐标系 C_s 重合,则由运动装置控制器可获得靶板运动前后底座的相对方位 $\mathbf{R}_{s_{ab}}, t_{s_{ab}}$ 。将由旋转矩阵和平移向量表征的坐标系之间方位改用 4×4 的齐次变换矩阵表示,则运动前后各坐标系具有如下关系:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{R}_{t_a} & t_{t_a} \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R} & t \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{s_{ab}} & t_{s_{ab}} \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{t_b} & t_{t_b} \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R} & t \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

式(6)中,只有 \mathbf{R}, t 未知,其余变量都可由摄像机或数控系统获得。靶板变换一次方位(由 C_{s_a} 变换到 C_{s_b})可以列出 3 个相互独立的线性方程。而 \mathbf{R}, t 各有 3 个自由度,因此靶板至少运动两次,即具有至少 3 个不同方位的测量数据,获得至少 6 个相互独立的线性方程,即可求解“靶/座”相对关系 \mathbf{R}, t 。

4.2 “靶/座”关系的简化标定

在很多实际测量应用中只关心物体的空间姿

态,而不测量物体的空间位置。在这种情况下使用靶板进行测量时,不需要标定“靶/座”关系中的平移向量 t 。当只标定“靶/座”关系中的旋转矩阵 R 时,上一节的标定方法可以进行简化。

简化方法的主要思想是控制靶板分别沿着底座坐标系的两个坐标轴进行平移,摄像机测量靶点坐标系来获得底座坐标系的方向向量,进而在摄像机坐标系中计算靶点坐标系与底座坐标系间的相对姿态,即旋转矩阵 R 。

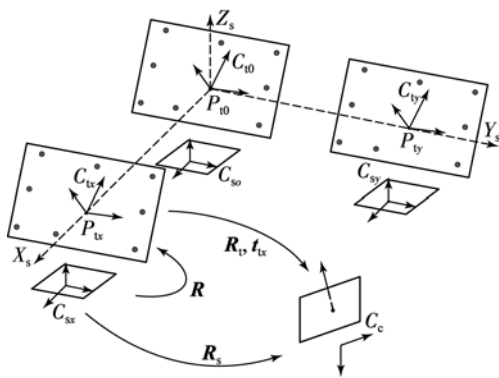


图 5 “靶/座”简化标定示意图

Fig. 5 Schematic of “target/base” simplified calibration

如图 5 所示,靶点坐标系原点的初始位置为 P_{t0} ,靶板沿 X_s 方向移动一次,摄像机再次测量靶点坐标系的原点位置为 P_{tx} ,则靶板底座坐标系 C_s 的 X_s 方向向量为:

$$e_{s,x} = (e_{sx}, e_{sy}, e_{sz})^T = P_{tx} - P_{t0} / \| P_{tx} - P_{t0} \| . \quad (7)$$

同理求得 Y_s 方向下的方向向量 $e_{s,y} = (e_{yx}, e_{yy}, e_{yz})^T$, $e_{s,x}$ 与 $e_{s,y}$ 叉积获得向量 $e_{s,z} = (e_{zx}, e_{zy}, e_{zz})^T$,则底座坐标系 C_s 在摄像机坐标系 C_c 下的旋转矩阵 R_s 表示为:

$$R_s = [e_{s,x} \quad e_{s,y} \quad e_{s,z}] = \begin{bmatrix} e_{sx} & e_{sy} & e_{sz} \\ e_{yx} & e_{yy} & e_{yz} \\ e_{zx} & e_{zy} & e_{zz} \end{bmatrix} . \quad (8)$$

