

New Calibration Method of Six-Axis Force Sensor Based on Stewart Platform

LI Hai-bin, SUI Chun-ping, WANG Hong-guang, GAO Li-fu, ZHAO Ming-yang, GONG Hai-li
(Shenyang Institute of Automation Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)

Abstract: Owing to the excellent characteristic of compact structure, high stiffness and wide-ranged measurement, the six-axis force sensor based on the Stewart platform gets its widely application in many research areas such as industrial robot and spacecraft's docking process. The realization of high-precision measurement for the sensor bears a key problem of calibration method. Since the six-axis force sensor based on the platform of STEWART has complexity as a nonlinear system, its performance is decreased for the calibration error introduced when the traditional methods of calibration are adopted. This paper analyses the essentiality of calibration, which is a process of determining the mapping function from measure space to theory space. The undetermined function can be approximated, based on the function approximation theory, with some simple functions such as polynomial or piecewise polynomial when the function values are known on the defined point set. Based on the analysis above, the paper proposed a novel multi-point linear calibration algorithm. The algorithm, adopting the one order linear function as piecewise polynomial, determines the mapping function of the six-axis force sensor from measure space to theory space by treating the measure values as function variable and actual loaded values as the corresponding function values. The experiment results demonstrate that the proposed method of calibration can improve the precision in measurement and be realized in real-time, so the algorithm is practical in the practice application of measurement.

Key words: six-axis force; sensor; calibration; subspace

EEACC:7320;7230

基于 Stewart 平台六维力传感器的分区静态标定方法

李海滨, 隋春平, 王洪光, 高理富, 赵明扬, 龚海里

(中科院沈阳自动化研究所机器人重点实验室, 沈阳 110016)

摘要: 基于 Stewart 平台的六维力传感器具有结构紧凑、刚度大、量程宽等特点, 它在工业机器人、空间站对接等领域具有广泛的应用前景。好的标定方法是正确使用传感器的基础。由于基于 Stewart 平台的六维力传感器是一个复杂的非线性系统, 所以采用常规的线性标定方法必将带来较大的标定误差从而影响其使用性能。标定的实质是, 由测量值空间到理论值空间的映射函数的确定过程。由函数逼近理论可知, 当只在已知点集上给出函数值时, 可用多项式或分段多项式等较简单函数逼近待定函数。基于上述思想, 本文将整个测量空间划分为若干连续的子测量空间, 再对每个子空间进行线性标定, 从而提高了整个测量系统的标定精度。实验分析结果表明了该标定方法有效。

关键词: 六维力; 传感器; 标定; 子空间

中图分类号: TP212; O348

文献标识码: A

文章编号: 1005-9490(2006)01-0132-05

收稿日期: 2005-06-14

基金项目: 国家自然科学基金(50275143)资助课题。

作者简介: 李海滨(1973-)男, 博士(后), 主要研究方向为有限元方法、神经网络计算、机器人技术等, lhbnm2002@163.com.

目前,许多学者研究了多维力传感器的设计问题,其中以六维力传感器最多。六维力传感器从结构形式来看主要有以下几种:三垂直筋结构六维力传感器、筒形六维力传感器、双环形六维力传感器、四垂直筋结构六维力传感器、盒式结构六维力传感器、十字结构六维力传感器、圆柱形六维力传感器、双头形六维力传感器、三梁结构六维力传感器、八垂直筋结构六维力传感器以及基于斯特沃德(stewart)机构六维力传感器等^[1]。其中斯特沃德机构的六维力传感器具有刚度高、量程大、系统各构件的制造及安装误差不累加等优点,所以它在大量程测力、空间对接半物理仿真等场合具有潜在的应用价值。

六维力传感器静态标定在传感器的研发过程中占有重要地位,国内外学者对其标定方法进行了深入的研究^[2~5]。标定方法的实质是寻求由理论值空间到实测值空间传递关系(标定矩阵)的过程。从已有资料来看,现有标定方法所得到的标定矩阵反映了由理论值空间到实测值空间的一种线性映射关系,它对于线性特性的测力系统有很好的应用。然而实际测力传感器中存在机械加工误差,机构间隙、摩擦等诸多非线性的因素,如果仍采用线性标定算法难以准确反映非线性映射关系,必然带来较大的标定误差。

