

The Study on Static Decoupling Algorithm for Six-Axis Force Sensor and Static Calibration *

WU Xiuxiu¹, SONG Aiguo^{1*}, WANG Zheng²

(1. School of Instrument Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. Scientific Research Training Center for Chinese Astronauts, Beijing 100094, China)

Abstract: The static coupling to six-axis force sensor is a key factor to its precision. The accuracy of the calibration test is also indispensable for improving the precision of six-axis force sensor. Against the difference of sensor output voltage of positive and negative direction fitting function, a static decoupling algorithm of six-axis force sensor is proposed based on coupling error and piecewise fitting model. A large number calibration data obtained in calibration test of cross beam structure sensor are used in static decoupling algorithm. Finally, the calibration test results of this static decoupling algorithm verify the superior performance of coupling error and piecewise fitting-based static decoupling algorithm.

Key words: six-axis force sensor; static decoupling algorithm; calibration; piecewise fitting

EEACC: 7230; 7230G

doi: 10.3969/j.issn.1004-1699.2013.06.019

六维力传感器静态解耦算法及静态标定的研究 *

武秀秀¹, 宋爱国^{1*}, 王政²

(1. 东南大学仪器科学与工程学院, 南京 210096; 2. 中国航天员科研训练中心, 北京 100094)

摘要: 耦合误差严重影响着六维力传感器的精度, 标定试验的准确性对提高六维力传感器的精度也是必不可少的。针对传感器输出电压正负方向拟合函数不同提出了一种基于耦合误差和分段拟合建模的六维力传感器解耦算法。用十字梁结构的传感器进行标定试验, 将得到的标定数据应用于解耦算法中。通过标定数据验证了基于耦合误差和分段拟合的静态解耦算法性能的优越性。

关键词: 六维力传感器; 静态解耦算法; 标定; 分段拟合

中图分类号: TP212.12

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2013)06-0851-06

多维力传感器是用来感知力信息并将力信号转化为电压信号^[1]。一般来说, 多维力传感器分为三维力传感器和六维力传感器。其中, 六维力传感器是一种能同时测量空间三维正交力和三维正交力矩的力传感器^[2]。目前力传感器被广泛的应用在装配机器人、抛光机器人、康复机器人等领域^[3-5], 近年来在航空航天、机械制造与装配、汽车行业以及体育竞技等领域也得到了广泛的应用。

由于六维力传感器机械制造水平、贴片工艺、应变片横向效应与检测方式等方面的原因, 几乎每一维作用到传感器的力/力矩分量都会对传感器各路输出信号产生影响。以这种方式产生的误差, 被称为耦合误差, 耦合的存在严重地影响着传感器的测量精度^[6]。这给六维力/力矩传感器的研制和测量

带来了极大的困难。因此解耦就成了解决这个问题方法之一, 解耦就是要在最大程度上减小或消除耦合干扰。由于硬件解耦涉及众多难以解决的技术工艺问题, 同时又会增加传感器的制造成本, 相比较而言, 软件解耦具有可行性强、精确度高、价格低廉等优点。软件解耦就是使用解耦算法, 通过相应的公式计算, 在最大程度上减小耦合所带来的负面影响, 提高传感器的精度, 因此需要设计合适的解耦算法。传统的基于求解矩阵广义逆的静态解耦算法^[7]涉及到众多矩阵运算, 算法复杂, 运算量大, 容易产生病态矩阵, 影响解耦的精度。

大量标定数据表明, 正负方向的拟合函数是不同的。如果在这种情况下, 现存的基于耦合误差建模的六维力传感器解耦方法^[8]存在解耦精度不高

项目来源: 虚拟现实基于图像的纹理力触觉表达与再现方法研究项目(61272379)

收稿日期: 2013-04-02 修改日期: 2013-04-25

的问题。针对这一问题,本文提出了一种基于耦合误差和分段拟合建模的六维力传感器解耦算法。最后以本实验室自行研制的六维力传感器标定结果为例,验证了本文提出的解耦算法的优越性。

