

空间相机次镜调整机构的改进布谷鸟标定方法

王 瀚^{1,2}, 曹小涛^{1*}, 赵伟国¹, 赵海波¹, 杨维帆¹, 张博威¹

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 为了提高空间相机次镜 Stewart 型调整机构的定位精度, 需要完成机构的精密标定。针对 6-PSS Stewart 机构, 首先依据最小二乘原则, 利用驱动残差构建了参数标定模型。其次为提高标定优化问题的全局求解精度, 采用自适应路径(Variable Step Adaptive, VSA)及限界处理对单纯形布谷鸟算法进行改进, 并应用于标定优化问题求解。数值仿真表明其求解能力并优于单纯型布谷鸟算法。最后, 为保证标定的全行程有效性, 规划了包含位姿六元素的试验数据采样方法。实验结果表明, 经过该方法标定后, 位姿采样点处最大位移误差由 19.97 μm 降为 9.68 μm , 最大转角误差由 123.84" 降为最大 8.86", 在非采样点处最大误差与采样点处在同一量级水平。基于上述模型、算法和采样位姿规划的标定方法可有效提高定位精度, 且标定结果在全行程区域内有效。

关键词: 空间相机; 精密标定; SMCS 算法; Stewart 平台

中图分类号: TH743 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201847.0518002

Improved cuckoo calibration method of space telescope secondary mirror adjusting mechanism

Wang Han^{1,2}, Cao Xiaotao¹, Zhao Weiguo¹, Zhao Haibo¹, Yang Weifan¹, Zhang Bowei¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract: In order to improve the adjusting accuracy of space telescope secondary mirror Stewart mechanism, the precision calibration is necessary. For the 6-PSS Stewart adjusting mechanism, first of all, the parameter calibration model was obtained by the kinematics and the least square method. Secondly, the usually cuckoo search based on simplex (SMCS) method was modified by use of VSA and limitation bounds algorithm to improve the global accuracy of optimization problem. The better calculation ability compared to SMCS was verified by the simulation results. Finally, to ensure the validity of the whole travel distance, a test data sampling process included six elements of position and orientation was planned. Experimental results show that the displacement error at the sampling point is reduced from the maximum 19.97 μm to 9.68 μm , and the angle error is reduced by a maximum of 123.84" to 8.86". Similar results are also shown with good accuracy at the non-sampling points, the proposed method

收稿日期: 2017-12-10; 修订日期: 2018-01-20

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(11703027)

作者简介: 王瀚(1993-), 男, 硕士生, 主要从事光电望远镜控制系统及嵌入式软件方面的研究。Email: 2434928895@qq.com

通讯作者: 曹小涛(1980-), 男, 副研究员, 博士, 主要从事空间相机电子学及控制系统技术方面的研究。Email: caoxiaotao@ciomp.ac.cn

based on the aforementioned model can effectively improve position accuracy of the secondary mirror adjusting mechanism, and the compensation results is efficient for the whole travel distance.

Key words: space telescope; precision calibration; SMCS algorithm; Stewart platform

0 引言

空间相机发射过程中的冲击振动和太空中复杂的环境因素都可引起地面装调的光机结构改变,其中空间相机主次镜相对位姿变化对成像质量影响重大^[1]。因此需要将主动光学技术应用于空间望远镜主次镜相对位姿的在轨调整^[2]。对次镜进行调整是目前主动光学的常用手段,且前次镜调整机构多选取 Stewart 平台形式^[3-4],并要求较高的定位精度。Stewart 平台型机构在小行程范围内具有良好的刚度、稳定性和承载能力^[5],能很好地适用于多自由度调整等高精度操控领域。

Stewart 机构的定位控制通常基于逆运动学模型^[6-7],由于模型参数与实际值之间的偏差,会造成机构定位失准。要提高 Stewart 机构控制精度,必须减小模型参数与实际值的偏差。现阶段提高 Stewart 机构精度的主要方法是精度设计及参数标定。精度设计对加工与装配精度有依赖性,难以达到较为理想的效果。参数标定是通过传感器检测机构的实际输出,并建立输入量与测量数据的函数关系,辨识模型参数误差,达到精度补偿的目的,该方法可有效减少模型参数误差,提高控制精度。参数标定又可分为自标定,约束标定和外部标定三种^[8]。外部标定是采用高精度测量设备直接测量机构位姿,通过算法识别模型参数,是目前实际应用中最为采用的方法之一。

文中以 6-PSS 型 Stewart 次镜调整机构为研究对象,为提高其定位控制精度,基于外部标定法,进行运动学参数标定研究。参数标定问题一般可归结为复杂的参数优化问题,其精度往往依赖于求解算法。目前的研究中,多采用计算机软件内置算法和局部性较强迭代法等进行求解^[9],结果大多无法同时满足高精度全局优化和高抗扰动性需求。为满足全行程高精度求解要求,采用了一种抗扰动能力好的全局优化单纯型布谷鸟算法 (Cockoo Search based on Simplex, SMCS) 并进行改进,通过加入自