根据获得的 R_t 和 R_s ,即可求出“靶/座”关系下的旋转矩阵:

$$R = R_s^T R_t . \quad (9)$$

该“靶/座”相对姿态的标定方法只需要靶板做定向平移靶板,无需数控装置,只需要保证两个

垂直方向平移的结构即可实现标定。因此,该方法大大简化了标定装置的结构和功能。

5 实验

5.1 靶点位置关系标定实验

实验采用 Basler A102f 数码摄像机,图像分辨率为 $1\,392 \text{ pixel} \times 1\,040 \text{ pixel}$,镜头标称焦距为 12.5 mm ,摄像机已利用文献[14]的方法进行了标定,并利用文献[15]和[12]中的方法自适应控制靶点亮度后,对光斑图像进行质心定位,定位精度可达 0.003 pixel 。同时采用 NH-SK 数控机床精确移动辅助靶点,机床的有效行程为 $1\,000 \text{ mm} \times 600 \text{ mm} \times 550 \text{ mm}$,X,Y,Z 轴 3 个方向的移动自由度都在刀具上。将靶板固定在机床的工作台面中部,在刀具装夹基座处固定一个红外 LED 辅助靶点,摄像机放置在距离靶板约 6 m 处,实验场景如图 6 所示。



图 6 靶点位置关系标定现场图

Fig. 6 Scene of calibration for relative position of target points

机床坐标系中预设的 4 个三维坐标位置分别为 $A(0.000, 0.000, 0.000)$, $B(0.000, 518.000, 435.000)$, $C(555.000, 618.000, 435.000)$, $D(555.000, 0.000, 0.000)$,根据这 4 个已知坐标关系进行靶点重建的尺度恢复。根据 20 幅不同方位拍摄得到的图像,用第 3 节的方法标定该靶板上的靶点位置关系,得到靶板上 8 个靶点、4 个辅助靶点的三维坐标,如表 1 所示。

表 1 靶点重建坐标

Tab.1 Reconstructed coordinates of target points

靶点	机床坐标系下/mm			靶点坐标系下/mm		
	<i>x</i>	<i>y</i>	<i>z</i>	<i>x</i>	<i>y</i>	<i>z</i>
1	179.287	573.362	262.341	-111.063	144.715	-0.101
2	294.652	575.974	262.171	4.331	144.737	0.337
3	409.599	579.167	261.253	119.325	145.063	-0.131
4	412.646	442.427	212.919	119.372	0.00	0.204
5	415.616	305.809	163.854	119.35	-145.191	-0.191
6	265.506	302.551	164.774	-30.798	-144.852	-0.149
7	186.252	300.297	165.674	-110.087	-145.037	0.443
8	182.891	437.712	213.701	-110.431	0.565	-0.412
辅助靶点 A	0.023	-0.028	0.024	-302.543	-479.61	-57.331
辅助靶点 B	-0.027	618.031	435.026	-290.145	248.403	145.320
辅助靶点 C	555.021	617.973	434.988	264.738	236.869	152.372
辅助靶点 D	555.019	0.031	0.027	252.291	-491.012	-50.262

5.2 “靶/座”标定实验

采用 VC1400S 型数控机床作为光学靶板与适配工装几何关系标定的移动平台,该机床的 X、Y 轴移动自由度在其工作平台上,有效行程为 1 400 mm×700 mm。将摄像机固定在距离靶板约 6 m 处,实验场景如图 7 所示。



图 7 “靶/座”标定现场图

Fig. 7 Scene of “target/base” calibration

机床工作平台首先沿着 X 轴正方向由 X = 50.00 mm, Y = 50.00 mm 处开始沿机床的 X 轴方向移动,每移动 50 mm 摄像机对靶板进行图像采集, X 轴方向共设 20 个靶板方位。然后移动工作平台至 X = 600.00 mm, Y = 50.00 mm 处,并

沿 Y 轴正方向移动,每移动 25 mm 摄像机对靶板进行图像采集, Y 轴方向也设 20 个靶板方位。采用正交迭代位姿估计算法分别计算出上述 40 个位置下靶面坐标系原点 $O_i (i = 1, 2, \dots, 40)$ 在摄像机坐标系下的坐标,如图 8 所示。



图 8 靶面坐标系原点坐标结果图

Fig. 8 Image of origins of target plane coordinates

拟合测量所得的靶板移动的方位坐标得到适配工装坐标系,利用 2.2 节方法求得靶面坐标系相对适配工装坐标系的旋转矩阵为:

