

文章编号 1004-924X(2010)11-2513-08

火箭喷管运动视觉测试精度的校准与实验

刘 博, 叶 东, 陈 刚, 车仁生

(哈尔滨工业大学 自动化测试与控制系, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 基于新型双轴摇摆直线升降运动校准装置, 提出了一种喷管运动视觉测量系统的校准方法。首先, 将校准装置提供的摆心、摆角的标准值与视觉测量系统的测量值在空间上对应起来, 通过校准装置提供给喷管模型 2 次不同轴的摆动, 推导出视觉运动测量系统的世界坐标系与喷管摆角坐标系之间的位姿关系。然后求解出二者位姿矩阵和平移向量, 在视觉运动测量系统中建立喷管的摆角坐标系; 通过时间同步系统向校准装置和视觉运动测量系统发送同步时间基准信号和同步触发信号, 同步二者的采样时间, 实现标准值与测量值在时间上的对应关系, 完成摆动动态数据的直接比较。最后对喷管运动视觉测量系统进行了校准实验, 分析了喷管在 $\pm 12^\circ$ 的摆动空间内不同位置的摆心、摆角的测量误差。实验结果表明, 在运动范围内摆角的最大测量误差为 0.093° , 摆心的最大测量误差为 0.832 mm 。

关键词: 火箭喷管; 视觉测量; 校准方法; 摆角; 摆心

中图分类号: TP391.4 文献标识码: A doi: 10.3788/OPE.20101811.2513

Calibration and experiment of vision measurement accuracy for motion of rocket nozzle

LIU Bo, YE Dong, CHEN Gang, CHE Ren-sheng

(*Department of Automatic Measurement and Control, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China*)

Abstract: On the basis of the novel dual axes rotating and single axis translating calibration equipment, a calibration method for vision measurement of the motion of a rocket nozzle was proposed. Firstly, the motion metric from the calibration equipment and the measured values from vision system were mapped in the space, then the position and pose relations between the world coordinate system of stereo vision and the coordinate system of nozzle were deduced. After solving the pose matrix and translation vector, the vector angle coordinate system of the nozzle was established in vision measurement system. Subsequently, by sending a trigger signal and a synchronized time signal from the calibration equipment to cameras, the sampling time was synchronized, and the dynamic data were directly compared. Finally, the experiment for calibrating the vision measurement system was completed. The measurement errors of rotation center and vector angle in nozzle motion space $\pm 12^\circ$ were analyzed. The experiment results indicate that the max error of vector angle is 0.093° and the max error of rotation center position is 0.832 mm .

Key words: rocket nozzle; vision measurement; calibration method; vector angle; rotation center

收稿日期: 2010-03-08; 修订日期: 2010-09-09.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 51075095)

1 引言

火箭发动机喷管运动参数的精确测试对火箭姿态的精确控制具有非常重要的意义^[1]。应用视觉测量系统对火箭发动机轴承式活动喷管的摆角和摆心进行测试是一种新的测试方法^[2],但其测试精度需要进行校准,这是关系视觉测量系统正常运行和量值溯源的关键问题。

自 20 世纪 80 年代以来,基于离散特征点的视觉运动测量系统已越来越多地为广大科研工作者所研究和应用。在精度校准方面,各视觉测量系统的厂商给用户的只有理想状态下单点的测量精度指标,没有给出对具体被测对象运动参数测量精度的校准方法,因此,用户都是根据自己特定的应用对象制定视觉测量系统测量精度的校准方法。James G. Richards 用自行设计的装置校准了 Ariel 等 7 种视觉运动测量系统的测量精度^[3]。Andrew D. Wiles 等通过分析 NDI Polaris 视觉系统在测量空间内对单一特征点和刚体的测量精度数据,得出了该测量系统应用于图像引导外科手术时的精度^[4]。R. A. States 和 E. Pappas 指出需要应用 NDI 公司的 Optotrak 3020 视觉运动测量系统测量人体的运动,因此用自行设计的矩尺校准 Optotrak 3020 的测量精度和重复性^[5]。Angela E. Kedgley 和 Trevor Birmingham 等比较了视觉运动测量系统与医用立体放射标准分析系统(RSA)以及荧光透视立体放射标准分析系统(FRSA)的测量精度^[6]。国内对视觉测量系统的测量精度校准的研究还不多见,研究重心多放在视觉系统的内外参数标定方面^[7-9]。

通过对上述文献的分析,发现学者们在进行视觉运动测量系统的精度校准时都设计或应用了校准装置(转台、坐标测量机、精密移动台等)来带动刚体运动,然后通过比较被测对象上特征点间距离、角度的基准值与测量值得到系统的测量误差。但是被测对象的运动大都局限于自身的研究领域,且比较的基本上为特征点间距离和角度等静态值。