由函数逼近理论可知,任意非线性曲线(曲面)可由直线(平面)分段逼近,并且当分段数无穷大时,逼近误差趋于零。另外,采用传统方法标定时,一般来说在标定样本点附近测量精度较高,而远离样本点的测量精度较低。基于上述考虑,本文将整个测量空间划分为若干连续的测量子空间,再对每个子空间进行线性标定,得到一种分区标定方法。分区标定方法,提高标定精度的同时也会因分区数目庞大而带来标定计算时间增长、内存占用量大等弊病。针对上述问题,本文给出了根据实测值实时构造标定矩阵的对策,从而既保证了标定精度又减少了内存占用量,同时也具有标定的实时性。

本文首先介绍基于 Stewart 平台并联机构的测力原理,然后提出分区标定方法,最后给出上述标定

$$\begin{bmatrix} C_{11} & C_{11} & \cdots & C_{1k} \\ C_{21} & C_{22} & \cdots & C_{2k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{nk} & C_{nk} & \cdots & C_{nk} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f'_{x1} & f'_{x2} & & f'_{x6} \\ f'_{y1} & f'_{y2} & & f'_{y6} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ m'_{z1} & m'_{z2} & & m'_{z6} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} f'_{x1} & f'_{x2} & & f'_{x6} \\ f'_{y1} & f'_{y2} & & f'_{y6} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ m'_{z1} & m'_{z2} & & m'_{z6} \end{bmatrix}^{-1} \quad (3)$$

当 $n > 6$ 时,利用广义逆矩阵,求得 C 的最小二乘解。进行标定补偿后的测量值为:

$$f = C \cdot [f_{xi} \quad f_{yi} \quad \cdots \quad m_{zi}]^T \quad (4)$$

方法在基于 Stewart 平台六维力传感器中的应用。

1 测力系统的解算与传统标定方法

基于 Stewart 平台六维力传感测力系统的机构部分是利用 6 个拉压传感器取代 6-SPS 并联机构各支链的 P(移动)副而构成的。每个拉压传感器的输出电流经 A/D 转换进入计算机,计算机利用解算程序而得到待测的六维力向量。当测力系统工作平稳,可忽略机构惯性力时,测力系统解算方程可表达为:

$$\begin{bmatrix} f_s \\ f_y \\ f_z \\ m_x \\ m_y \\ m_z \end{bmatrix} = K_1 \cdot \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \\ f_5 \\ f_6 \end{bmatrix} + K_2 \quad (1)$$

式中, $f_i (i=1, 2, \dots, 6)$ 为第 i 根拉压传感器的读数, f_x, f_y, \dots, m_z 分别为经计算得到的六维力分量实测值。 K_1, K_2 为 6×6 系数矩阵,与机构几何尺寸、物理性质有关。

每当,施加一组力时,就可根据 6 个拉压传感器的读数利用式(1)计算得到一组六维力实际测量值。然而,由于制造、安装、摩擦等误差因素的影响,实测值($f_s \quad f_y \quad f_z \quad m_x \quad m_y \quad m_z$)与理论值($f'_s \quad f'_y \quad f'_z \quad m'_x \quad m'_y \quad m'_z$)存在一定误差,于是需要对系统进行标定,以减小或消除该误差。已有文献表明,传统标定一般采用线性矩阵标定算法。

标定时,选取 $n (\geq 6)$ 组线性无关的力向量(理论值)分别作用于传感器,相应得到 n 组读数(实测)值向量。将各理论值和读数值向量按序排列可构成如下矩阵关系方程:

$$\begin{bmatrix} f'_{xi} \\ f'_{yi} \\ \vdots \\ m'_{zi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{11} & \cdots & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & \cdots & C_{26} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{61} & C_{62} & \cdots & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{xi} \\ f_{yi} \\ \vdots \\ m_{zi} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中, C 为标定矩阵,其它符号同前。

当 $n=6$ 时,对上式进行运算可得标定矩阵为:

2 分区标定方法

针对现有标定方法存在的问题,本文将提出一种新的标定方法以提高传感器的测量精度。由函数逼近理论可知,当在已知点集上给出函数值时,可用多项式或分段多项式等较简单函数逼近待测函数。受此启发,可将整个测量空间划分为若干子空间,每个子空间对应一个标定矩阵,每个子空间均采用传统方法进行标定。这样可以起到对非线性系统的分段线性化目的。得到每个子空间的标定矩阵后,可以根据实测向量值在测量空间中的位置,来唯一确定所采用的标定矩阵进行补偿计算。本文将上述标定方法称作分区标定方法。若把力向量空间看作一个六维坐标空间,则六维力向量的各分量可作为六维空间的坐标轴。分区标定首先需要对整个测量空间划分为若干连续的子空间。对每个分量在其量程内,设定若干标定点。例如, f_x 轴上有 f_{x0} 、 f_{x1} 、 \dots 、 f_{xi} 、 \dots 、 f_{xf} , f_{xe} 为 f_x 轴上所分份数。称子空间 $f_{xi} \leq f_x < f_{xi+1}$, $f_{yj} \leq f_y < f_{yj+1}$, $f_{zk} \leq f_z < f_{zk+1}$, $mx_n \leq mx < mx_{n+1}$, $my_m \leq my < my_{m+1}$, $mz_l \leq mz < mz_{l+1}$ 为 (I, j, k, n, m, l) 号子空间,记作 $Q^{(I, j, k, n, m, l)}$ 。对每一子空间 $Q^{(I, j, k, n, m, l)}$,可以在其子空间范围内选取6个相互正交力向量分别施加于测力系统,得到6个相对应的实测向量值,将其代入式(3)中可得该子空间的标定矩阵 $C^{(I, j, k, n, m, l)}$ 。由上面分析可知,采用上述标定算法,需要构造多个子空间的标定矩阵。一般来说,一个算法的优劣可以从时间和空间两方面进行评价,即一个好的算法既要快速又要节省内存空间。假设将每一维力轴分为10等份,则需要构造 10^6 个子空间标定矩阵,因此会占用大量内存。尤其在使用单片场合,上述矛盾更加突出。为此,本文采取根据实测值动态构造标定矩阵以解决内存占用量大的问题。具体作法是,每当得到一个实测值时,首先确定该测量值所属子空间的位置,然后对该子空间进行标定,再将实测值代入式(4)中进行补偿计算。这样对每个实测值只需构造一个标定矩阵,因此大大节约了内存空间。在计算时间上,从测量值到计算出补偿值,只需对一组数进行排序定位和如式(3)、式(4)的矩阵求逆、矩阵相乘等运算,因此该标定算法具有实时性。

3 标定实验及算法验证

3.1 标定实验

为了验证前面所提标定方法的有效性,本研究采用中科院沈阳自动化研究所自行研制的一台基于

Stewart平台六维力传感器进行标定和补偿计算。标定实验采用如图1所示的加载实验系统,加载方式如下:

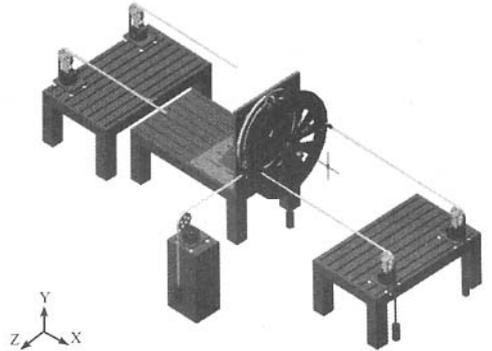


图1 六维力传感器加载实验平台

① 将传感器的各个力分量按满量程分为若干等间隔点;② 每个力分量的加载过程由小到大顺次加载,当加到最大值时再按顺序减载,并记录每个加载点的读数值和实际加载(理论)值;③ 按上面步骤取每个广义力分量的反方向再加载一遍,并记录每个加载点的读数值和实际加载(理论)值;④ 对每维力分量,将绝对值从小到大的过程定义为加载过程,绝对值从大到小的过程定义为卸载过程。

加载实验时,各维力分量 F_x 、 F_y 、 F_z 、 M_x 、 M_y 、 M_z 在其量程范围内正方向分别取16、8、8、8、8、8个等分加载点,负方向同样分别取16、8、8、8、8、8个等分加载点。对于各维力分量分别进行加载,而且正负两方向分别进行。每维力加载(卸载)3次,同一个加载点取其平均值。将上面各分量加载点的理论值和实测平均值记录并存入相应文件中以备构造标定矩阵时使用。

3.2 算法验证

在标定实验的基础上,在某维力或任意组合力的作用下重新进行加载实验。通过标定后的补偿计算以验证标定算法的有效性。本文通过 F_x 方向上的纯力加载和 $F_x + M_z$ 的组合力加载实验进行验证。

(1) 在 F_x 方向上施加纯力

将 F_x 的满量程分为2N等份(假设采样时分为N等份),从零点开始到正向最大值依次加载,并且每加载一次分别应用传统标定和分区标定方法进行标定和补偿计算。记录补偿以前的实测值和采用两种方法这得到的补偿值。将实测值、两种方法标定后的补偿计算结果值分别与理论值相减得到在六维力方向上上述三种情况的测量误差值。把施加于 F_x 向的力值作为横坐标,误差值作为纵坐标,试验结果绘于图2。