1 解耦原理与解耦算法

1.1 解耦原理

多维力传感器的耦合从产生的原因来讲分为2种:结构性耦合和误差性耦合^[9]。对于已经设计好的传感器,我们主要关注的是误差性耦合。理想的十字梁结构的六维力传感器,若对单一方向施力/力矩,该方向输出通道的输出电压值仅取决于该方向作用力的大小,与其余5方向作用力大小无关,如图1所示。但由于维间耦合的存在,几乎每一维作用到传感器的力分量都会对传感器各路输出信号产生影响,如图2所示。这种耦合的存在严重的影响着传感器的精度,因此必须对传感器进行解耦的运算。由于硬件解耦方式较难实现,通常采用软件算法的方式对传感器进行解耦。本文所使用解耦算法的基本思想是把标定数据分段拟合成一元二次函数进行耦合误差建模,然后将系数代入相关公式求解,无需复杂的矩阵运算,算法简单可靠。

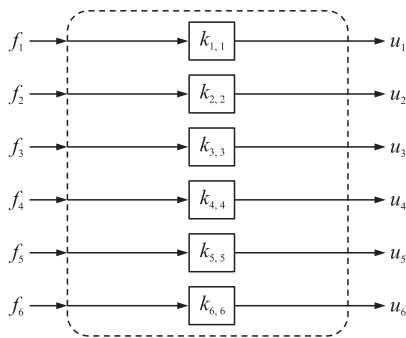


图1 无耦合时六维力传感器输入输出系统

1.2 基于耦合误差和分段拟合建模的静态解耦算法

把十字梁结构的六维力传感器视为单一方向施力/力矩,其他5个方向无输出的理想状态,即不存在耦合误差。假设在一定的范围内,传感器某一维的输出值仅与该维的输入值有关,且输入输出构成线性定常系统,如图1所示,则各维力/力矩可以直接由式(1)求得:

$$f_s = k'_{s,s} u_s \quad s = 1, 2, \dots, 6 \quad (1)$$

式中 $1/k'_{s,s} = k_{s,s}$, u_s 表示六维力传感器的第 s 维输出值, f_s 表示在六维力传感器上加装的第 s 维力/力矩, $k_{s,s}$ 为待求系数。式(1)称为无耦合求力公式。

实际上,由于机械制造水品、贴片工艺等各个方面的影响,六维力传感器不可能是理想的状态,所以

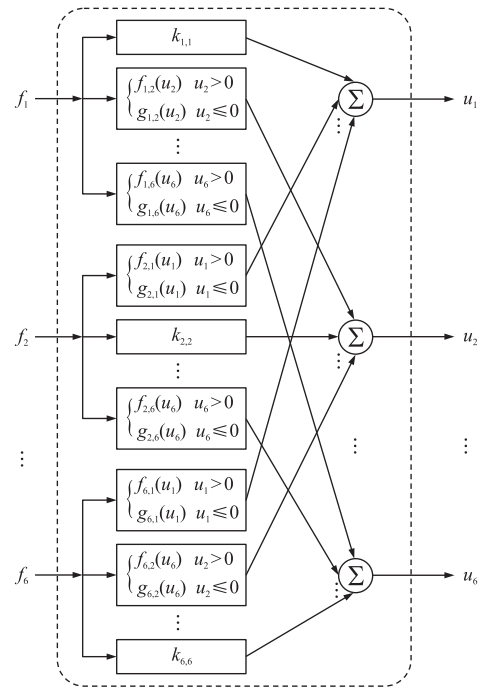


图2 有耦合时耦合系数分段六维力传感器输入输出系统

必会存在维间耦合。为了进一步提高标定精度,所以必须考虑非线性因素^[10-11]。

由于耦合误差的存在,传感器各维输出值与各个方向的力/力矩有关,如图2所示。每一路的电压输出值都由6个方向力/力矩共同叠加所得。将每一路的电压输出值都减去其他方向的力/力矩耦合引入的电压,即可以消除维间耦合。将消除维间耦合后的电压代入无耦合求力公式中就可以得到解耦后的力/力矩值。