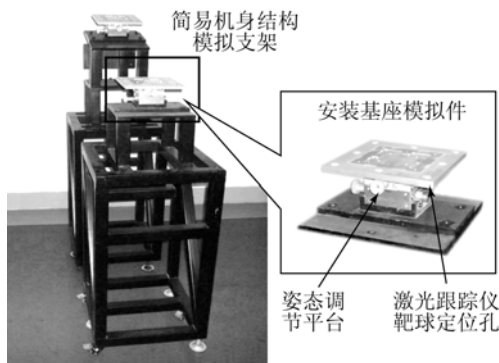
$${}^bR = \begin{bmatrix} 0.999\ 98 & 0.000\ 45 & 0.006\ 86 \\ 0.002\ 19 & 0.925\ 11 & -0.379\ 69 \\ -0.006\ 52 & 0.379\ 7 & 0.925\ 087 \end{bmatrix}$$

5.3 Archer-M 系统与激光跟踪仪对比实验

为了验证经本文方法标定后 Archer-M 系统的测量精度,本文设计并构建了机载设备安装姿态校准实验平台。该平台包括安装基座模拟件、

姿态调节平台以及简易机身结构模拟支架等部分,如图9(a)所示。姿态校准过程中,操作人员根据测量系统在软件界面上实时显示的3个姿态角偏差数据,转动姿态调节平台的旋钮,直至基座到达设计要求的姿态。

对两块安装基座模拟件的相对姿态进行实验测量,分别根据3节和4节的原理标定两块靶板,然后用API T3激光跟踪仪分别测量两块安装基座的相对姿态。为了将两系统的测量数据转换到同一坐标系下进行对比,在安装基座模拟件上沿其坐标系轴线方向额外加工了用于放置激光跟踪仪靶球(SMR)的测量孔位,并以其中一个安装基座坐标系为基准计算两者的相对姿态,实验场景如图9所示。



(a) 实验平台主要硬件部分

(a) Hardware part of experiment platform



(b) 与激光跟踪仪姿态测量对比实验现场图

(b) Scene of contrast experiment with laser tracker

图9 精度验证实验平台以及实验现场图

Fig. 9 Experiment platform and scene

首先对比两个系统各自的重复测量精度。将两个被测安装基座分别放置于距离Archer-M系统和激光跟踪仪约3, 8, 12 m处,两安装基座固定不动,分别利用两系统重复测量两安装基座的相对姿态10次,测量结果的标准差如表2所示。由表2可知,当安装基座距离摄像机8 m时,两系统所测3个方位角的标准差基本相同,都在 0.013° 以内。随着距离的增加,两系统的标准差都有所增加,距离摄像机12 m时,Archer-M系统的标准差为 0.017° ,略高于激光跟踪仪。值得注意的是,在距离摄像机3 m时,Archer-M系统的标准差低于激光跟踪仪,此时Archer-M系统对3个方位角的重复测量结果更加稳定。

表2 Archer-M系统与激光跟踪仪重复测量的标准差
Tab. 2 STDs of repetitive measurement for Archer-M and laser tracker

距离/m	Archer-M 系统/ $(^\circ)$			激光跟踪仪/ $(^\circ)$		
	Roll	Pitch	Yaw	Roll	Pitch	Yaw
3	0.004	0.006	0.005	0.010	0.009	0.011
8	0.011	0.013	0.012	0.013	0.012	0.012
12	0.015	0.017	0.016	0.014	0.014	0.015

然后,在约3, 8, 12 m处分别利用Archer-M系统与激光跟踪仪测量两个安装基座的相对姿态。在每一个距离下,任意摆放两个安装基座相对姿态3次,利用两个系统重复测量该相对姿态10次,计算各自的标准差,实验结果如表3所示。