为了校准喷管运动视觉测量系统的测量精度,本课题组设计研制了一种双轴摇摆直线升降

运动校准装置^[10],并对精度校准方法进行了深入研究。

2 校准系统构成

火箭喷管运动测量的校准系统主要由双轴摇摆直线升降运动校准装置,喷管运动视觉测量系统以及时间同步系统组成,如图 1 所示。

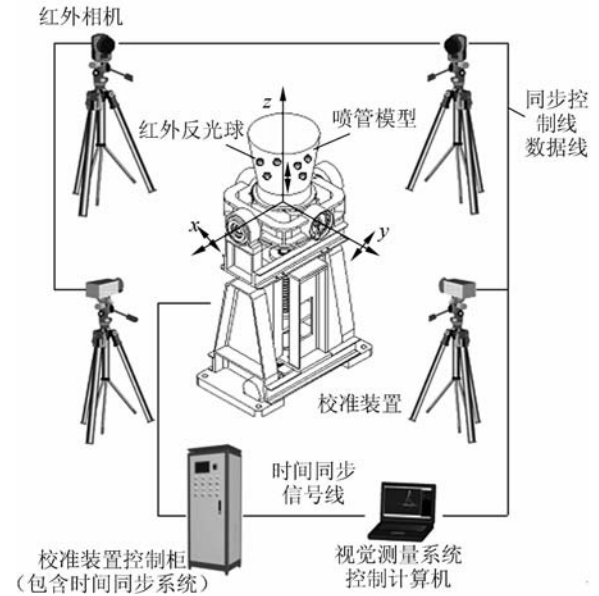


图 1 火箭喷管运动视觉测量的校准系统

Fig. 1 Calibration system of rocket nozzle motion measurement

2.1 校准装置

校准装置实际上是一个火箭喷管运动的半实物仿真设备,由直线升降台和双轴摇摆台组成,有 3 个自由度,分别为绕 X 轴和 Y 轴的摆动,用来模拟火箭喷管的偏航和俯仰运动;以及 Z 轴方向的直线移动,用来模拟喷管沿火箭轴向上的运动。作为标准件的喷管模型安装于校准装置内框。校准装置通过精密的机械设计和装配,保证摆角和摆心的精度,采用高精度的具有基准位置编码信号的光电增量式编码器和光栅尺作为转动角度和直线位移的测量反馈元件,结合高性能的以 DSP 三轴运动控制器为基础的数字式位置伺服控制实现了较高的定位和定向精度。

2.2 喷管运动视觉测量系统

喷管运动视觉测量系统由 4 台红外相机及其

控制器构成。喷管模型上布置红外反光球,使其在摆动空间内始终被相机捕捉。将其作为三维特征点,其坐标值由经过内外参数校准的红外相机给出,并输入到摆角和摆心位置估计模块得到运动参数。

2.3 时间同步系统

比较视觉测量系统的测量值与校准装置给定的基准值之间的关系时,必须保证二者的时空一致性,也就是需要实现校准装置的时间基准与相机采样时间的同步。

将校准装置的晶振周期作为时间基准,其精度为 5×10^{-8} s。校准装置输出的同步时间信号作为相机的采样时间,这个同步信号包括两部分,分别为同步触发信号(trigger)和同步采样时间基准(timebase)。

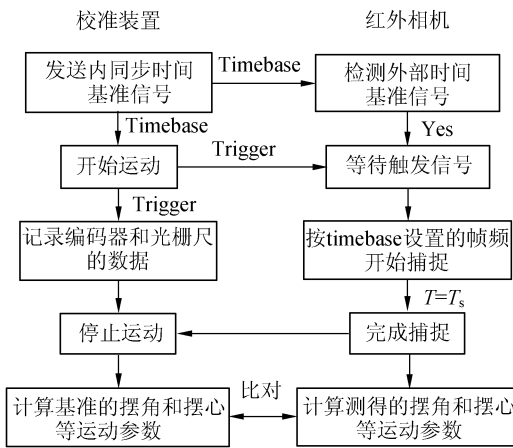


图 2 校准装置与相机的时间同步流程图

Fig. 2 Synchronization flow diagram between calibration equipment and camera

校准装置与相机同步时,首先相机先检测有无外同步输入的时间基准信号(Input sync time-base signal),如果检测到信号即进入等待状态;然后当接收到外同步触发信号(Input trigger signal)时,相机开始按校准装置给出的时间基准设置帧频采样;当预设的采集时间结束($T = T_s$),完成运动的测量。校准装置先发送同步时间信号,当开始运动时,按同步时间基准采集记录编码器和光栅尺输出的位置数据,并在记录数据的同时发送一个触发信号给相机,这样保存的第一个编码器和光栅尺的位置数据就可以和相机接收到触

