



同步带类运动控制器几何误差的成像检测方法

李佳田¹ 牛一如¹ 贺日兴² 贾成林¹ 李 键¹ 吴华静¹

1 昆明理工大学国土资源工程学院,云南昆明,650093

2 公安部信息中心,北京,100741

摘要:用于变形监测任务的激光雷达扫描仪需要采用运动控制器来变换探头位置以发射/接收光束,通常运动控制器由步进电机与同步带构成。提出了一种基于外方位元素标定的同步带类运动控制器误差模型建立方法,具体步骤为:①恢复运动轴上不同位置处已知控制点坐标与像平面坐标之间的单应关系,得到摄影机的内、外方位元素;②对不同位置处外方位元素中的平移向量进行线性运算后,求解相应的位置关系;③将输入脉冲数对应的距离作为真值,与所求位置关系作差得到多组误差数据,利用拟合对误差建立多项式模型。实验结果表明,利用该方法检测误差所需设备少且操作简单,所建误差模型精度达到亚毫米级,并能有效地对位置控制予以补偿;同步带类运动控制器的主要误差来源于同步带,以其作为基础的相关测绘仪器可分部件进行校验,以节省使用成本。

关键词:运动控制器;同步带;几何误差;外方位元素;成像检测

中图分类号:P237

文献标志码:A

运动控制通常是指在复杂条件下将预定的控制方案、规划指令转变成期望的机械运动,实现机械运动的位置控制、速度控制、转矩或力的控制^[1]。在视觉测量与民用测绘领域,运动控制器具有显著的支撑作用。如三维坐标测量机(或非接触式测量平台)的探头位置由3台直线运动控制器联合提供^[2];脉冲激光雷达的作业形式(扫描式、旋转式)分别由直线与旋转式运动控制器提供^[3-4];无人机中的相机姿态通常由3台旋转运动控制器联合提供^[5-6]。运动控制器误差检测方法有9线法^[7-8]、球杆仪法^[9]和对角矢量测量法^[10]。这些方法均需要专业测量设备支持,难以得到更加普遍的应用。

激光雷达扫描仪已广泛应用于各个领域^[11-13]。以旋转式扫描仪为例,其多面棱镜位于扫描透镜的前焦面,并均匀旋转,使激光束对反射镜而言,入射角相对连续的改变^[14]。因此,由运动控制器所提供的旋转速度可以在一个小的区间范围内,而非像精密工业仪器那样严格要求,故运动控制器的传动部分通常采用同步带^[15]。同步带易疲劳而变形,从而使扫描仪精度

降低。本文以摄影测量理论方法为支撑,设计运动控制器的几何误差实验,利用摄影机外方位元素建立几何误差模型,对运动控制予以补偿。

1 几何误差的成像检测及建模

1.1 误差模型的选择

根据误差性质,在两轴运动控制器中主要包括4种误差:几何误差、热误差、力误差与控制误差^[16]。在各项误差源中,几何误差和热误差占绝大部分^[17]。考虑到运动控制器在测绘作业中的应用,其他误差均可看作是几何误差的高阶无穷小项。因此,将运动轴几何误差作为存在的唯一误差。在精密工业几何误差建模中,通常采用结构体运动分类(移动、转动与固定)、相邻结构体特征关系与特征变换矩阵3个步骤建立模型,其原理在于依据运动控制器的各个组成部分来表达误差与误差传递。在此,将误差分解为同步带传动部分变形所引起的线性误差、电机转动部分引起的非线性误差与干扰误差 ϵ 共3部分:

$$\Delta = ax^2 + bx + cy^2 + dy + exy + \epsilon \quad (1)$$

式中, Δ 即为运动控制器的几何误差; x 、 y 分别表

收稿日期:2018-01-16

项目资助:国家自然科学基金(41561082,41161061)。

第一作者:李佳田,博士,教授,主要研究方向为数值最优化方法与机器场景理解。ljtwcx@163.com

通讯作者:牛一如,硕士。2279365497@qq.com

示其横轴和纵轴运动距离真值; b 、 d 表示线性误差的系数项; a 、 c 、 e 表示电机转动部分引起的非线性误差的系数项。故对于两轴运动控制器,需采用二元二次多项式模型分别建立两轴运动控制误差模型。

1.2 实验设计

如图1所示, S 为摄影中心,其为像空间坐标系原点, sS 为摄影机主光轴,其为像空间坐标系的 Z 轴,将棋盘格标定板固定于运动轴上,使其能随横轴和纵轴自由运动,将标定板左上角内角点作为物空间坐标系的原点 O ,以 O 点为起点的

棋盘格横向线和纵向线分别为物空间坐标系的 X 轴与 Y 轴,使其分别平行于运动控制器的横轴与纵轴。其中,物空间坐标系的 X 轴、 Y 轴、 Z 轴与像空间坐标系的 X_c 轴、 Y_c 轴、 Z_c 轴的夹角分别为 φ 、 ω 、 κ 。摄影中心 S 在物空间坐标系中的旋转矩阵即由 φ 、 ω 、 κ 的方向余弦组成,平移向量为 $[X_s \ Y_s \ Z_s]^T$,上述 φ 、 ω 、 κ 3个角定向元素及 X_s 、 Y_s 、 Z_s 三维坐标值即为像片的外方位元素。通过在轴运动平面内选取多个位置,分别求取外方位元素,即可根据平移向量之差求得轴实际运动距离(X_{12} , Y_{12})。