$$f_i = k'_{i,i} (u_i - \sum_{s=1, s \neq i}^6 h_{s,i}(u_s)) \quad (2)$$

式中: $i = 1, 2, \dots, 6$, $h_{s,i}(u_s)$ 为不区分 u_s 正负时, u_s 拟合所得到的一元二次方程。

但是由于大量的实验数据表明,耦合所引入的各个通道输出电压在正负方向拟合的一元二次函数是不同的,这对传感器的精度有着显著的影响,所以应根据标定数据中输出电压的正负分段拟合,如图2所示,即:

$$h_{s,i}(u_s) = \begin{cases} f_{s,i}(u_s) & u_s > 0 \\ g_{s,i}(u_s) & u_s \leq 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$f_i = \begin{cases} k'_{i,i} (u_i - \sum_{s=1, s \neq i}^6 f_{s,i}(u_s)) & u_s > 0 \\ k'_{i,i} (u_i - \sum_{s=1, s \neq i}^6 g_{s,i}(u_s)) & u_s \leq 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中: $i=1,2,\dots,6$; $s=1,2,\dots,6$ 且 $s \neq i$, u_i 表示六维力传感器的第 i 维输出值, f_i 表示在六维力传感器上加装的第 i 维力/力矩, $k'_{i,i}$ 为待求系数, u_s 表示六维力传感器在受到第 i 维力/力矩作用时第 s 维的耦合输出值, $f_{s,i}(u_s)$ 表示 $u_s > 0$ 时 u_s 拟合所得到的一元二次方程, $g_{s,i}(u_s)$ 表示 $u_s \leq 0$ 时 u_s 拟合所得到的一元二次方程。

由于 $f_{s,i}(u_s)$ 和 $g_{s,i}(u_s)$ 关于 u_s 的一元二次方程, 所以 $f_{s,i}(u_s)$ 和 $g_{s,i}(u_s)$ 可以用式(5)表示, 即

$$\begin{cases} f_{s,i}(u_s) = a_{s,i}u_s^2 + b_{s,i}u_s + c_{s,i} & u_s > 0 \\ g_{s,i}(u_s) = a'_{s,i}u_s^2 + b'_{s,i}u_s + c'_{s,i} & u_s \leq 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中: $i=1,2,\dots,6$; $s=1,2,\dots,6$ 且 $s \neq i$, $f_{s,i}(u_s)$ 表示 $u_s > 0$ 时 u_s 拟合所得到的一元二次方程, $g_{s,i}(u_s)$ 表示 $u_s \leq 0$ 时 u_s 拟合所得到的一元二次方程, $a_{s,i}$ 、 $b_{s,i}$ 、 $c_{s,i}$ 均表示待求系数。

由于六维力传感器在数据采集前已经效零, 所以式(4)中 $c_{s,i}$ 和 $c'_{s,i}$ 为传感器效零后残余零点漂移, 比较小, 可以忽略。即式(5)可以写成式(6):

$$\begin{cases} f_{s,i}(u_s) = a_{s,i}u_s^2 + b_{s,i}u_s & u_s > 0 \\ g_{s,i}(u_s) = a'_{s,i}u_s^2 + b'_{s,i}u_s & u_s \leq 0 \end{cases} \quad (6)$$

对十字梁结构的六维力传感器分别单独进行6个方向的加载试验, 记录每个单独方向加载力/力矩后, 各个通道输出的电压值。将加载得到的数据用最小二乘法对式(6)进行一元二次方程的拟合, 得到在输出电压大于零时, 各个参数即 $a_{s,i}$ 和 $b_{s,i}$ 的最佳估计值。同理, 可以得到在卸载试验时, 即输出电压小于等于零时, 各个参数即 $a'_{s,i}$ 和 $b'_{s,i}$ 的最佳估计值。

2 六维力/力矩传感器的标定试验

为了规范传感器的输出数据, 提高传感器的测试精度, 需要对传感器进行静态标定实验, 从而找出传感器各路输出的电压信号与作用于传感器的力或力矩的大小和方向之间的关系。标定实验的准确性对传感器解耦有着重大影响, 对提高传感器的精度也是必不可少的。