发信号后开始测量的第一个喷管位姿数据对应起来,从而实现校准装置和相机的时间同步。具体操作流程如图 2 所示。

3 校准系统坐标系的建立

校准时需要 3 个坐标系,如图 3 所示,分别是世界坐标系 $O_G - X_G Y_G Z_G$, i 时刻刚体坐标系 $O_{iL} - X_{iL} Y_{iL} Z_{iL}$, 以及初始时刻刚体坐标系 $O_{0L} - X_{0L} Y_{0L} Z_{0L}$, 将初始时刻刚体坐标系定为参考的摆角坐标系。特征点在世界坐标系和刚体坐标系下的坐标有如下关系:

$$\mathbf{P}_{ij} = \mathbf{R}(i) \cdot \mathbf{P}_{jL} + \mathbf{P}_{O_{iL}}, \quad (1)$$

$$\mathbf{P}_{0j} = \mathbf{R}(0) \cdot \mathbf{P}_{jL} + \mathbf{P}_{O_{0L}}, \quad (2)$$

式中: $\mathbf{P}_{ij}(x_{ij}, y_{ij}, z_{ij})$ 为 i 时刻喷管上的第 j 个特征点在世界坐标系中的坐标; $\mathbf{P}_{jL}(x_{jL}, y_{jL}, z_{jL})$ 为第 j 个特征点在刚体坐标系中的坐标,其值不随时间变化; $\mathbf{P}_{O_{iL}}(x_{O_{iL}}, y_{O_{iL}}, z_{O_{iL}})$ 为 i 时刻刚体坐标系原点的世界坐标; $\mathbf{R}(i)$ 为 i 时刻世界坐标系与刚体坐标系之间姿态的矩阵; $\mathbf{P}_{0j}(x_{0j}, y_{0j}, z_{0j})$ 为初始时刻喷管上的第 j 个特征点在世界坐标系中的坐标; $\mathbf{P}_{O_{0L}}(x_{O_{0L}}, y_{O_{0L}}, z_{O_{0L}})$ 为初始时刻刚体坐标系原点(初始摆心)的世界坐标; $\mathbf{R}(0)$ 为初始时刻刚体坐标系与世界坐标之间姿态的矩阵,即摆角坐标系与世界坐标系的姿态矩阵。

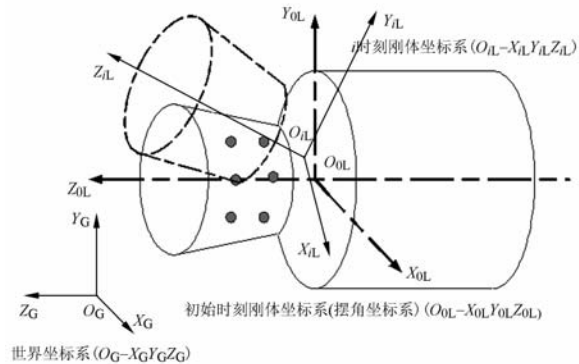


图 3 喷管坐标系示意图

Fig. 3 Sketch of nozzle coordinate systems

下面先建立初始时刻 $i = 0$ 时的刚体坐标系 $O_{0L} - X_{0L} Y_{0L} Z_{0L}$ 。

3.1 喷管初始坐标系(摆角坐标系)的建立

一个刚体的运动可以有无穷多的方式分解成

旋转和平移。喷管运动前后的一对对应点是

$P_{(i-1)j}$ 和 P_{ij} , 那么有下列变化公式:

$$P_{ij} = R_i' P_{(i-1)j} + t_i', \quad (3)$$

其中 R_i' 和 t_i' 是喷管相对于世界坐标系的原点分解出的旋转矩阵和平移向量。

另外, 喷管的空间运动可以分解成相对于摆角坐标系原点 $P_{O_{0L}}$ (即喷管初始坐标系原点, 初始摆心) 的旋转运动和随其旋转中心的平移运动组成的, 可表示为:

$$P_{ij}' = R_i P_{jL} + t_i, \quad (4)$$

其中, P_{ij}' 为运动后同一特征点在摆角坐标系下的坐标; P_{jL} 为运动前同一特征点在摆角坐标系下的坐标; R_i 为喷管绕摆角坐标系原点 $P_{O_{0L}}$ (即初始摆心) 的旋转矩阵; t_i 为喷管瞬时摆心相对于初始摆心的平移向量。

以下用 A, B, C, D 表示 4×4 矩阵, 分别描述某两个坐标系之间的相对方位, 如果这两个坐标系之间的相对方位由旋转矩阵与平移向量描述, 则

$$A = \begin{bmatrix} R(0) & P_{O_{0L}} \\ 0^T & 1 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$B = \begin{bmatrix} R(i) & P_{O_{iL}} \\ 0^T & 1 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

$$C = \begin{bmatrix} R_i & t_i \\ 0^T & 1 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

$$D = \begin{bmatrix} R_i & t_i \\ 0^T & 1 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