(2) 施加组合力 $F_x + M_z$

将 M_z 的满量程分为 2N 等份,从小到大依次施加 M_z 和 F_x ($F_x = M_z/r$, r 为某一常数,这里是传感器上平台半径)。同样每加载一次分别应用传统标定和分区标定方法进行标定和补偿计算。记录补偿以前的实测值和采用两种方法标定得到的补偿

值。将实测值、两种方法标定后的补偿计算结果值分别与理论值相减得到在六维力方向上上述三种情况的测量误差值。把施加于 M_z (或 $r \cdot F_x$) 向的力值作为横坐标,误差值作为纵坐标,可得如图 3 所示结果。

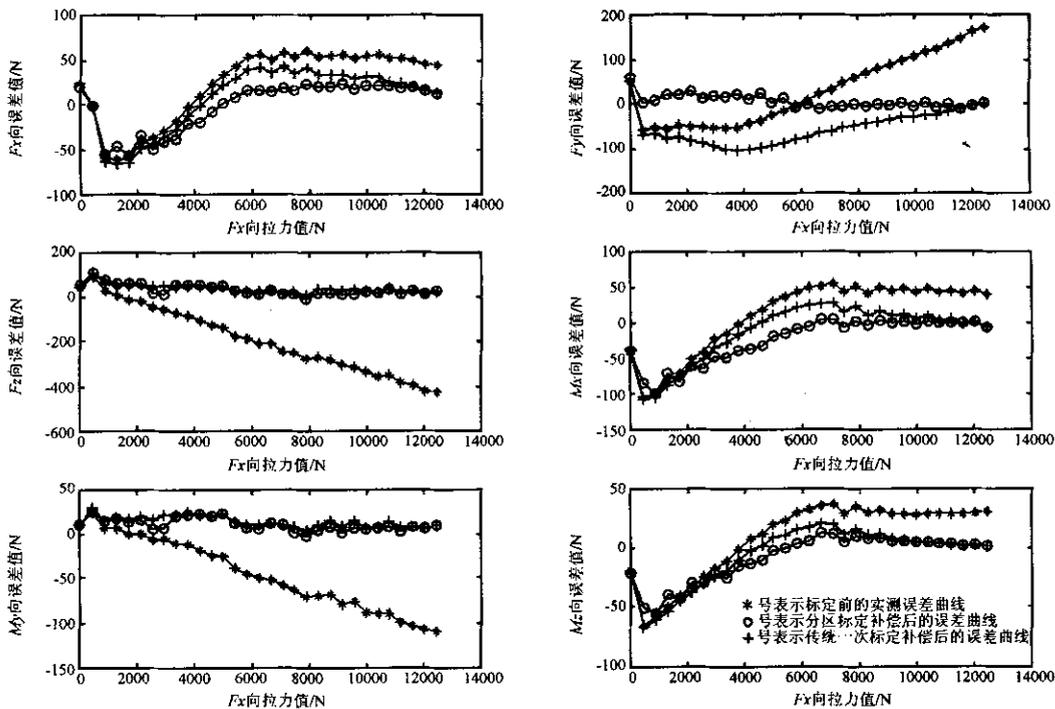


图 2 F_x 向加载时六维力分量实测误差值与标定补偿后误差值

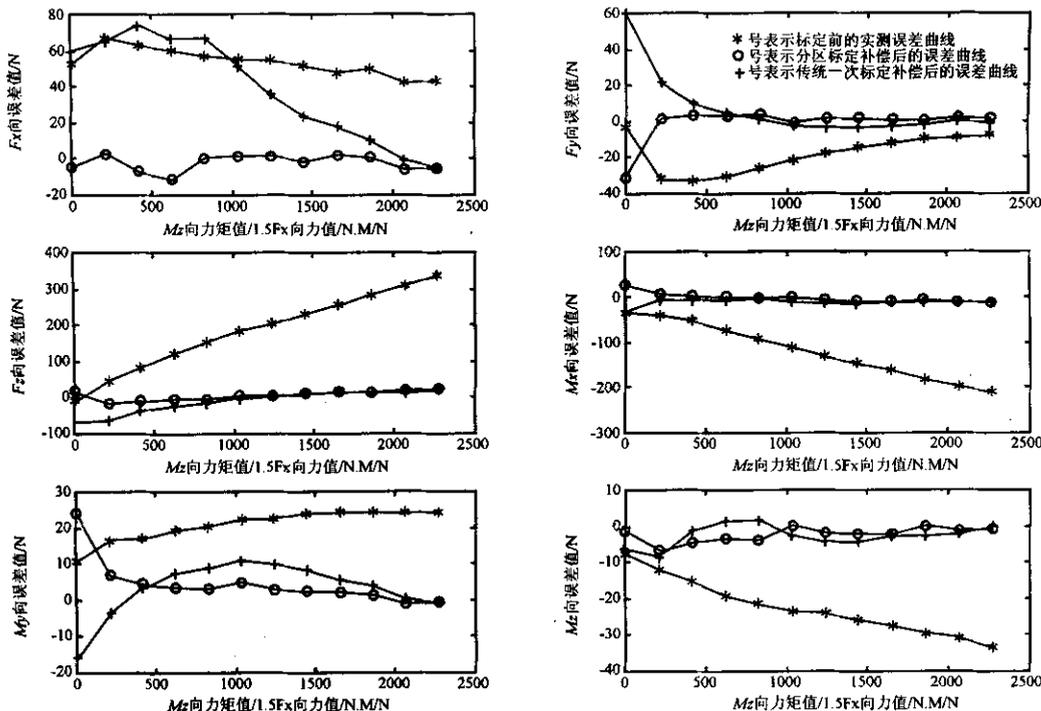


图 3 M_z 向与 F_x 向组合力加载时六维力分量实测误差值与标定补偿后误差值

4 结论

从图2中实测误差值可以看到,当施加纯力 F_x 时在其它五维力方向上出现了程度不同的偶合误差值,尤其在 F_z 方向上最为严重,误差值为428 N,使传感器静态测量精度下降到28.5%,这在传感器的测量中是无法使用的。经过两种标定方法进行补偿以后,测量精度都有了不同程度的提高。如图2中 F_z 和 M_y 方向上的误差值呈线性增长的情况,两种标定方法补偿效果相差不大(相差10 N之内),都得到了很好的补偿效果,精度提高到8%以上。而对于如图2中其它四个方向的误差值呈非线性增长的情况,两种标定方法补偿效果相差较大。其中,在 F_y 方向上,标定前的实测误差为85 N,采用传统标定后的补偿误差值为52 N,由本文标定后的补偿误差值为29 N。利用本文方法标定后的补偿结果明显优于传统标定方法的补偿结果。 F_x 、 M_x 、 M_z 等其它方向也有类似结果,这里不再赘述。