适应路径和搜索限界,弥补了该算法求解精度的不足。以往的研究中,类似构型的 Stewart 机构模型多选取 42 个参数进行标定^[10],文中结合 6-PSS 型样机构型剔除冗余参数,不再将连杆初始长度作为独立参数,选取 12 个球铰中心空间 3 坐标,共 36 个标定参数,以提高优化精度。在对 Stewart 机构进行实际标定的过程中,选取可代表全行程区域信息的位姿采样点。最后,通过仿真分析和标定试验,验证了该方法的有效性。

1 参数标定模型

1.1 运动学模型

6-PSS 型 Stewart 机构如图 1 所示。6 个定长杆通过球铰分别与动平台和驱动杆相连,驱动杆受滑动副限制,垂直伸缩,控制动平台位姿变化。

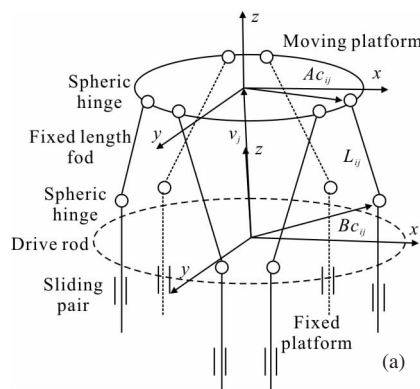


图 1 6-PSS 型 Stewart 平台机构图
Fig.1 Diagram of 6-PSS Stewart mechanism

以定平台中心和动平台旋转中心为原点分别建立坐标系 B 和 A 。定义动平台旋心位移在 X, Y, Z 轴方向上的分量为 $d=[d_x, d_y, d_z]^T$, 定义欧拉角 $w=[\varphi, \theta, \psi]^T$, 位姿 $P=[d^T, w^T]^T$, 则旋转矩阵为:

$$T = \text{Rot}(z, \psi), \text{Rot}(y, \theta), \text{Rot}(x, \varphi) = \begin{bmatrix} c\psi c\theta & c\psi s\theta s\varphi - s\psi c\varphi & c\psi s\theta c\varphi + s\psi s\varphi \\ s\psi c\theta & s\psi s\theta s\varphi - c\psi c\varphi & s\psi s\theta c\varphi - c\psi s\varphi \\ -s\theta & c\theta s\varphi & c\theta c\varphi \end{bmatrix} \quad (1)$$

则由空间矢量关系, 可得:

$$L_{ij} = T_j A c_{ij} + v_j - B c_{ij} \quad (2)$$

式中: i 为连杆号; j 位姿号; $L_{ij} = [{}^L x_{ij}, {}^L y_{ij}, {}^L z_{ij}]^T$ 为定长杆在 B 中的矢量; $A c_{ij} = [{}^A x_{ij}, {}^A y_{ij}, {}^A z_{ij}]^T$ 为上球铰中心在 A 中的位置矢量; v_j 为坐标系 A 零点在 B 中的位置矢量; $B c_{ij} = [{}^B x_{i0}, {}^B y_{i0}, {}^B z_{i0}]^T$ 为球铰中心在 B 中的位置矢量。

理想状态下, 驱动杆伸缩方向应与坐标系 B 的 Z 轴严格平行, 驱动杆伸缩量可表示为:

$$\Delta q_{ij} = \Delta {}^B z_{ij} - {}^B z_{i0} \quad (3)$$

设 $T_j A c_{ij} = [{}^{Ar} x_{i0}, {}^{Ar} y_{i0}, {}^{Ar} z_{i0}]^T$, 驱动杆 B 伸缩量 $\Delta q_{ij} = \Delta {}^B z_{ij} - {}^B z_{i0}$, 公式(2)可写为:

$$(\Delta q_{ij} + {}^B z_{i0} - {}^{Ar} z_{i0} - d_{zj})^2 = \left\| \left\| L_{ij} \right\|_2^2 - \left\| \left({}^B x_{i0} - {}^{Ar} x_{i0} - d_{xj}, {}^B y_{i0} - {}^{Ar} y_{i0} - d_{yj} \right) \right\|_2^2 \right\|_2^2 \quad (4)$$

由公式(4)即可求解驱动杆长变化量 $\Delta q_j = [\Delta q_{1j}, \Delta q_{2j}, \dots, \Delta q_{6j}]^T$, 即逆运动学模型, 记作 $\Delta q_j = \text{inv}(P_j, u)$ 。