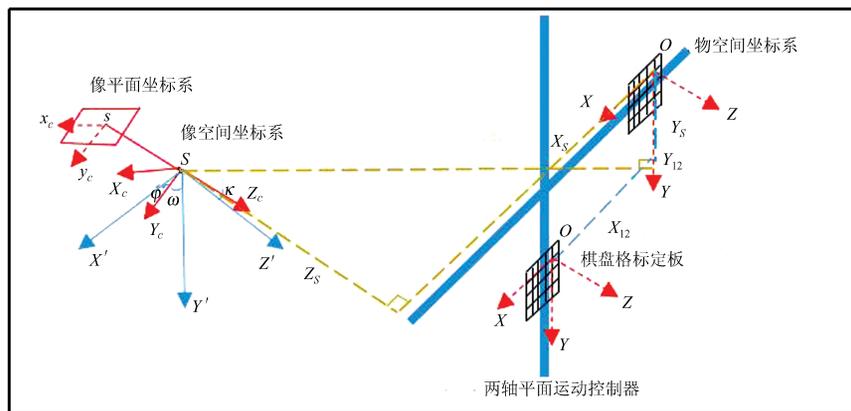


图1 实验设计示意图

Fig.1 Experimental Design Diagram

1.3 解算过程

如图1所示, $S-X_c Y_c Z_c$ 为像空间坐标系, $s-x_c y_c$ 为像平面坐标系, $O-XYZ$ 为物空间坐标系,控制棋盘格标定板在两轴上运动,并由固定的摄影机分别对不同位置处的标定板拍摄像片,以此计算相应的外方位元素。

将文献[18]中的中心投影构像方程式改写为如下矩阵形式:

$$\begin{bmatrix} \frac{x-x_0}{-f_x} & \frac{y-y_0}{-f_y} & 1 \end{bmatrix}^T = \lambda \left(\begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -X_s \\ -Y_s \\ -Z_s \end{bmatrix} \right) \quad (2)$$

式中, x 、 y 分别表示像点在像平面坐标系中的坐标; x_0 、 y_0 表示像主点坐标; f_x 、 f_y 分别表示 x 、 y 方向上的焦距; a_i 、 b_i 、 c_i ($i=1,2,3$)是 $\varphi\omega\kappa$ 系统中像片外方位角元素组成的方向余弦^[19]; λ 是为方便使用矩阵表示而引入的尺度比例因子, $\lambda = \frac{1}{a_3(X-X_s) + b_3(Y-Y_s) + c_3(Z-Z_s)}$,令:

$$T' = \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -X_s \\ -Y_s \\ -Z_s \end{bmatrix} = -RT \quad (3)$$

式中, R 表示物空间坐标系到像空间坐标系的旋转矩阵; T 是由外方位线元素 X_s 、 Y_s 、 Z_s 组成的向量,表示摄影中心 S 在物空间坐标系中的坐标; t_x 、 t_y 、 t_z 是物空间坐标系原点在像空间坐标系中的坐标。

将式(2)表示为:

$$\begin{aligned} \tilde{U} &= [x \ y \ 1]^T = \\ \lambda & \begin{bmatrix} -f_x & 0 & x_0 \\ 0 & -f_y & y_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 & t_x \\ a_2 & b_2 & c_2 & t_y \\ a_3 & b_3 & c_3 & t_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} = \\ & \lambda A [R \ T'] \tilde{W} \quad (4) \end{aligned}$$

式中, \tilde{U} 表示像素的齐次坐标; A 为摄影机的内方位元素矩阵; \tilde{W} 表示像点所对应的物空间坐标系的齐次坐标。

分两种情况对式(4)中的方位元素进行求解:

1) 考虑到摄影机内方位元素求解过程中只

需关注各平面坐标,故将式(4)进行简化,如图1所示,令所选取物像空间坐标系中的 $Z=0^{[20]}$,即:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \lambda A \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} = H' \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中, $r_1 = [a_1 \ a_2 \ a_3]^T$, $r_2 = [b_1 \ b_2 \ b_3]^T$, $r_3 = [c_1 \ c_2 \ c_3]^T$ 分别表示各旋转向量; $t = [t_x \ t_y \ t_z]^T$ 表示平移向量。令 $H' = [h_1 \ h_2 \ h_3] = \lambda A [r_1 \ r_2 \ t]$, 此时 H' 为一个 3×3 的矩阵, 利用齐次坐标的性质, 令 $h_{33} = 1$, 故需4组对应点坐标即可求出 H' 。