如图 4 所示, 坐标系之间有如下关系:

$$P_{0j} = A P_{jL}, \quad (9)$$

$$P_{ij} = A P_{ij}', \quad (10)$$

$$P_{ij}' = D P_{jL}. \quad (11)$$

整理式(9)~(11)得到

$$A^{-1} P_{ij} = D A^{-1} P_{0j}, \quad (12)$$

对于 n 个特征点则有

$$A^{-1} T_{P_m} = D A^{-1} T_{P_{0n}}, \quad (13)$$

其中 T_{P_m} 和 $T_{P_{0n}}$ 为 $4 \times n$ 矩阵, 如果令 $T_{P_{0n}}^+$ 是 $T_{P_{0n}}$ 的伪逆矩阵, 则式(13)变为

$$A^{-1} T_{P_m} T_{P_{0n}}^+ = D A^{-1}. \quad (14)$$

令 $E = T_{P_m} T_{P_{0n}}^+$, 其为一个的 4×4 矩阵, 则进

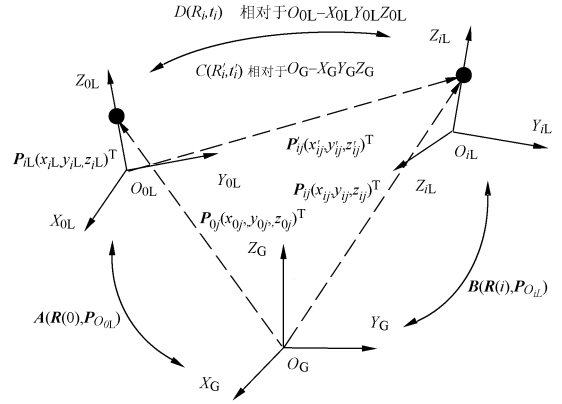


图 4 世界坐标系、摆角坐标系和刚体坐标系的关系

Fig. 4 Relation of global coordinate, vector angle coordinate and local coordinate system

一步推导得到

$$EA = AD. \quad (15)$$

3.2 校准系统坐标系位姿矩阵的求解

式(15)为求解世界坐标系和喷管初始位置坐标系的关系一个基本方程式, 其依据就是喷管运动前后二者之间的相对位置 A 不变。 A 是待求矩阵, E 由给定的 n 个特征点的世界坐标得到, D 由校准装置控制器给出。

如果将式(15)中的各 4×4 矩阵分别用相应的旋转矩阵和平移向量写出, 则可写成

$$\begin{bmatrix} R_e & t_e \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R(0) & P_{O_{0L}} \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R(0) & P_{O_{0L}} \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_i & t_i \\ 0^T & 1 \end{bmatrix}, \quad (16)$$

展开式(16)得到

$$R_e R(0) = R(0) R_i, \quad (17)$$

$$R_e P_{O_{0L}} + t_e = R(0) t_i + P_{O_{0L}}. \quad (18)$$

上式中已知的是 R_e, R_i, t_e, t_i , 且 $R(0), R_e, R_i$ 均为正交单位矩阵, 需要求解的是 $R(0)$ 和 $P_{O_{0L}}$ 。

式(17)和(18)的解不是唯一的, 具体证明过程在这里不再详细介绍^[11]。世界坐标系与刚体初始坐标系之间的旋转矩阵 $R(0)$ 与初始摆心 $P_{O_{0L}}$ 的计算过程为: 首先校准装置上的喷管从初始位置 0 运动到位置 I, 特征点的世界坐标已知, 求出由特征点坐标构成的 R_{e1}, t_{e1} , 由校准装置读出运动基准 R_1, t_1 。由此, 得到 $R(0)$ 与 $P_{O_{0L}}$ 的第一组约束; 接着校准装置上的喷管从位置 I 运动到位置 II, 重复上述过程, 得到 R_{e2}, t_{e2}, R_2, t_2 。由此, 得到 $R(0)$ 与 $P_{O_{0L}}$ 的第二组约束; 然后通过两

组约束方程解出 $\mathbf{R}(0)$ 和 $\mathbf{P}_{O_{0L}}$ 。

当上述两次运动 \mathbf{R}_1 与 \mathbf{R}_2 的旋转轴不互相平行时,解 $\mathbf{R}(0)$ 是唯一的。当 \mathbf{R}_{e1} 与 \mathbf{R}_{e2} 为非单位对角矩阵时(即运动不是纯平移时), $\mathbf{P}_{O_{0L}}$ 也是唯一确定的。当求出 $\mathbf{R}(0)$ 与 $\mathbf{P}_{O_{0L}}$ 后,就可以直接将世界坐标系转换到校准装置的摆角坐标系,这样测得的摆角 δ_i 与瞬时摆心坐标 $\mathbf{P}_{O_{iL}}$ 就可以与校准装置给出的基准角和摆心基准一一对应起来进行比较了。