公式(4)可以进而转化为如下非线性方程组:

$$F(P_j) = [f_1(P_j), f_2(P_j), \dots, f_6(P_j)]^T = 0 \quad (5)$$

式中: $f_1(P_j) = \Delta q_j - \text{inv}(P_j, u)$, 以最小二乘原则, 将公式(5)转化为运动学正解优化模型:

$$\min f(P_j) = \sum_{i=1}^6 f_i^2(P_j) \quad (6)$$

因此, 记作 $P_j = \text{Nen}(\Delta q_j, u)$ 。

1.2 参数优化模型

上述逆运动学模型有 42 个机构参数: $u = [A c_{i0}^T, B c_{i0}^T \left\| L_{i0} \right\|_2]^T$, $\left\| L_{i0} \right\|_2 = A c_{i0} + v_0 - B c_{i0}$, v_0 为零位下 A 的零点在 B 中的位置矢量, 故 $\left\| L_{i0} \right\|_2$ 为非独立参数, 由于参数冗余会降低算法求解精度,

因此可以简化选取 36 个待标定参数为 $u_0 = [A c_{i0}^T, B c_{i0}^T]^T$ 。

Stewart 机构的控制一般基于逆解模型, 模型参数误差会引起目标位姿和实际位姿 P_{aj} 的偏差, 设驱动量的测量值为 $\Delta q_j = [\Delta q_{1j}, \Delta q_{2j}, \dots, \Delta q_{6j}]^T$, 则位姿 P_{aj} 的驱动杆残差向量 $e_j = [e_{1j}, e_{2j}, \dots, e_{6j}]^T$ 可表示为:

$$e_j = \Delta q_j' - \text{inv}(P_{aj}', u_0) \quad (7)$$

设位姿采样数量为 m , 构建残差函数组如下:

$$E(u_0, \Delta q_j', P_{aj}') = [e_{11}, e_{21}, e_{ij}, \dots, e_{6m}]_{6m \times 1}^T \quad (8)$$

公式(8)中 $\Delta q_j'$ 和 P_{aj}' 由外部测量得到, 在优化问题中作为常量, 依据最小二乘原则, 将支杆伸缩量残差平方和作为优化目标函数:

$$S(u_0) = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^6 e_{ij}^2(u_0, \Delta q_j', P_{aj}') = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^6 e^2(u_0) \quad (9)$$

综上, 参数优化模型可描述为: 求函数 $S(u_0)$ ($u_0 \in \Omega$), 无约束条件下的最小值, 及此时 u_0 的适应值, 其中 Ω 是 u_0 的可行域。

2 VSA-SMCS 限界算法与优化求解

2.1 SMCS 算法

SMCS 算法是布谷鸟算法(Cuckoo Search, CS)基于单纯形法(Simplex, SM)的改进^[12-13]。CS 模仿布谷鸟选巢行为, 假设每只布谷鸟寻找一个鸟巢, 将最好的鸟巢保留进下一代, 鸟巢变更符合 *Le'vy* 飞行规律, 且以一定概率失去鸟巢。该算法通过种群迭代达到寻优的目的。SMCS 算法是在 CS 算法种群演替之前, 依据单纯形法思想, 将鸟巢位置寻优问题看作 N 维空间寻优问题, 通过反射、扩张、压缩和收缩等操作找出较好的点来替换最差点, 将此结果作为下一代布谷鸟种群鸟巢位置, CS 演替结果再作为 SM 初始值, 依此循环, 使全局算法与局部搜索作用互补。

2.2 VSA-SMCS 限界算法

SMCS 算法作为标定优化算法存在速度慢, 求解精度不足的问题, 且 1.2 节中所述优化模型中存在搜索界 Ω , SM 过程搜索越界会造成求解精度下降甚至算法不收敛。文中提出的 VSA-SMCS 限界

算法是针对以上问题,对 SMCS 算法进行了自适应路径和越界限制两方面改进。

Mantegna 将 Levy 飞行步长 sp 整理为^[11]:

$$sp=uv|v|^{1/\beta} \quad (10)$$

式中: $\sigma_v=1, \sigma_v=1u \sim N(0, \sigma_u^2), v \sim N(0, \sigma_v^2), \sigma_u =$

$\left\{ \frac{\Gamma(1+\beta)\sin(\pi\beta/2)}{\Gamma[(1+\beta)/2]\beta 2^{(\beta-1)/2}} \right\}^{1/\beta}$ 。在此基础上进行自适应步长改进,公式如下:

$$\begin{cases} sp_t = sp \times a + sp_{\min} \\ a = \exp(-30 \times (t/T_{\max})^p) \\ sp_{\min} = sp_1 (1 - t/T_{\max}) \end{cases} \quad (11)$$