令 $\tau = 1/\lambda$, 由式(5)可得:

$$\begin{cases} r_1 = \tau A^{-1} h_1 \\ r_2 = \tau A^{-1} h_2 \end{cases} \quad (6)$$

根据旋转向量的正交性和尺度不变性, 可根据如下约束条件求解内方位元素:

$$\begin{cases} r_1^T r_2 = 0 \\ r_1^T r_1 = r_2^T r_2 \end{cases} \quad (7)$$

将式(6)代入式(7)可得:

$$\begin{cases} h_1^T A^{-T} \tau \tau A^{-1} h_2 = 0 \\ h_1^T A^{-T} \tau \tau A^{-1} h_1 = h_2^T A^{-T} \tau \tau A^{-1} h_2 \end{cases} \quad (8)$$

则可通过3个 H' 列出6个方程之后再进行Cholesky分解得到式(8)中的内方位元素 A 。求出 A 后, 根据式(6)可求出 r_1, r_2 , 再依据 $r_3 = r_1 \times r_2, t = \tau A^{-1} h_3$ 即可得到 r_3, t 。

假定像片上角点附近的噪声服从高斯分布, 利用最小二乘优化对式(9)进行极大似然估计:

$$\min_{A, R, t} \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \|m_{ij} - \tilde{m}(A, R_i, t_i, M_j)\|^2 \right) \quad (9)$$

式中, n 表示像片总数; m 表示每张像片上的内角点总数; m_{ij} 表示第 i 幅像片上第 j 个角点的像素坐标; $\tilde{m}(A, R_i, t_i, M_j)$ 表示对物点 M_j 单应性运算后得到的在第 i 幅像片上投影点的像素坐标。至此, 即可得到内外方位元素。

2) 在利用上述方法求得内方位元素后, 若有多个已知点共面, 可直接利用单应性矩阵求解外方位元素, 避免最小二乘解法无初值或初值不够准确的情况。可将式(4)改写为:

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ 1 \end{bmatrix} = \lambda \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 & t_x \\ a_2 & b_2 & c_2 & t_y \\ a_3 & b_3 & c_3 & t_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

假设由物空间坐标系中的3个点形成的平面方程为:

$$AX + BY + CZ + D = 0 \quad (11)$$

根据3个点在物空间坐标系中的坐标, 可求出常

量 A, B, C, D 的值。则该平面上 Z 坐标可表示为:

$$Z = -\frac{AX + BY + D}{C} \quad (12)$$

代入式(10)得:

$$\begin{aligned} [X_c \ Y_c \ 1]^T &= \\ \lambda \begin{bmatrix} a_1 - \frac{Ac_1}{C} & b_1 - \frac{Bc_1}{C} & t_x - \frac{Dc_1}{C} \\ a_2 - \frac{Ac_2}{C} & b_2 - \frac{Bc_2}{C} & t_y - \frac{Dc_2}{C} \\ a_3 - \frac{Ac_3}{C} & b_3 - \frac{Bc_3}{C} & t_z - \frac{Dc_3}{C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} &= \\ \lambda Q \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} &= \lambda \begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} & q_{13} \\ q_{21} & q_{22} & q_{23} \\ q_{31} & q_{32} & q_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (13)$$

根据旋转矩阵的正交性, 可根据式(13)得出如下约束条件:

$$\begin{cases} \frac{q_{11}q_{12} + q_{21}q_{22} + q_{31}q_{32}}{q_{11}^2 + q_{21}^2 + q_{31}^2} = \frac{AB}{A^2 + C^2} \\ \frac{q_{11}q_{12} + q_{21}q_{22} + q_{31}q_{32}}{q_{12}^2 + q_{22}^2 + q_{32}^2} = \frac{AB}{B^2 + C^2} \end{cases} \quad (14)$$

对式(13)中的像空间坐标 X_c, Y_c 同时消去 λ 后得:

$$\begin{cases} X_c = \frac{q_{11}X + q_{12}Y + q_{13}}{q_{31}X + q_{32}Y + q_{33}} \\ Y_c = \frac{q_{21}X + q_{22}Y + q_{23}}{q_{31}X + q_{32}Y + q_{33}} \end{cases} \quad (15)$$

将3对点坐标代入式(15), 根据式(13)的齐次性, 即可解出 Q 。因在解算 Q 的过程中令 $q_{33} = 1$, 故所求 Q 与式(13)中的实际 Q 值之间相差一个齐次因子 q_{33} , 可根据式(14)中的约束条件求解 q_{33} :

$$\begin{aligned} q_{33} &= \pm \sqrt{\frac{C^2(q_{11}q_{12} + q_{21}q_{22} + q_{31}q_{32})}{AB}} = \\ &\pm \sqrt{\frac{C^2(q_{11}^2 + q_{21}^2 + q_{31}^2)}{A^2 + C^2}} = \\ &\pm \sqrt{\frac{C^2(q_{12}^2 + q_{22}^2 + q_{32}^2)}{B^2 + C^2}} \end{aligned} \quad (16)$$