4 喷管摆心和摆角的校准算法

4.1 摆心的校准算法

喷管摆心定义为某一时刻喷管轴线与旋转轴线的交点,即 $\mathbf{P}_{O_{iL}}$ 为 i 时刻摆心的世界坐标。因为校准装置的摆心静止不动,则测出的 i 时刻与初始时刻摆心坐标偏差即为摆心测量误差,如式(19)。

$$\Delta \mathbf{P}_{O_{iL}} = \mathbf{P}_{O_{iL}} - \mathbf{P}_{O_{0L}}, \quad (19)$$

喷管 i 时刻与初始时刻之间的平移向量的模即为摆心的偏移距离,记作:

$$H_i = |\mathbf{P}_{O_{iL}} - \mathbf{P}_{O_{0L}}|. \quad (20)$$

初始时刻摆心坐标 $\mathbf{P}_{O_{0L}}$ 前面已经求得。下面求 i 时刻摆心坐标 $\mathbf{P}_{O_{iL}}$ 。在 i 时刻,当喷管摆动一个角度后,特征点在世界坐标系下坐标分别为 $\mathbf{P}_{ij}(x_{ij}, y_{ij}, z_{ij})$ 。由于摆心偏移,刚体的坐标系原点由 $\mathbf{P}_{O_{0L}}(x_{O_{0L}}, y_{O_{0L}}, z_{O_{0L}})$ 变为 $\mathbf{P}_{O_{iL}}(x_{O_{iL}}, y_{O_{iL}}, z_{O_{iL}})$,由于刚体的坐标原点到刚体其他特征点的距离不变,则其坐标满足:

$$|\mathbf{P}_{ij} - \mathbf{P}_{O_{iL}}| = |\mathbf{P}_{0j} - \mathbf{P}_{O_{0L}}| = |\mathbf{P}_{jL}| = d_j, \quad (21)$$

即

$$\begin{cases} d_1^2 = (x_{O_{iL}} - x_{i1})^2 + (y_{O_{iL}} - y_{i1})^2 + (z_{O_{iL}} - z_{i1})^2 \\ d_2^2 = (x_{O_{iL}} - x_{i2})^2 + (y_{O_{iL}} - y_{i2})^2 + (z_{O_{iL}} - z_{i2})^2 \\ \vdots \\ d_n^2 = (x_{O_{iL}} - x_{in})^2 + (y_{O_{iL}} - y_{in})^2 + (z_{O_{iL}} - z_{in})^2 \end{cases}, \quad (22)$$

化简后由最小二乘法得到 i 时刻喷管摆心 $\mathbf{P}_{O_{iL}}(x_{O_{iL}}, y_{O_{iL}}, z_{O_{iL}})$ 。

4.2 喷管姿态矩阵的求取

在所有特征点的世界坐标已知,且 $\mathbf{R}(0)$ 和 $\mathbf{P}_{O_{0L}}$ 的情况下,根据式(9)可以求得所有特征点在刚体坐标系下的坐标 \mathbf{P}_{jL} ,又因为特征点的世界

坐标与刚体系下坐标有式(10)所示关系,则刚体的旋转矩阵 $\mathbf{R}(i)$ 阵通过式(23)求得。

$$\min J = \sum_{j=1}^n \|\mathbf{P}_{ij} - \mathbf{P}_{O_{iL}} - \mathbf{R}(i) \cdot \mathbf{P}_{jL}\|^2, \quad (23)$$

式中 n 为特征点的个数。令 $\mathbf{Q}_i = \mathbf{P}_{ij} - \mathbf{P}_{O_{iL}}$, 则式(23)变为:

$$\min J = \sum_{j=1}^n \|\mathbf{Q}_i - \mathbf{R}(i) \cdot \mathbf{P}_{jL}\|^2, \quad (24)$$

根据 Carley 定理计算 $\mathbf{R}(i)$ 。因为所采用的运动检测相机拍摄速度很高,因此在较短的帧间时间间隔内,旋转角 θ_i 将大大低于 180° 。定义 $\mathbf{k} = (k_1, k_2, k_3)^T$ 为 Carley 向量,对应的反对称矩阵是:

$$\mathbf{S}_k = \begin{bmatrix} 0 & k_3 & -k_2 \\ -k_3 & 0 & k_1 \\ k_2 & -k_1 & 0 \end{bmatrix}, \quad (25)$$

当 $\theta_i < 180^\circ$, 利用 Carley 定理,有

$$\mathbf{R}(i) = (\mathbf{I} - \mathbf{S}_k)^{-1}(\mathbf{I} + \mathbf{S}_k) \Leftrightarrow \mathbf{S}_k = (\mathbf{R}(i) + \mathbf{I})^{-1}(\mathbf{R}(i) - \mathbf{I}). \quad (26)$$

将公式(26)代入公式(24)中,得到

$$\min J' = \sum_{i=1}^n \|\mathbf{v}_i - \mathbf{S}_{u_i} \mathbf{k}\|^2, \quad (27)$$