式中: sp_t 为自适应步长; a 为自适应系数; t 为当前演替次数; T_{\max} 为设定的最大演替次数; $p \in [1, 30]$ 为调整系数; sp_{\min} 为最小步长; sp_1 为最小步长梯度; 步长随演替的进行逐渐缩小。

根据 sp_t 以及 u_m^i 与当代最优鸟巢 u_b^i 之间的差距设计自适应路径的 SMCS 算法(VSA-SMCS)的鸟巢位置变更公式为:

$$u_m^{i+1} = u_m^i + d \times sp_t \oplus (u_m^i - u_b^i) \quad (12)$$

式中: d 为路径调整系数。

SMCS 算法中 SM 过程搜索越界的原因是: CS 算法的执行依赖于明确的搜索界 Ω , 而 SM 无边界限制, 因此其执行结果作为 CS 算法下一次演替的初始值可能不在 Ω 内。为此, 对每次 SM 过程进行边界限制, 限界函数如下:

$$u_{mk}^{i+1} = u_{mk}^{i+1} + \frac{1 - \text{sgn}(u_{mk}^i - \Omega_L)}{2} (\Omega_L - u_{mk}^i) + \frac{1 - \text{sgn}(\Omega_U - u_{mk}^i)}{2} (\Omega_U - u_{mk}^i) \quad (13)$$

式中: u_{mk}^i 为第 m 鸟巢 t 代位置向量的第 k 元素, $u_m^i = [u_{m1}^i, \dots, u_{mk}^i, \dots, u_{mn}^i]_{m \times 1}^T$; sgn 为符号函数; Ω_U 为可行域上界; Ω_L 为可行域下界。

2.3 参数优化求解

VSA-SMCS 限界算法求解 1.2 节中所述优化问题步骤如下:

(1) 在 Ω 内任意取 37 组初始参数 u_m^0 , 构成初始参数集矩阵 $U^0 = [u_1^0, \dots, u_m^0, \dots, u_{37}^0]_{36 \times 37}$, 利用公式(9)

求解对应的目标函数 $S(u_m^0)$, 构成初始目标函数集 $fit^0 = [S(u_1^0), \dots, S(u_m^0), \dots, S(u_{37}^0)]_{1 \times 37}$, 找出最小目标函数 $S(u_m^0)$ 和最优参数 u_b^0 。

(2) 保留前一步中最优参数 u_b^{i-1} , 根据公式(12)和上一步参数集矩阵 U^{i-1} 得到新的参数集, 利用公式(9)求解新参数对应的目标函数, 与 U^{i-1} 中参数进行比较, 用适应值较好的参数代替较差的参数, 得到新的参数集矩阵 U^i 。

(3) U^i 中各个参数向量以概率 lu 发生变化, 变化结果为 Ω 内任取的参数向量, 通过公式(9)比较其对应的目标函数, 取较优的参数向量作为 u_m^i , 构成新的参数集矩阵 $U^i = [u_1^i, \dots, u_m^i, \dots, u_{37}^i]_{36 \times 37}$, 更新目标函数值 $fit^i = [S(u_1^i), \dots, S(u_m^i), \dots, S(u_{37}^i)]_{1 \times 37}$ 。

(4) 用 SM 法处理 U^i , 取其中 12 个较差参数进行优化, 并利用公式(13)进行限界, 得到新的参数集矩阵 $U^i = [u_1^i, \dots, u_m^i, \dots, u_{37}^i]_{36 \times 37}$ 和目标函数值向量 $fit^i = [S(u_1^i), \dots, S(u_m^i), \dots, S(u_{37}^i)]_{1 \times 37}$ 。

(5) 若步骤(4)中最优参数 u_b^i 对应的目标函数值 $S(u_m^i)$ 小于截止条件设定值 ε , 则输出最优参数 u_b^i 。否则返回步骤(2)进行循环。

3 仿真分析

仿真实验假设条件如下:

(1) 运动学模型的 36 个名义参数为 u_0 , 真实参数为 u_a , 二者均在可行域 Ω 内, 参数如表 1 所示。

(2) 在行程范围内, 任意生成 8 组位姿作为控制目标位姿 P_0 , 在名义参数下通过公式(4)求解驱动量 Δq , 忽略控制误差, 将其作为实际驱动量。

(3) 在实际参数下, 通过公式(6)求解驱动量 Δq 对应的动平台实际位姿 P_a , 并给 P_a 加入幅值分别为 $\pm 0.1 \mu\text{m}$ (位移)和 $\pm 0.1^\circ$ (转角)的高斯白噪声, 用来模拟位姿测量误差。