因摄影机始终在已知点的后方, 故 q_{33} 需满足:

$$q_{33}(q_{31}X + q_{32}Y + 1) < 0 \quad (17)$$

依此条件即可判断出 q_{33} 的正负号。

求出像空间坐标与物空间坐标之间的变换矩阵 Q 后, 就可得到 r_1, r_2, T' , 再根据 $r_3 = r_1 \times r_2$ 得到 r_3 :

$$r_3 = \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_2 b_3 - a_3 b_2 \\ a_3 b_1 - a_1 b_3 \\ a_1 b_2 - a_2 b_1 \end{bmatrix} \quad (18)$$

根据式(3)即可求出摄影中心 S 在物空间坐标系中的坐标 T 。至此,求出了单张像片的所有外方位元素。因棋盘格标定板的 X 、 Y 轴分别与运动控制器的横、纵轴平行,可将所求不同位置处外方位元素中的平移向量之差作为两个轴方向的运动距离值。

综上所述,同步带类两轴运动控制器的误差检测与建模过程如下。

1) 误差检测:(1)读取同一摄影机不同角度对标定板拍摄的 n 张像片;(2)对该摄影机进行内方位元素标定,得到摄影机焦距 f 以及像主点坐标 x_0 、 y_0 ;(3)两轴运动控制器平面内均匀选取 m 个点;(4)分别对运动到各点处的标定板拍摄像片;(5)根据所求摄影机内参数矩阵 A ,分别对 m 张像片求解外方位元素 R_m 、 T_m ,得到摄影瞬间摄影中心和像片在物空间坐标系中的位置和姿态;(6)根据在运动轴上不同位置处所得的外方位元素 R_m 、 T_m ,得到不同方向上的轴运动距离 $T_{mk} = T_m - T_k$;(7)将不同位置间运动轴所输入的脉冲数作为真值 d_0^{mk} ,与根据外方位元素标定求得轴运动距离 T_{mk} 作差,求出差值 $\Delta d_{mk} = T_{mk} - d_0^{mk}$ 即为误差值。

2) 误差模型:(1)在不同条件下,通过多次测量得到多组误差值 Δd_{mk} ;(2)对多组误差求均值,分别得到两轴的基准误差数据;(3)对基准误差数据进行二次多项式拟合,分别得到该运动控制器横、纵轴的误差模型。

2 几何误差数据分析

实验所用摄影机为FINEPIX S205EXR,所用设备为同步带类两轴运动控制器,按照图1中的实验设计方案放置摄影机。实验平台由计算机、PCI-1240U运动控制卡、连接缆线、两个接线板、两个步进电机、两个同步带控制导轨组成。将棋盘格标定板固定于运动轴上,使其能随各单轴运动,图2即为其运动到6个不同位置处拍摄的像片。

使用摄影机在任意位置以不同角度对棋盘格标定板拍摄20张像片,求得摄影机内方位元素为:

$$A =$$

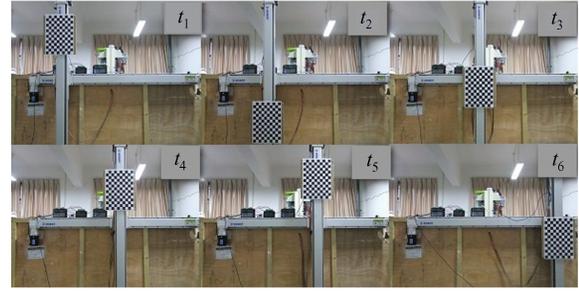


图2 不同运动位置示意图

Fig.2 Diagram of Different Motion Positions

$$\begin{bmatrix} 562.453\ 674 & 0 & 319.054\ 108 \\ 0 & 569.957\ 031 & 239.305\ 176 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (19)$$

平均每张像片角点的误差为0.406 304个像素,之后将摄影机按图1所示放置在与运动轴相对的位置处,固定摄影机,以保证其能拍到整个运动控制器。在运动控制器平面上均匀地选取121个实验点,控制轴依次运动到不同实验点处,并对每个位置处的标定板拍摄像片,利用所拍像片分别得到不同位置间两轴的运动距离,根据对所用步进电机的设置可知,25 000个脉冲对应的距离值为10 cm。据此可求出不同运动距离对应的真值,与所测距离求差即可得到运动误差。对所求的两轴误差数据分别进行最小二乘拟合,求取运动轴误差模型。通过历时45 d的观测,分别在不同时间、轴连续运动时间不同的情况下,正反向多次测量得到6组误差数据,对其求均值得到基准误差数据,见表1和表2。

分别对运动控制器横轴基准误差和纵轴基准误差进行二次多项式拟合,得到置信度为95%的误差模型分别为:

$$\Delta x = 0.018\ 96 + 0.005\ 888x + 0.001\ 699y + 4.817 \times 10^{-6}x^2 - 1.264 \times 10^{-6}xy + 3.19 \times 10^{-8}y^2 \quad (20)$$

$$\Delta y = -0.125\ 8 + 0.001\ 572x + 0.007\ 542y - 4.046 \times 10^{-7}x^2 + 1.129 \times 10^{-6}xy + 3.31 \times 10^{-6}y^2 \quad (21)$$