式中, $\mathbf{v}_i = \mathbf{Q}_i - \mathbf{P}_{jL}$; $\mathbf{u}_i = \mathbf{Q}_i + \mathbf{P}_{jL}$; \mathbf{S}_{u_i} 为 \mathbf{u}_i 对应的反对称矩阵,公式(27)等价于一个正则方程组的求解

$$\mathbf{A}\mathbf{P} = \mathbf{b}, \quad (28)$$

式中 $\mathbf{A} = \sum_i \mathbf{S}_{u_i}^T \mathbf{S}_{u_i}$; $\mathbf{b} = \sum_i \mathbf{S}_{u_i}^T \mathbf{v}_i$ 。

一旦得到 Carley 向量 \mathbf{P} , 则可以通过式(23)和(26)计算出旋转矩阵 $\mathbf{R}(i)$ 。上述方法在 $\mathbf{R}(i)$ 特征值不等于 -1 , 即旋转角不等于 180° 的情况下有最优解。

4.3 喷管摆角的校准算法

校准装置给定 i 时刻标准摆角 δ_i' , 偏航摆角 δ_{ix}' 和俯仰摆角 δ_{iy}' , 用视觉测量系统测得的喷管摆角 δ_i 、 δ_{ix} 、 δ_{iy} 与标准值做差得到摆角测量误差,如式(29)所示。

$$\begin{cases} \Delta \delta_i = \delta_i - \delta_i' \\ \Delta \delta_{ix} = \delta_{ix} - \delta_{ix}' \\ \Delta \delta_{iy} = \delta_{iy} - \delta_{iy}' \end{cases}, \quad (29)$$

如图 5 所示,喷管由初始位置摆动 i 时刻位置。图中的符号分别为:摆角 δ_i , 两轴线 L_i 和 L_0 的夹角;俯仰摆角 δ_{iy} , 喷管摆角 δ_i 在初始坐标系

$Y_{0L}O_{0L}Z_{0L}$ 平面内的投影; 偏航摆角 δ_{ix} , 喷管摆角 δ_i 在初始坐标系 $X_{0L}O_{0L}Z_{0L}$ 平面内的投影; φ_i 即轴线 L_i 与初始坐标系 X_{0L} 的夹角。

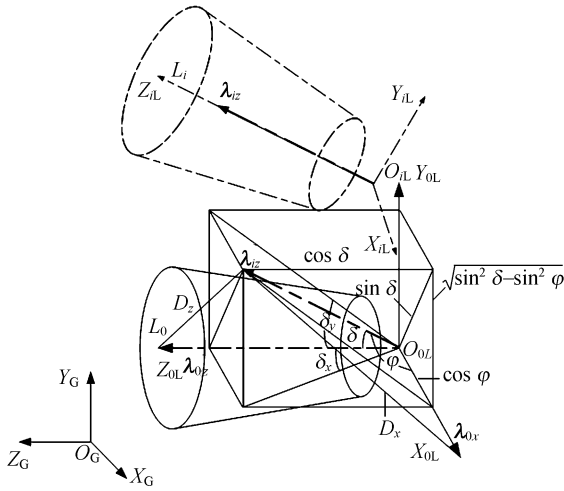


图 5 喷管摆角和摆心求解示意图

Fig. 5 Sketch of nozzle rotation angle and solution center

令刚体初始坐标系中 Z_{0L} 上的单位矢量为 $\lambda_{zL} = [0, 0, 1]^T$, 则两轴线 L_0 和 L_i 在世界坐标系中的方向矢量分别为 $\lambda_{0z} = \mathbf{R}(0)\lambda_{zL}$ 和 $\lambda_{iz} = \mathbf{R}(i)\lambda_{zL}$, 将矢量 λ_{iz} 平移到初始坐标系, 将这两个矢量相减得到的矢量的模, 如式(30)所示。

$$D_{iz} = |\lambda_{iz} - \lambda_{0z}| = |\mathbf{R}(i)\lambda_{zL} - \mathbf{R}(0)\lambda_{zL}|, \tag{30}$$

进一步求得 D_{iz} 对应的夹角 δ_i 即喷管摆角:

$$\delta_i = \arccos\left(\frac{2 - D_{iz}^2}{2}\right), \tag{31}$$

令刚体初始坐标系中 X_{0L} 上的单位矢量为 $\lambda_{xL} = [1, 0, 0]^T$, 其在世界坐标系中表示为 $\lambda_{0x} = \mathbf{R}(0)\lambda_{xL}$, 将矢量 λ_{iz} 与 λ_{0x} 相减得到的新矢量的模记作:

$$D_{ix} = |\lambda_{iz} - \lambda_{0x}| = |\mathbf{R}(i)\lambda_{zL} - \mathbf{R}(0)\lambda_{xL}|, \tag{32}$$