在以上假设的仿真条件下, 可根据 2.3 节中所述的求解过程进行标定仿真。由于 Stewart 平台模

型参数的耦合性, 标定后控制精度补偿情况较好的情况下, 补偿参数可能会与实际参数差别较大^[14]。因此以下仿真及实验中将用标定后平台的控制精度作为评价指标。

表 1 Stewart 机构仿真名义参数与实际参数

Tab.1 Nominal parameters and actual parameters of Stewart mechanism simulation

Parameters	Rod 1 /mm	Rod 2 /mm	Rod 3 /mm	Rod 4 /mm	Rod 5 /mm	Rod 6 /mm
^A x_0	103.6	-21.5	-81.8	-81.8	-21.5	103.6
^A x_a	103.7	-20.8	-83.7	-77.2	-21.1	102.2
^A y_0	34.6	107.1	72.4	-72.4	-107.1	-34.6
^A y_a	37.2	106.7	72.1	-76.1	-108.2	-35.8
^A z	84.7	84.7	84.7	84.7	84.7	84.7
^A z_a	79.2	81.1	90.9	89.8	85.1	86.7
^B x_0	67.9	19.6	-87.5	-87.5	19.6	67.9
^B x_a	69.7	16.1	-86.5	-89.1	20.3	65.3
^B y_0	61.8	89.7	27.9	-27.9	-89.7	-61.8
^B y_a	63.7	90.2	27.8	-28.3	-93.0	-68.7
^B z_0	-132.1	-132.1	-132.1	-132.1	-132.1	-132.1
^B z_a	-131.8	-129.9	-131.7	-134.7	-135.3	-130.3

标定前, 动平台在名义参数下位姿与实际位姿之间的误差如图 2 所示。用文中方法及 SMCS 算法进行标定的仿真结果如图 3 所示。

六自由度位姿标定结果如表 2 所示。该结果表明: VSA-SMCS 限界算法对标定优化问题具有良好的求解能力, 效果优于 SMCS 算法。

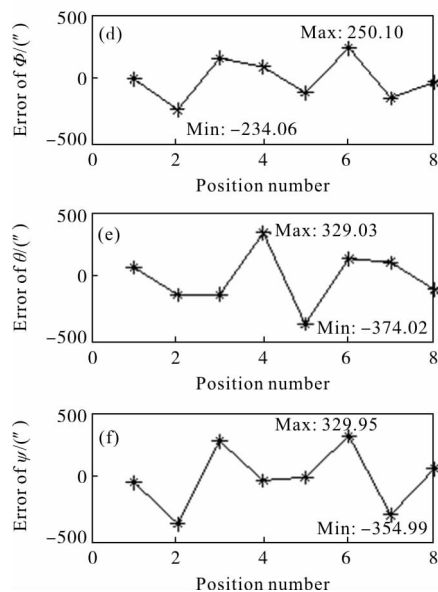
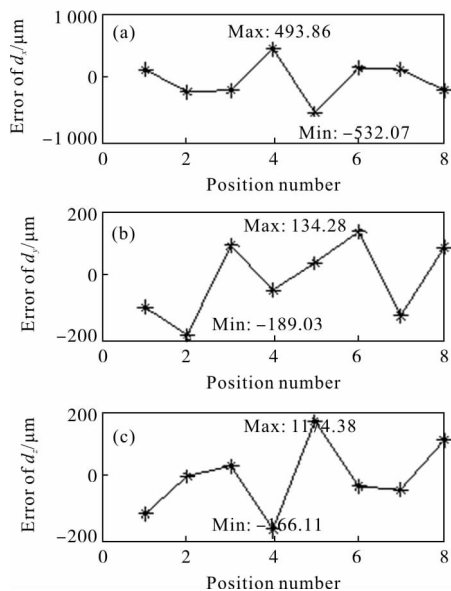
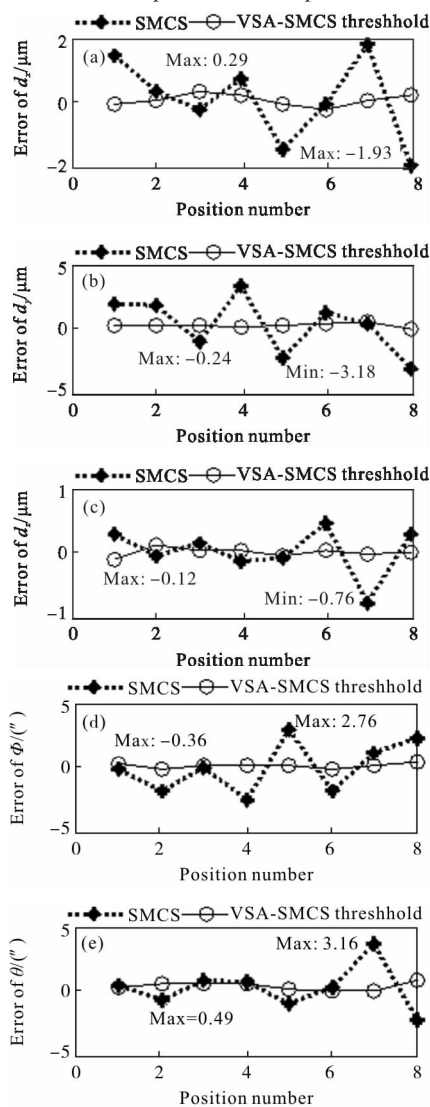