由表3可知,本文系统与激光跟踪仪测量的姿态数据之间存在一定的偏差。造成该偏差的原因除了Archer-M系统本身存在测量误差以外,激光跟踪仪自身也存在误差;另外,由于激光跟踪仪的测量坐标系通过安装基座上加工的靶球孔位与本文系统的测量坐标系进行对齐,因此靶球孔位的加工误差对坐标变换后的姿态测量精度也会产生一定的影响。从前面的重复测量误差统计结果看(如表2),二者的重复测量误差基本处于同一水平,大约在 $0.004 \sim 0.017^\circ$,而表3中二者的相对位姿测量结果之间的偏差在 $0.008 \sim 0.02^\circ$,说明二者的测量精度基本相同。

表3 Archer-M系统与激光跟踪仪测量的统计结果
Tab.3 Measurement statistics of Archer-M and laser tracker

距离/m	Archer-M系统均值/(°)			激光跟踪仪均值/(°)			两系统均值偏差/(°)		
	Roll	Pitch	Yaw	Roll	Pitch	Yaw	Roll	Pitch	Yaw
3	15.601	3.238	1.928	15.590	3.224	1.941	0.011	0.014	-0.013
	9.174	-7.114	0.873	9.182	-7.097	0.863	-0.008	-0.017	0.010
	9.172	-0.072	0.620	9.158	-0.083	0.629	0.014	0.011	-0.009
8	13.323	-0.084	8.905	13.310	-0.064	8.889	0.013	-0.020	0.016
	12.279	-0.062	5.946	12.293	-0.080	5.957	-0.014	0.018	-0.011
	15.574	-7.197	0.243	15.555	-7.215	0.258	0.019	0.018	-0.015
12	4.367	-0.058	10.957	4.351	-0.039	0.94	0.016	-0.019	0.017
	5.633	-5.079	-0.549	5.651	-5.092	-0.566	-0.018	0.013	0.017
	15.768	-9.018	-1.779	15.751	-9.037	-1.759	0.017	0.019	-0.020

实验过程中,相比于激光跟踪仪的逐点接触测量方式,Archer-M系统不必逐点测量再计算位姿,一次拍照即可快速获得待测的装配姿态数据,有效地避免了人为因素对测量精度的影响,而且可以实现实时动态的跟踪测量,姿态校准过程十分便捷高效。

6 结 论

本文基于机载设备安装姿态视觉校准系统Archer-M,提出了一种姿态测量辅助靶板的标定方法。用该方法分别对靶板上靶点的位置关系以

及“靶/座”相对位姿进行了标定,并进一步针对只用于物体姿态测量的靶板,提出了一种分别沿两个垂直方向运动的简化“靶/座”标定方法,从而大大降低了标定过程中对标定设备的要求。实验结果表明,在3~12 m距离内,用本文提出的方法标定靶板后,姿态角度的测量标准差在0.004~0.017°,姿态测量精度与激光跟踪仪相当。本文方法实现了位姿测量辅助靶板的标定,使得Archer-M系统可以对处于隐藏部位的机载设备安装姿态进行校准,在保证该系统校准精度的同时进一步提高了系统的适用性。

参考文献:

- [1] 胡宇群,秦龙刚,黄翔. 基于激光雷达的机载设备安装姿态校准[J]. 南京航空航天大学学报, 2010, 42(1): 112-116.
HU Y Q, QIN L G, HUANG X. Mounted position calibration for airborne equipment with laser radar [J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2010, 42(1): 112-116. (in Chinese)
- [2] 朱永国,黄翔,秦龙刚. 基于局域GPS的飞机惯性导航部件安装校准[J]. 南京航空航天大学学报, 2009, 41(5): 615-619.
ZHU Y G, HUANG X, QIN L G. Installation and calibration of airplane inertial navigation based on indoor GPS [J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2009, 41(5): 615-619. (in Chinese)
- [3] 贾秋锐,赵思宏,陈博专. 机载武器校准仪的设计与分析[J]. 光学精密工程, 2004, 12(4): 88-91.
JIA Q R, ZHAO S H, CHEN B ZH. Design and analysis of airborne arms calibrator [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(4): 88-91. (in Chinese)
- [4] 徐良法,胡健,陈万美. 未来武装直升机机载动态瞄准系统设计[J]. 火炮发射与控制学报, 2010(3): 91-94.
XU L F, HU J, CHEN W M. Design of dynamic airborne sight system for future attack helicopters [J]. *Journal of Gun Launch & Control*, 2010(3): 91-94. (in Chinese)
- [5] KHANH D Q, SUH Y S. Mobile robot destination