式中, x 、 y 分别为运动控制器的横轴和纵轴运动距离真值(mm); Δx 、 Δy 分别为对应的横轴与纵轴误差值(mm)。

图3为所建横轴与纵轴误差模型图,其中, x 为横轴运动距离, y 为纵轴运动距离。由图3可知,纵(横)轴的运动对横(纵)轴误差的影响较小,横(纵)轴误差主要受横(纵)轴的运动距离影响,且随着距离的增大,误差近似呈线性增长。所建模型的残差

图如图 4 所示。由图 4 可知,两模型对于基准误差数据的残差值均在 $-1\sim 1$ mm 内,且误差极大值出现在相应轴较大运动距离处,横、纵轴误差模型的拟合优度如表 3 所示。

表 1 运动控制器横轴基准误差/mm

Tab.1 Horizontal Axis Datum Error of Motion Controller/mm

Y 位移	X 位移										
	0	100	170	230	310	400	540	610	760	890	980
0	0	1.098 0	1.195 5	1.526 8	2.365 7	3.880 8	4.934 6	6.478 8	6.942 5	8.361 1	10.969 5
80	0.114 1	1.143 2	1.246 2	1.602 3	2.412 0	3.910 5	4.939 6	6.500 9	6.974 2	8.491 2	10.998 2
170	0.325 7	1.315 7	1.535 7	1.624 5	2.421 2	3.935 0	5.023 6	6.624 1	6.996 9	8.499 5	11.042 3
250	0.423 7	1.550 2	1.736 4	1.658 5	2.550 9	4.090 8	5.209 8	6.678 2	7.125 9	8.506 9	11.154 3
310	0.520 4	1.744 1	2.040 8	1.695 3	2.609 3	4.134 6	5.291 3	6.695 8	7.180 4	8.631 2	11.465 4
460	0.565 2	1.959 8	2.229 5	1.778 4	2.718 7	4.240 8	5.376 4	6.749 4	7.204 3	8.745 8	11.578 2
520	0.778 6	2.198 8	2.324 8	1.870 9	2.820 4	4.257 5	5.493 7	6.788 5	7.296 5	8.703 9	11.746 3
640	0.937 4	2.350 9	2.430 4	1.973 4	3.035 7	4.287 4	5.489 3	6.801 3	7.346 5	8.954 2	11.750 9
710	1.352 7	2.493 7	2.653 7	2.139 7	3.210 8	4.330 9	5.463 2	6.815 8	7.398 4	8.932 8	11.847 6
890	1.627 3	2.774 8	2.858 2	2.434 3	3.413 4	4.543 4	5.484 9	6.828 7	7.401 2	8.997 6	11.954 8
920	1.974 5	2.956 4	3.060 3	2.645 9	3.500 9	4.750 1	5.508 2	6.815 4	7.425 9	9.078 4	12.060 4

表 2 运动控制器纵轴基准误差/mm

Tab.2 Vertical Axis Datum Error of Motion Controller/mm

Y 位移	X 位移										
	0	100	170	230	310	400	540	610	760	890	980
0	0	0.102 1	0.121 9	0.232 6	0.383 1	0.432 8	0.723 4	0.803 6	0.854 2	0.914 9	1.254 8
80	0.723 7	0.854 0	0.891 2	0.913 0	1.218 3	1.355 9	1.595 4	1.601 2	1.809 6	1.810 6	1.920 3
170	1.213 4	1.320 9	1.404 0	1.425 8	1.556 5	1.674 2	1.860 9	1.979 8	2.124 7	2.440 8	2.460 4
250	1.735 2	1.856 3	1.916 4	1.989 3	2.193 5	2.490 4	2.609 8	2.708 7	2.884 5	2.976 5	2.978 7
310	2.401 4	2.550 4	2.676 3	2.807 8	2.843 6	2.935 2	3.214 4	3.413 8	3.624 9	3.838 9	3.954 4
460	4.376 2	4.590 2	4.614 8	4.692 2	4.888 5	4.907 3	5.236 6	5.326 4	5.538 0	5.639 2	5.841 5
520	4.802 4	4.948 0	4.979 2	5.190 3	5.423 5	5.726 3	5.985 7	6.126 9	6.240 8	6.357 4	6.560 9
640	6.696 6	6.731 2	6.851 3	6.905 2	6.980 8	7.349 2	7.478 4	7.671 3	7.789 5	7.909 9	7.980 3
710	6.702 3	6.853 2	6.924 8	7.139 4	7.451 3	7.754 5	7.960 2	8.311 4	8.543 8	8.814 2	9.114 7
890	8.451 0	8.582 7	8.788 6	8.897 4	9.105 2	9.318 4	9.426 3	9.538 2	9.741 7	9.832 4	9.940 8
920	10.245 3	10.370 3	10.577 4	10.825 7	11.148 5	11.576 4	11.675 8	11.969 5	12.401 2	12.624 5	12.731 0