图 2 参数标定前位姿仿真误差

Fig.2 Simulation error of position before parameter calibration



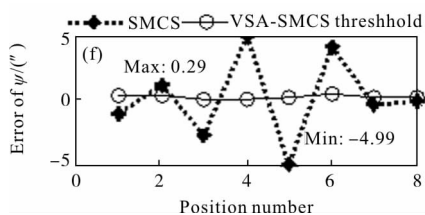


图 3 参数标定后的位姿仿真误差

Fig.3 Simulation error of position after parameter calibration

表 2 Stewart 机构标定仿真结果

Tab.2 Calibration simulation result of Stewart mechanism

Pose error	$d_x/\mu\text{m}$	$d_y/\mu\text{m}$	$d_z/\mu\text{m}$	$\varphi/(\text{''})$	$\theta/(\text{''})$	$\psi/(\text{''})$
Before calibration	532.07	189.03	174.38	250.10	374.02	354.99
SMCS	1.39	3.18	0.76	2.76	3.16	4.99
VSA-SMCS	0.29	0.24	0.12	0.36	0.49	0.29

表 3 Stewart 机构标定采样点示例

Tab.3 Partial sampling for calibration of Stewart mechanism

Displacement	d_x/mm	d_y/mm	d_z/mm	$\varphi/(\text{°})$	$\theta/(\text{°})$	$\psi/(\text{°})$
(0.5,0.5,0.5)	0.5	0.5	0.5	± 0.5	± 0.5	± 0.5

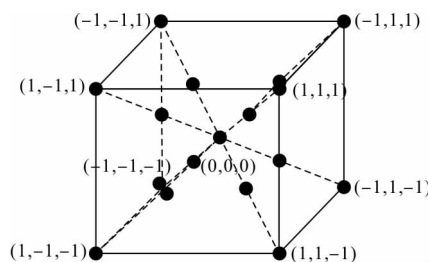


图 5 采样规划示意图

Fig.5 Schematic diagram of sampling planning

可行域 Ω 设定为与名义参数之差不超过 2.5 mm 的空间, 将补偿后参数带入正解模型中求得标定后的位姿误差, 如图 6 所示。

4 标定试验

采用上述方法对 6-PSS 型 Stewart 样机进行标定, 试验现场如图 4 所示。在动平台上表面固定 3 个靶球, 激光跟踪仪(测量误差 3 μm)可通过跟踪 3 个靶球的空间坐标变化拟合出动平台位姿变化。同时, 通过读取电机编码器变化值可解算当前驱动量。

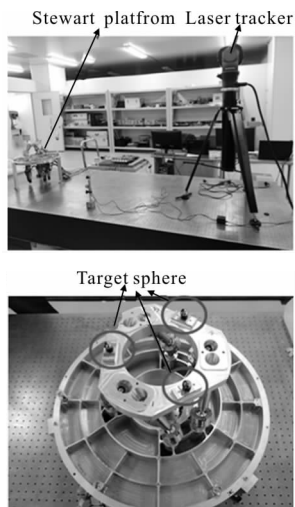
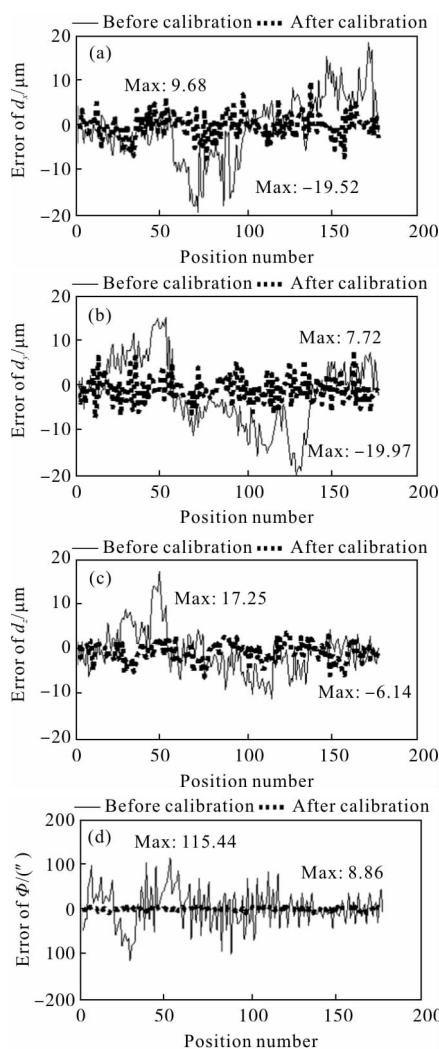