同样由图3可以看出,采用上述两种标定方法之后,使得实测各分力方向的精度都有了不同程度的提高,但总的来看,当实测误差呈现线性特性时本文方法与传统方法标定后的补偿效果接近,而当实测误差呈现非线性特性时,本文方法均优于传统标定方法的补偿效果。比较图2与图3可以看出,在相同 F_x 下,组合加载 M_z 之后总的测量误差并没有明显增加,从实验上论证了,基于Stewart平台并联

机构的六维力传感器具有测量误差不叠加的优点。由图2与图3还可以看出,测量误差在零点附近没有改善。原因是阈值是由随机噪声引起。标定能消除由于加工制造、安装等系统误差,而无法改善测量噪声等引起的随机误差。对于随机测量误差的抑制需要进一步的研究。另外,需要指出的是,当测量系统不具有良好的重复性时,上述标定方法均不能得到有效的应用。

计算时间上,采用本方法在pc104单片机作标定和补偿计算,实验结果表明,本方法具有实时性。虽然本方法是针对六维力传感器静态标定而提出的,但也适用于其它测量系统的静态标定。

参考文献:

- [1] 陈玉龙. 多维并联式力传感器的性能分析与应用研究[D]: [硕士学位论文]. 秦皇岛: 燕山大学, 2003.
- [2] 陈雄标, 袁哲俊, 姚英学. 机器人用六维力传感器标定研究[J]. 机器人, 1997, 17(2): 7-12.
- [3] 高峰. Stewart结构六维力传感器设计理论与应用研究[D]: [博士学位论文]. 秦皇岛: 燕山大学, 2002.
- [4] Chao Lu-Ping, Chen Kuen-Tzong. Shape Optimal Design and Force Sensitivity Evaluation of Six-Axis Force Sensors[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 1997, 63(2): 105-112.
- [5] Chai Kok-Soon, Ken Yong, Ian Tuersley. A Practical Calibration Process Using Partial Information for a Commercial Stewart Platform[J]. Robotica, 2002, 20(3): 315-322.