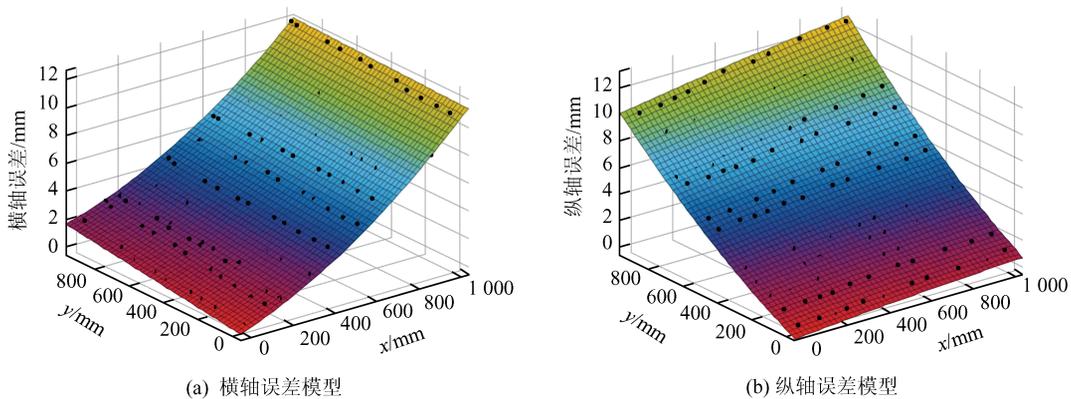


图 3 运动控制器误差模型

Fig.3 Error Models of Motion Controller

表 3 中,和方差表示拟合数据和原始数据对应点的误差的平方和,与所测数据点数量有关;均方根是 SSE 的均值的平方根,其越接近于 0,说

明模型选择和拟合效果越好;确定系数可以用来表示拟合的好坏,其取值范围为 $[0, 1]$,越接近于 1,说明模型拟合效果越好。通过表 3 可知,所建

横轴与纵轴的误差模型拟合效果较好。

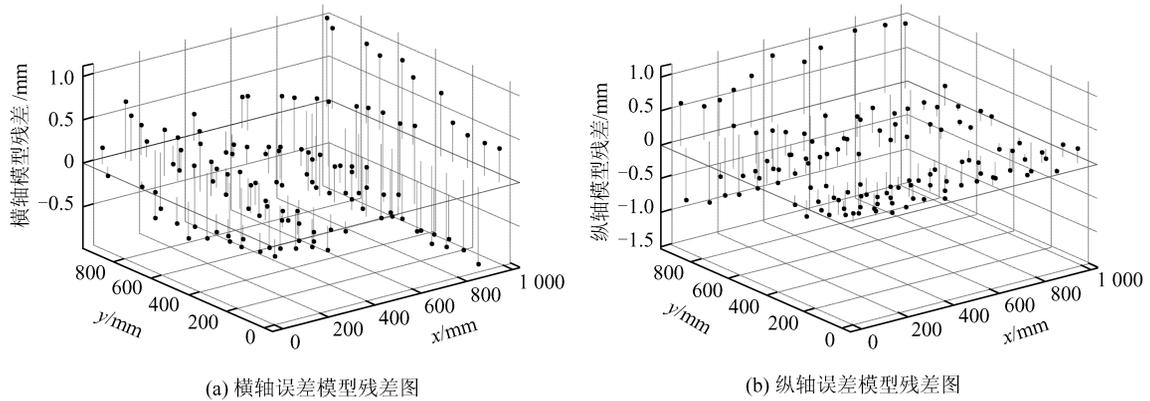


图4 运动控制器误差模型残差图

Fig.4 Residual Plots of Error Models of Motion Controller

表3 运动轴误差模型拟合优度

Tab.3 Goodness of Fit of Motion Axes Error Model

轴向	和方差/ mm^2	确定系数	均方根/ mm
横轴	31.96	0.974 9	0.527 2
纵轴	24.08	0.983 3	0.457 6

通过所测任意20个检查点的轴运动距离值,对所建模型进行检验,经模型补偿后的残差图如图5所示。由图5可知,运动控制器横轴经模型改正后的检查点最小及最大残差分别为0.003 1 mm、-0.441 3 mm,纵轴经模型改正后最小及最