2.1 标定试验系统

本标定试验采用的样机是东南大学远程测控技术重点实验室研制的六维力传感器, 其样机如图3所示。六维力传感器的敏感元件弹性体的设计是影响传感器性能的关键技术^[12], 该弹性体采用的是整体轮辐式十字梁结构。传感器的三维力和三维力矩是通过在敏感元件弹性体上贴应变片, 通过施加力或力矩, 使应变片变形, 转化为电压信号。应变片组成的电桥将外力/力矩转化为电压信号, 六路电压信

号通过放大和 A/D 转换送入计算机, 进而通过外力/力矩和电压信号的映射关系计算得到传感器所受到的外力和力矩。



图3 六维力传感器的样机

标定试验系统主要包括静态标定台(如图4所示)、六维力传感器、数据采集系统、计算机以及数据采集处理软件。实验室采用砝码重锤式对传感器进行标定试验。

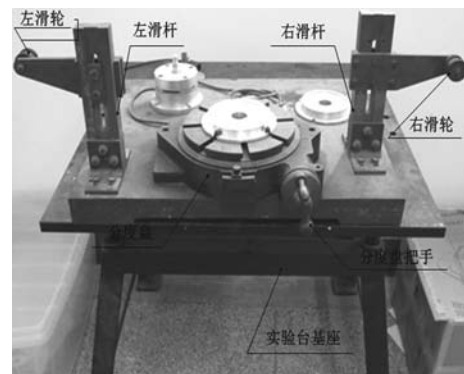


图4 六维力传感器标定台实物图

2.2 标定试验的步骤

六维力传感器标定实验步骤如下:

(1) 将六维力传感器的三维力按满量程分为20个的间隔点, 即从零开始, 在传感器的一侧每隔0.5 kg(5 N)依次加载或卸载砝码, 直到10 kg(100 N)为止; 将六维力传感器的三维力矩按满量程分为30个等间隔点, 即从零开始, 在传感器的两侧每隔2 kg(20 N)依次加载或卸载砝码, 直到60 kg(600 N)为止。

(2) 六维力传感器某一维的力/力矩加载过程从零开始, 依次加载直至满量程, 并依次记录在每个加载点的传感器各维的电压输出值, 此过程即为六维力传感器标定试验的加载过程。

(3) 六维力传感器该维的力/力矩卸载过程是从满量程开始, 依次卸载直至零, 并依次记录在每个卸载点的传感器各维的电压输出值, 此过程即为六

维力传感器标定试验的卸载过程。

(4)按照步骤2和步骤3,对传感器该力/力矩的反方向再加载和卸载一遍,并记录六维力传感器的电压输出值。

(5)按照步骤2、步骤3和步骤4,依次对六维力传感器的6个分量进行标定。

(6)按照上述步骤,每一维标定实验重复做3次,并分别记录标定试验数据。

3 实验结果分析

利用上述标定系统,根据静态标定实验台的特点,采用第3节所述的标定方法,对六维力传感器进行标定实验。将标定试验得到的3组数据中的2组进行一元二次方程的拟合,得到无耦合式(7)及解耦式(8)。然后用第3组数据加以验证。

$$\begin{cases} f_1 = -39.948u_1 & f_2 = -47.536u_2 \\ f_3 = -42.354u_3 & f_4 = -10.898u_4 \\ f_5 = -10.975u_5 & f_6 = -11.402u_6 \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} f_1 = -39.948(u_1 - h_{2,1}(u_2) - h_{3,1}(u_3) - h_{4,1}(u_4) - h_{5,1}(u_5) - h_{6,1}(u_6)) \\ f_2 = -47.536(u_2 - h_{1,2}(u_1) - h_{3,2}(u_3) - h_{4,2}(u_4) - h_{5,2}(u_5) - h_{6,2}(u_6)) \\ f_3 = -42.354(u_3 - h_{1,3}(u_1) - h_{2,3}(u_2) - h_{4,3}(u_4) - h_{5,3}(u_5) - h_{6,3}(u_6)) \\ f_4 = -10.898(u_4 - h_{1,4}(u_1) - h_{2,4}(u_2) - h_{3,4}(u_3) - h_{5,4}(u_5) - h_{6,4}(u_6)) \\ f_5 = -10.975(u_5 - h_{1,5}(u_1) - h_{2,5}(u_2) - h_{3,5}(u_3) - h_{4,5}(u_4) - h_{6,5}(u_6)) \\ f_6 = -11.402(u_6 - h_{1,6}(u_1) - h_{2,6}(u_2) - h_{3,6}(u_3) - h_{4,6}(u_4) - h_{5,6}(u_5)) \end{cases} \quad (8)$$