图 4 标定试验图

Fig.4 Calibration experiment

机构行程范围为: 位移 ± 1 mm, 角度 $\pm 1^\circ$ 。为保证全行程标定, 选取位移行程点如图 5 所示, 并为每个行程点搭配 3 转角的所有正负组合, 以行程点 (0.5,0.5,0.5) 处为例, 选取的采样位姿如表 3 所示。



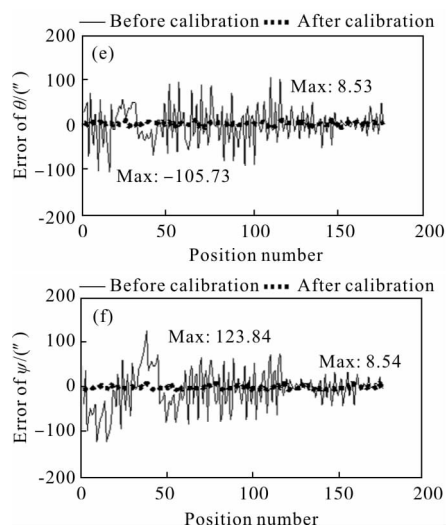


图 6 采样点处标定前后位姿误差

Fig.6 Position error of the sample point before and after parameter calibration

为验证标定精度的全行程区域内有效,取 42 个非标定采样点对 Stewart 平台进行控制, 标定后的平台定位控制误差如图 7 所示。

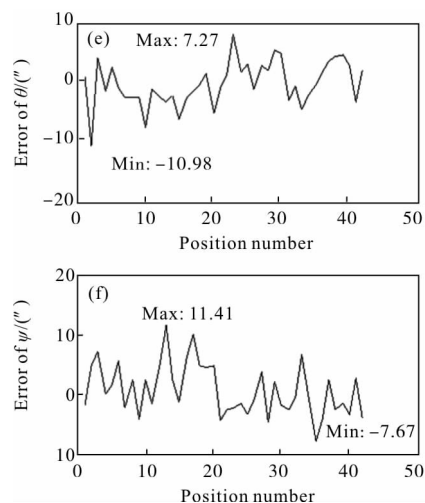
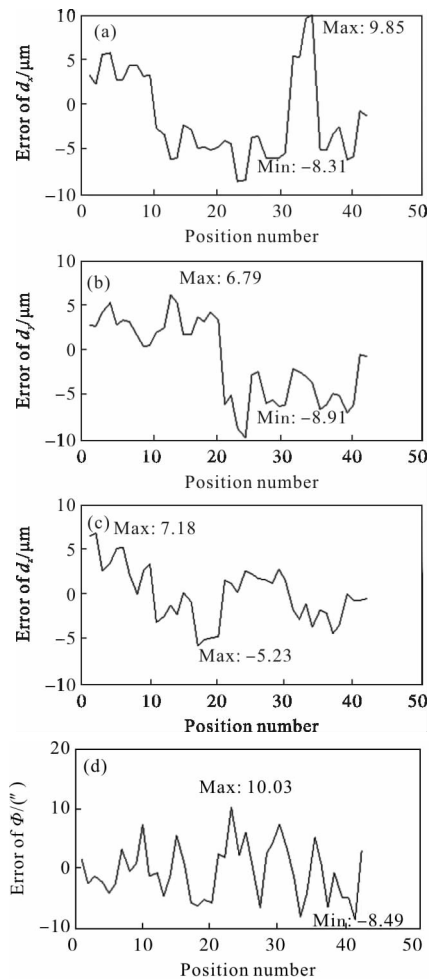


图 7 标定后非采样点位姿误差

Fig.7 Position error after calibration at non-sampling dot

以上结果表明: 标定后, 在采样点处位移误差由最大 19.97 μm 降为 9.68 μm , 降低了 2.06 倍, 角度误差由最大 123.84" 降为 8.86", 降低了近 13.9 倍; 标定后, 采样点处转角精度得到显著提高, 位移精度提高较少的原因: 样机作为空间相机次镜调整机构, 制造精度较高, 位移精度已经处于较高的水平, 同时激光跟踪仪的测量精度有限无法获得更高的绝对精度。在非采样点处试验的 42 个位姿中最大位移误差为 9.85 μm , 最大转角误差为 11.41"。详细结果如表 4 所示。实验结果表明, 该标定方法能够显著提高机构的定位控制精度, 且标定结果在全行程区域内有效。