进一步求得 D_{ix} 对应的夹角:

$$\varphi_i = \arccos\left(\frac{2 - D_{ix}^2}{2}\right), \tag{33}$$

则对应的俯仰摆角:

$$\delta_{iy} = \arctan\left(\frac{\sqrt{\sin^2 \delta_i - \cos^2 \varphi_i}}{\cos \delta_i}\right), \tag{34}$$

偏航摆角:

$$\delta_{ix} = \arctan\left(\frac{\cos \varphi_i}{\cos \delta_i}\right). \tag{35}$$

5 校准实验

本校准实验将校准装置作为运动标准器, 由其提供基准摆角和摆心等运动参数, 然后同喷管运动测量系统测得的摆角和摆心等运动参数作对比, 得出运动参数的测量误差, 如图 6 所示。

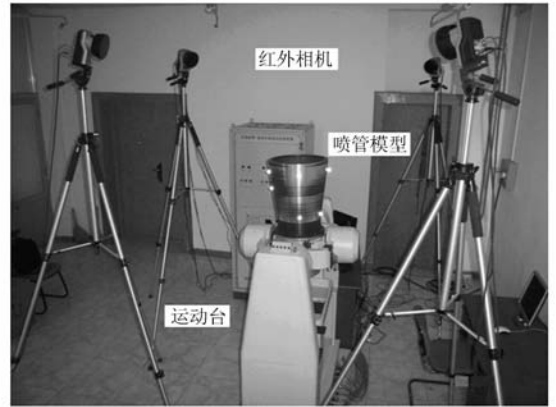


图 6 喷管运动视觉测试的校准实验图

Fig. 6 Calibration experiment of nozzle motion measurement

校准装置实际上是一个火箭喷管运动的半实物仿真设备, 其性能指标如表 1 所示。喷管运动模型对称布置 8 个红外反光球, 使其在运动范围内保持至少被 2 个相机捕捉。相机的标定结果及主要参数如表 2 所示。喷管从 X 轴 -12° , Y 轴 12° 摆动至 X 轴 12° , Y 轴 -12° 。摆动的角速度为 $10^\circ/\text{s}$, 角加速度为 $10^\circ/\text{s}^2$ 。采样频率为 100 Hz, 采样时间为 4 s。

表 1 双轴摇摆直线升降校准装置的性能指标

Tab. 1 Parameters of two-axis rotating and single-axis translating calibration equipment

参数	摆动范围	角定位精度	直线定位精度	喷管摆角指向精度	摆心位置精度
指标	$\pm 12^\circ$	0.001°	0.005 mm	0.003°	0.05 mm

表 2 测试系统的主要参数设置

Tab. 2 Parameters of motion test system

参数	测量空间	采样帧频	标定残差	单点标准差
指标	$2 \text{ m} \times 2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$	100 Hz	0.07 mm	0.05 mm

5.1 喷管摆角误差

测量的摆角误差按式(29)计算,分别为摆角误差 $\Delta\delta_i$ 、偏航角误差 $\Delta\delta_{ix}$ 、俯仰角误差 $\Delta\delta_{iy}$ 如图 7 所示。

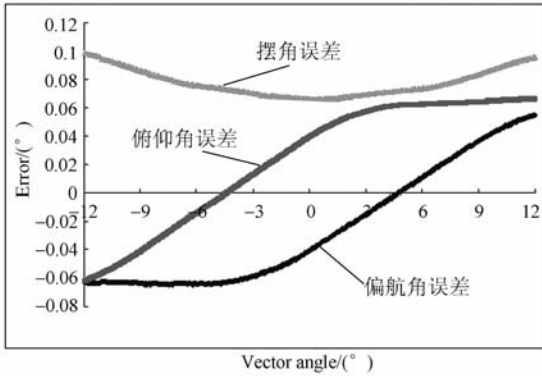


图 7 喷管摆角测量误差

Fig. 7 Nozzle rotation measurement errors

5.2 喷管摆心误差

测量的摆心误差按式(19)和式(20)计算,分别为 X,Y,Z3 个方向上的坐标误差和摆心距离误差 H_i ,如图 8 所示。

从摆角和摆心的测量误差看出,它们的误差直接取决于单点误差,其为运动测量的基础数据,直接关系到摆角和摆心等参数的测量精度。标定相机外参时,应尽量将校准区域覆盖喷管的运动区域,以上的实验相机外参标定是在喷管零位时完成的,因此零位附近的摆角误差 $\Delta\delta_i$ 和摆心误差 H_i 较小, $\pm 12^\circ$ 误差最大,在摆动空间内成“V”字形变化。