式中:

$$\begin{cases} h_{2,1}(u_2) = \begin{cases} 0.0004u_2^2 - 0.0537u_2 & u_2 > 0 \\ -0.0006u_2^2 + 0.0249u_2 & u_2 \leq 0 \end{cases} \\ h_{3,1}(u_3) = \begin{cases} -0.0002u_3^2 + 0.0275u_3 & u_3 > 0 \\ -0.0002u_3^2 + 0.0275u_3 & u_3 \leq 0 \end{cases} \\ h_{4,1}(u_4) = \begin{cases} -0.0033u_4^2 + 0.2354u_4 & u_4 > 0 \\ -0.00003u_4^2 + 0.1763u_4 & u_4 \leq 0 \end{cases} \\ h_{5,1}(u_5) = \begin{cases} -0.0278u_5^2 + 0.0439u_5 & u_5 > 0 \\ 0.0359u_5^2 + 0.1763u_5 & u_5 \leq 0 \end{cases} \\ h_{6,1}(u_6) = \begin{cases} 0.0229u_6^2 + 0.0918u_6 & u_6 > 0 \\ 0.0229u_6^2 + 0.0918u_6 & u_6 > 0 \end{cases} \end{cases}$$

$$h_{1,2}(u_1) = \begin{cases} -0.0004u_1^2 - 0.0104u_1 & u_1 > 0 \\ -0.0005u_1^2 - 0.0008u_1 & u_1 \leq 0 \end{cases}$$

$$h_{3,2}(u_2) = \begin{cases} 0.00005u_3^2 - 0.0126u_3 & u_3 > 0 \\ 0.00005u_3^2 - 0.0126u_3 & u_3 \leq 0 \end{cases}$$

$$h_{4,2}(u_3) = \begin{cases} 0.0229u_4^2 - 0.0426u_4 & u_4 > 0 \\ -0.0304u_4^2 - 0.0596u_4 & u_4 \leq 0 \end{cases}$$

$$h_{5,2}(u_5) = \begin{cases} -0.001u_5^2 + 0.113u_5 & u_5 > 0 \\ -0.0029u_5^2 + 0.1798u_5 & u_5 \leq 0 \end{cases}$$

$$h_{6,2}(u_6) = \begin{cases} -0.0273u_6^2 - 0.0759u_6 & u_6 > 0 \\ -0.0273u_6^2 - 0.0759u_6 & u_6 > 0 \end{cases}$$

$$h_{1,3}(u_1) = \begin{cases} -0.0006u_1^2 + 0.0194u_1 & u_1 > 0 \\ -0.0005u_1^2 - 0.0008u_1 & u_1 \leq 0 \end{cases}$$

$$h_{2,3}(u_2) = \begin{cases} 0.0011u_2^2 + 0.0101u_2 & u_2 > 0 \\ 0.0008u_2^2 - 0.0141u_2 & u_2 \leq 0 \end{cases}$$

$$h_{4,3}(u_4) = \begin{cases} 0.0405u_4^2 + 0.0923u_4 & u_4 > 0 \\ 0.0343u_4^2 - 0.0563u_4 & u_4 \leq 0 \end{cases}$$