表 4 Stewart 机构标定结果

Tab.4 Calibration results of Stewart mechanism

Pose error	$d_x/\mu\text{m}$	$d_y/\mu\text{m}$	$d_z/\mu\text{m}$	$\varphi/(\text{''})$	$\theta/(\text{''})$	$\psi/(\text{''})$
Sampling points without calibration	19.52	19.97	17.25	115.44	105.73	123.84
Sampling points with calibration	9.68	7.72	6.14	8.86	8.53	8.54
Arbitrary points with calibration	9.85	8.91	7.18	10.03	10.98	11.41

5 结论

文中针对 6-PSS 型 Stewart 平台的次镜调整机构, 进行了标定方法理论研究、仿真分析和试验验证。通过选取 12 个球铰中心空间坐标作为待标定的

36个参数,简化了标定参数数量,有利于提高全局优化算法的正确性及标定精度。并提出了一种结合自适应路径及限界处理的布谷鸟标定算法,然后通过仿真分析和标定试验验证了该方法能够满足高精度全局优化的应用需求,可以为空间相机主次镜位姿调整以及其他相似高精度应用提供一定的借鉴及解决方法。下一步工作拟采用更加精密的测量仪器及试验方法对该算法的标定精度完成进一步的提升。

参考文献:

- [1] Qi Guang, Xu Yanjun, Liu Bingqiang. Lightweight structure design for SiC/Al supporting plate of space mirror [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43 (7): 2214–2218. (in Chinese)
齐光, 许艳军, 刘炳强. 空间相机反射镜 SiC/Al 支撑板轻量化结构优化设计 [J]. 红外与激光工程, 2014, 43(7): 2214–2218.
- [2] Cao Xiaotao, Sun Tianyu, Zhao Yunlong, et al. Current status and development tendency of image stabilization system of large aperture space telescope [J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(5): 739–748. (in Chinese)
曹小涛, 孙天宇, 赵运隆, 等. 空间大口径望远镜稳像系统发展现状及趋势[J]. 中国光学, 2014, 7(5): 739–748.
- [3] Boian R F, Bouzit M, Burdea G C, et al. Dual Stewart platform mobility simulator[C]//Engineering in Medicine and Biology Society, 2004(2): 4848–4851.
- [4] Zhao Hongchao, Zhang Jingxu, Yu Xiaobo, et al. Design and optimization of Stewart platform in TMT tertiary mirror system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(12): 3336–3341. (in Chinese)
赵宏超, 张景旭, 于晓波, 等. TMT 三镜系统中 Stewart 平台的优化设计[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(12): 3336–3341.
- [5] Han Chunyang, Xu Zhenbang, Wu Qingwen, et al. Optimization design and error distribution for secondary mirror adjusting mechanism of large optical payload [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(5): 1093–1103. (in Chinese)
韩春杨, 徐振邦, 吴清文, 等. 大型光学载荷次镜调整机构优化设计及误差分配 [J]. 光学精密工程, 2016, 24(5): 1093–1103.
- [6] Dasgupta B, Mruthyunjaya T S. The Stewart platform manipulator: a review [J]. *Mechanism & Machine Theory*, 2000, 35(1): 15–40.
- [7] Yang C, Han J, Peter O O, et al. PID control with gravity compensation for hydraulic 6-DOF parallel manipulator[C]//PID Control, Implementation and Tuning, 2011: 666–677.
- [8] Du Liang, Zhang Tie, Dai Xiaoliang. Robot kinematic parameters compensation by measuring distance error using laser tracker system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(8): 2351–2357. (in Chinese)
杜亮, 张铁, 戴孝亮. 激光跟踪仪测量距离误差的机器人运动学参数补偿[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(8): 2351–2357.
- [9] Sun X Y, Xie Z J, Shi W K, et al. Error analysis and calibration of 6-PSS parallel mechanism [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2012, 18(12): 2659–2666.
- [10] Zhuang H, Roth Z S. Method for kinematic calibration of stewart platforms [J]. *Journal of Field Robotics*, 2010, 10 (3): 391–405.
- [11] Mantegna R N. Fast, accurate algorithm for numerical simulation of Lévy stable stochastic processes [J]. *Physical Review E*, 1994, 49(5): 4677–4683.
- [12] Yang X S, Deb S C. Search via levey flights [C]//IEEE 2009 World Congress on Nature & Biologically Inspired Computing, 2009: 210–214.
- [13] Walton S, Hassan O, Morgan K, et al. Modified cuckoo search: A new gradient free optimisation algorithm[J]. *Chaos Solitons & Fractals*, 2011, 44(9): 710–718.
- [14] Liu Wentao, Tang Dewei, Wang Zhixing. Cocktail method for Stewart platform calibration [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2004, 40(12): 48–52. (in Chinese)
刘文涛, 唐德威, 王知行. Stewart 平台机构标定的鸡尾酒法[J]. 机械工程学报, 2004, 40(12): 48–52.