- generation by tracking a remote controller using a vision-aided inertial navigation algorithm [J]. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 2013, 8(3): 613-620.
- [6] MARTINEZ C, RICHARDSON T, THOMAS P, *et al.*. A vision-based strategy for autonomous aerial refueling tasks [J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2013, 61(8): 876-895.
- [7] 张世杰, 曹喜滨, 陈雪芹. 航天器相对位姿参数光学测量解析算法[J]. *航空学报*, 2005, 26(2): 214-216.
- ZHANG SH J, CAO X B, CHEN X Q. Closed-form method for relative pose parameters of spacecraft based on optical measurement [J]. *Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica*, 2005, 26(2): 214-216. (in Chinese)
- [8] 周富强, 张广军. 一种单摄像机视觉导引方法[J]. *仪器仪表学报*, 2006, 27(9): 1129-1130.
- ZHOU F Q, ZHANG G J. Vision guiding method with monocular camera [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2006, 27(9): 1129-1130. (in Chinese)
- [9] 陈杉, 周涛, 张效栋, 等. 物体位姿单目视觉传感测量系统 [J]. *传感技术学报*, 2007, 20(9): 2011-2015.
- CHEN SH, ZHOU T, ZHANG X D, *et al.*. Monocular vision measurement system of the position and attitude of the object [J]. *Journal of Transduction Technology*, 2007, 20(9): 2011-2015. (in Chinese)
- [10] ZHENG J D, ZHANG L Y, DU X Y. Accurate 3D target positioning in close range photogrammetry with implicit image correction [J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2009, 22(6): 649-657.
- [11] 郑建冬, 张丽艳, 周玲, 等. 基于单数码相机自由拍摄的空间点定位[J]. *航空学报*, 2007, 28(6): 1521-1526.
- ZHENG J D, ZHANG L Y, ZHOU L, *et al.*. 3D target location with one single hand-held CCD camera [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2007, 28(6): 1521-1526. (in Chinese)
- [12] 冯新星, 张丽艳, 叶南, 等. 二维高斯分布光斑中心快速提取算法研究[J]. *光学学报*, 2012, 32(5): 0512002.
- FENG X X, ZHANG L Y, YE N, *et al.*. Fast algorithms on center location of two dimensional Gaussian distribution spot [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(5): 0512002. (in Chinese)
- [13] TORR P H S, ZISSERMAN A. MLESAC: a new robust estimator with application to estimating image geometry [J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 2000, 78(1): 138-156.
- [14] 杨博文, 张丽艳, 叶南, 等. 面向大视场视觉测量的摄像机标定技术 [J]. *光学学报*, 2012, 32(9): 0915001.
- YANG B W, ZHANG L Y, YE N, *et al.*. Camera calibration technique of wide-area vision measurement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(09): 0915001. (in Chinese)
- [15] 叶南, 富帅, 杨博文, 等. 大空间视觉测量的多靶点亮度自适应调节技术[J]. *电子测量技术*, 2013(7): 87-92.
- YE N, FU SH, YANG B W, *et al.*. Adaptive control for multiple optical targets intensity in vision measurement [J]. *Microcontrollers & Embedded Systems*, 2013(7): 87-92. (in Chinese)

作者简介:



杨博文(1984—),男,辽宁大连人,博士研究生,2007年于南京航空航天大学获得学士学位,主要从事三维视觉测量与数字图像处理等方面的研究。E-mail: yang_bw@qq.com

导师简介:



张丽艳(1967—),女,教授,博士生导师,1988年于南京航空航天大学获得学士学位,1991年于西安交通大学获得硕士学位,2001年于南京航空航天大学获得博士学位,主要从事基于数字图像的快速柔性三维测量、产品逆向建模与复杂曲面产品质量检测、高效数控加工与仿真、设计过程集成与优化等方面的研究。E-mail: zhangly@nuaa.edu.cn