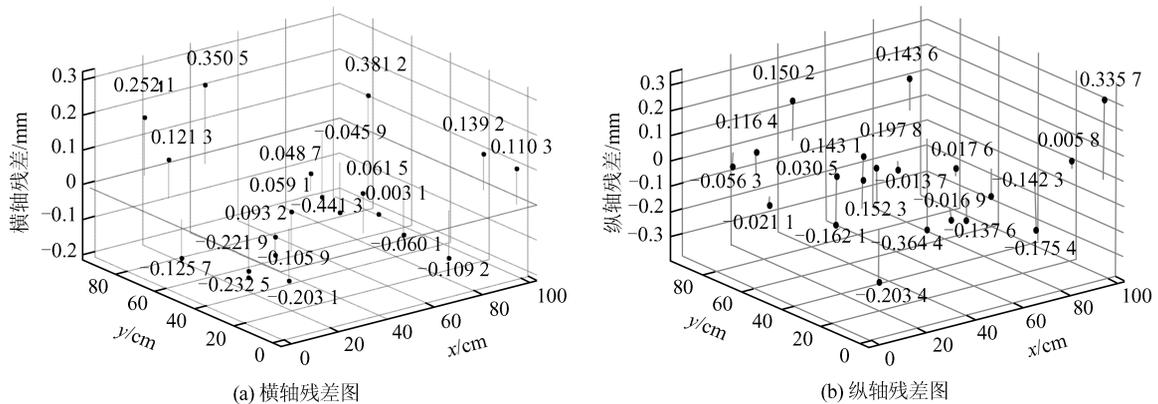


图5 模型改正后两轴运动距离残差图

Fig.5 Residual Plots of Two-Axis Movement Distance After Model Correction

大残差值分别为0.005 8 mm、-0.364 4 mm。

实验结果表明:

1) 利用外方位元素标定检测误差的方法可以应用于亚毫米级精度的同步带类运动控制器几何误差测量。

2) 根据误差模型式(20)、(21)可知,其二次项及 xy 项系数均较小,可认为该运动控制器的几何误差主要来自于同步带传动部分的变形所引起的线性误差。

3) 本实验在运动轴平面上选取121个点分别测量运动距离,可通过合理增加点数及重复测量次数来提高模型精度。

3 结语

对于同步带类两轴运动控制器,本文提出了一种基于外方位元素标定的成像检测方法代替物理或机械方法测量运动轴几何误差。该方法以普通非量测相机为工具,所需设备简单,操作方便。实验结果表明,该控制器误差主要来自于同步带传动误差,且模型精度达亚毫米级,可对激光雷达扫描仪中的控制器、非接触式测量平台等进行校验及运动控制补偿。但该方法目前只适用于平动轴几何误差测量,对较复杂的运动控制器的角度测量及直线度测量等还需进一步研究。

参考文献

- [1] Xi Zhigang, Zhou Hongfu. The Development and Status of the Motion Controller[J]. *Machine Tool Electric Apparatus*, 2005, 32(4): 5-10(祁志刚, 周宏甫. 运动控制器的发展与现状[J]. 机床电器, 2005, 32(4): 5-10)
- [2] Zhang Wangxian. Design and Realization of Stereo Vision Measuring Probe Based on 3D Coordinate Measuring Machine[D]. Wuhan: Wuhan University, 2004(张望先. 基于三坐标测量机的立体视觉测头设计与实现[D]. 武汉:武汉大学, 2004)
- [3] Yu Qiuze, Cao Ju, Tan Yihua, et al. Simulation of Intensity Image of Airborne-Based Imaging Laser Radar Based on DEM and Visible Image [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2004, 33(3): 249-253(于秋则, 曹矩, 谭毅华, 等. 基于DEM与可见光图像的机载激光成像雷达强度像仿真[J]. 测绘学报, 2004, 33(3): 249-253)
- [4] Zhang Tao. Research on Control Algorithm of Photovoltaic Radar Target Simulator [D]. Shenyang: Shenyang Aerospace University, 2012(张涛. 光电雷达目标模拟器控制算法研究[D]. 沈阳:沈阳航空航天大学, 2012)
- [5] Zou H R, Gong Z B, Xie S R. A Pan-tilt Camera Control System of UAV Visual Tracking Based on Biomimetic Eye[C]. The 2006 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, Kunming, China, 2006
- [6] Fahlstrom P G, Gleason T J. Introduction to UAV Systems[M]. New Jersey: John Wiley & Sons, 2012
- [7] Liu Youwu, Liu Libing, Zhao Xiaosong, et al. Investigation of Error Compensation Technology for NC Machine Tool [J]. *China Mechanical Engineering*, 1998, 9(12): 48-52(刘又午, 刘丽冰, 赵小松, 等. 数控机床误差补偿技术研究[J]. 中国机械工程, 1998, 9(12): 48-52)
- [8] Schwenke H, Franke M, Hannaford J, et al. Error Mapping of CMMs and Machine Tools by a Single Tracking Interferometer[J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2005, 54(1): 475-478
- [9] Ziegert J C, Mize C D. The Laser Ball Bar: A New Instrument for Machine Tool Metrology [J]. *Precision Engineering*, 1994, 16(4): 259-267
- [10] Wang C. A Definition of Volumetric Error [J]. *Manufacturing Engineering*, 2005, 134(1): 16-17
- [11] Li Zhen, Wang Hui, Jiang Yuwen. Laboratory Calibration of Phase-Terrestrial 3D Laser Scanner [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2014, 39(8): 987-991(李振, 王辉, 蒋宇雯. 相位式地面三维激光雷达实验室检校[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2014, 39(8): 987-991)
- [12] Cai Yinqiao, Tong Xiaohua, Shu Rong. Fast 3D Imaging with Time-of-Flight Laser Scanner Based on Linear Array Scanning[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2011, 39(7): 1 062-1 067(蔡银桥, 童小华, 舒嵘. 基于线状阵列扫描的激光雷达快速三维成像[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2011, 39(7): 1 062-1 067)
- [13] Lin Xiangguo, Zhang Jixian. 3D Power Line Reconstruction from Airborne LiDAR Point Cloud of Overhead Electric Power Transmission Corridors[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2016, 45(3): 347-353(林祥国, 张继贤. 架空输电线路机载激光雷达点云电力线三维重建[J]. 测绘学报, 2016, 45(3): 347-353)
- [14] Zhang Yi, Yan Li, Yang Hong, et al. Spherical Center Error of Sphere Target in TLS[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37(5): 598-601(张毅, 闫利, 杨红, 等. 地面激光扫描球形标靶的球心误差研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2012, 37(5): 598-601)
- [15] Shen Lixia. Dynamics Simulation and Test Analysis of Timing-Belt Position System [J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2007, 35(8): 62-63(沈利霞. 同步带定位系统的动力学仿真与实验分析[J]. 机床与液压, 2007, 35(8): 62-63)
- [16] Yang Jianguo, Fan Kaiguo, Du Zhengchun. CNC Machine Tool Error Real-Time Compensation Technology [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2013(杨建国, 范开国, 杜正春. 数控机床误差实时补偿技术[M]. 北京:机械工业出版社, 2013)
- [17] Shen H, Fu J, He Y, et al. On-line Asynchronous Compensation Methods for Static/Quasi-static Error Implemented on CNC Machine Tools [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2012, 60(1): 14-26
- [18] Zhang Jianqing, Pan Li, Wang Shugen. The Principles of Photogrammetry[M]. 2nd ed. Wuhan: Wuhan University Press, 2009(张剑清, 潘励, 王树根. 摄影测量学原理[M]. 2版. 武汉:武汉大学出版社, 2009)
- [19] Wang Zhizhuo. The Principles of Photogrammetry [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2007(王之卓. 摄影测量原理[M]. 武汉:武汉大学出版社, 2007)
- [20] Zhang Z. A Flexible New Technique for Camera Calibration [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence*, 2000, 22(11): 1 330-1 334