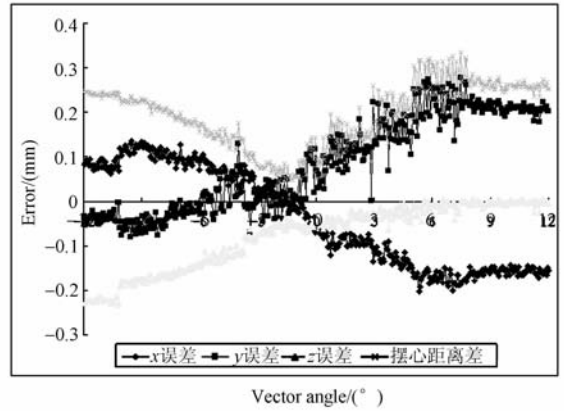


图 8 喷管摆动时摆心测量误差

Fig. 8 Rotation center measurement errors as nozzle rotating

6 结 论

本文针对喷管运动视觉测试精度的校准问题提出了一种新的校准方法。通过校准装置给定两次不同轴的基准运动,建立了喷管摆角坐标系,实现了将校准装置提供的摆心、摆角等标准值与视觉测量系统的测量值在空间的对应关系;通过时间同步系统向校准装置和视觉运动测量系统发送同步时间基准信号和同步触发信号,二者的采样时间被同步,实现了标准值与测量值在时间上的对应关系,可以直接在喷管运动的状态下得到视觉运动测量系统的测量误差。给出了喷管摆心和摆角的校准算法,通过校准实验表明,喷管在 $\pm 12^\circ$ 的摆动空间内摆角的最大测量误差为 0.093° ,摆心的最大测量误差为 0.832 mm 。实现了对喷管运动视觉测量系统测量精度的校准,为测量系统的进一步完善奠定了基础。

参考文献:

[1] SUTTON G. *Rocket Propulsion Elements: An Introduction to the Engineering of Rockets*[M]. New York: Wiley, 1992:12-17.

[2] CAO W P, BI W, CHE R SH. 6-DOF motion and center of rotation estimation based on stereo vision [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering (English Edition)*, 2008, 21(2): 87-92.

[3] JAMES G. The measurement of human motion: a

comparison of commercially available systems[J]. *Human Movement Science*, 1999(18): 589-602.

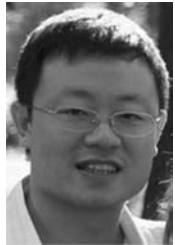
[4] ANDREW D W, DAVID G T, DONALD D F. Accuracy assessment and interpretation for optical tracking systems[C]. *Proceedings of Medical Imaging, Waitsfield*, 2004:421-432.

[5] STATES R A, PAPPAS E. Precision and repeatability of the Optotrak 3020 motion measurement system[J]. *Journal of Medical Engineering & Technology*, 2006, 30 (1): 11-16.

[6] ANGELA E. K, TREVOR B, THOMAS R J.

- Comparative accuracy of radiostereometric and optical tracking systems[J]. *Journal of Biomechanics*, 2009(42):1350-1354.
- [7] 潘淑杰,董守平,王红丽. 应用灭点标定的立体视觉自由曲面三维重建[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(5):1127-1133.
PAN SH J, DONG SH P, WANG H L. Three de-mentional reconstruction of stereo vision free-form surface based on vanishing-point calibration [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(5):1127-1133. (in Chinese)
- [8] 王一,刘常杰,任永杰,等. 通用机器人视觉检测系统的全局校准技术[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(12):3028-3033.
WANG Y, LIU CH J, REN Y J, *et al.*. Global calibration of visual inspection system based on universal robots[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(12):3028-3033. (in Chinese)
- [9] 孙军华,刘震,张广军,等. 基于柔性立体靶标的摄像机标定[J]. *光学学报*, 2009, 29(12):3433-3439.
SUN J H, LIU ZH, ZHANG G J, *et al.*. Camera calibration based on flexible 3D target[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(12):3433-3439. (in Chinese)
- [10] 刘博,叶东,车仁生. 火箭喷管三维运动测试的校准装置及误差分析[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(7):1553-1560.
LIU B, YE D, CHE R SH. Calibration equipment for rocket nozzle motion testing and its error analysis[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(7):1553-1560. (in Chinese)
- [11] SHIU Y C, AHMAD S. Calibration of wrist-mounted robotic sensors by solving homogenous transform equations of the form $AX = XB$ [J]. *Robotics and Automation IEEE*, 1989, 5(1):16-29.

作者简介:



刘 博(1979—),男,辽宁锦州人,博士研究生,主要从事立体视觉运动量测量及校准技术的研究。E-mail:liubohit@sohu.com



叶 东(1968—),男,湖北武汉人,教授,博士生导师,主要从事基于串/并联结构的坐标测量理论和技术、双目/单目视觉坐标测量理论和技术的研究。E-mail:yedong@hit.edu.cn



陈 刚(1971—),男,博士,讲师,主要从事视觉坐标测量与视觉检测技术的研究。E-mail:chengang@hit.edu.cn

导师简介:



车仁生(1939—),男,黑龙江哈尔滨人,教授,博士生导师,主要从事仿生计量学、视觉静态与动态三维测试技术、虚拟现实技术与仪器等方面的研究。E-mail:crs@hit.edu.cn

(本栏目编辑:白雨虹)