A Geometrical Error Imaging Detection Method for Synchronous Belt Motion Controller

LI Jiatian¹ NIU Yiru¹ HE Rixing² JIA Chenglin¹ LI Jian¹ WU Huajing¹

¹ Faculty of Land Resource Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China

² Information Center, Ministry of Public Security of China, Beijing 100741, China

Abstract: An error modeling method of synchronous belt motion controller based on the orientation calibration is proposed. The steps are:(1)restoring the homography between the known point coordinates and the image plane coordinates on the different positions of motion axis, then obtaining the interior and exterior orientation elements of the camera; (2)calculating the corresponding positional relationships between different positions by linearly operating the translation vectors in exterior orientation elements; (3)regarding the distance corresponding to pulses that you input as the true value, which can do the differential operator with the position relationships previously calculated to obtain multiple sets of error data, then establishing the polynomial error model by fitting. Experiments show that the error modeling method needs less equipment and simple operation, and the model precision can reach to sub-millimeter level.

Key words: motion controller; synchronous belt; geometrical error; exterior elements; imaging detection

First author: LI Jiatian, PhD, professor, specializes in numerical optimization and scene understanding for robot. E-mail:ljtwx@163.com

Corresponding author: NIU Yiru, master. E-mail:2279365497@qq.com

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, Nos. 41561082, 41161061.

(上接第722页)

Integrated Vector Calibration of Magnetic Gradient Tensor System Using Nonlinear Method

LI Qingzhu¹ LI Zhining¹ ZHANG Yingtang¹ FAN Hongbo¹ YIN Gang²

¹ Department of Vehicle and Electrical Engineering, The Army Engineering University of PLA, Shijiazhuang 050003, China

² High Speed Institute, China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621000, China

Abstract: In order to obtain the accurate output of the tensor measurement, an integrated mathematical model of sensor biases, scale factors and non-orthogonality error of single magnetic sensor and the misalignment error between multi-sensor axes is established. Based on the cross magnetic gradient tensor system, a least-squares nonlinear integrated calibration method is proposed. Compared with the two-step scalar calibration, the integrated mathematical model can be used to estimate the entire 48 error parameters of the cross tensor system at once, and a low-cost vector calibration is realized using an man-made platform output as the reference, which greatly improves the calibration efficiency and accuracy of parameters estimated. Simulation and experiment results show that the accuracy of the error parameters' estimation of the tensor system is higher than 99.75%, the root mean square error of the total field intensity output is less than 2 nT and the root mean square error of the tensor component is less than 50 nT/m.

Key words: magnetic gradient tensor system; nonlinear fitting; vector calibration; integrated calibration

First author: LI Qingzhu, master, specializes in magnetic anomaly detection. E-mail:laznlqz666@163.com

Corresponding author: LI Zhining, PhD, associate professor. E-mail:lizn03@hotmail.com