$$h_{5,3}(u_5) = \begin{cases} -0.0356u_5^2 + 0.0999u_5 & u_5 > 0 \\ -0.0334u_5^2 - 0.0595u_5 & u_5 \leq 0 \end{cases}$$

$$h_{6,3}(u_6) = \begin{cases} 0.0018u_6^2 + 0.141u_6 & u_6 > 0 \\ 0.0018u_6^2 + 0.141u_6 & u_6 \leq 0 \end{cases}$$

$$h_{1,4}(u_1) = \begin{cases} 0.000004u_1^2 + 0.0016u_1 & u_1 > 0 \\ -0.00008u_1^2 - 0.0011u_1 & u_1 \leq 0 \end{cases}$$

$$h_{2,4}(u_2) = \begin{cases} -0.0003u_2^2 - 0.1259u_2 & u_2 > 0 \\ -0.0004u_2^2 - 0.1282u_2 & u_2 \leq 0 \end{cases}$$

$$h_{3,4}(u_3) = \begin{cases} -0.0013u_3^2 + 0.0024u_3 & u_3 > 0 \\ -0.0013u_3^2 + 0.0024u_3 & u_3 \leq 0 \end{cases}$$

$$h_{5,4}(u_5) = \begin{cases} 0.0004u_5^2 + 0.0085u_5 & u_5 > 0 \\ -0.0006u_5^2 + 0.0066u_5 & u_5 \leq 0 \end{cases}$$

$$h_{6,4}(u_6) = \begin{cases} 0.0037u_6^2 + 0.0085u_6 & u_6 > 0 \\ 0.0037u_6^2 + 0.0085u_6 & u_6 \leq 0 \end{cases}$$

$$h_{1,5}(u_1) = \begin{cases} -0.00004u_1^2 + 0.1052u_1 & u_1 > 0 \\ -0.000007u_1^2 + 0.1052u_1 & u_1 \leq 0 \end{cases}$$

$$h_{2,5}(u_2) = \begin{cases} -0.00008u_2^2 - 0.0018u_2 & u_2 > 0 \\ -0.00002u_2^2 + 0.0065u_2 & u_2 \leq 0 \end{cases}$$

$$h_{3,5}(u_3) = \begin{cases} -0.0004u_3^2 - 0.00006u_3 & u_3 > 0 \\ -0.0004u_3^2 - 0.00006u_3 & u_3 \leq 0 \end{cases}$$

$$h_{4,5}(u_4) = \begin{cases} -0.001u_4^2 + 0.0305u_4 & u_4 > 0 \\ -0.0003u_4^2 - 0.0565u_4 & u_4 \leq 0 \end{cases}$$

$$h_{6,5}(u_6) = \begin{cases} 0.0059u_6^2 + 0.0367u_6 & u_6 > 0 \\ 0.0059u_6^2 + 0.0367u_6 & u_6 > 0 \end{cases}$$

$$\begin{cases} h_{1,6}(u_1) = \begin{cases} 0.0005u_1^2 + 0.0067u_1 & u_1 > 0 \\ -0.0005u_1^2 + 0.0004u_1 & u_1 \leq 0 \end{cases} \\ h_{2,6}(u_2) = \begin{cases} 0.0007u_2^2 + 0.0045u_2 & u_2 > 0 \\ 0.0011u_2^2 + 0.001u_2 & u_2 \leq 0 \end{cases} \\ h_{3,6}(u_3) = \begin{cases} 0.00003u_3^2 - 0.0053u_3 & u_3 > 0 \\ 0.00003u_3^2 - 0.0053u_3 & u_3 \leq 0 \end{cases} \\ h_{4,6}(u_4) = \begin{cases} 0.0045u_4^2 - 0.0794u_4 & u_4 > 0 \\ -0.0024u_4^2 - 0.1122u_4 & u_4 \leq 0 \end{cases} \\ h_{5,6}(u_5) = \begin{cases} -0.0008u_5^2 + 0.1026u_5 & u_5 > 0 \\ -0.0016u_5^2 + 0.0527u_5 & u_5 \leq 0 \end{cases} \end{cases}$$

传感器的精度指标可由静态非线性率(I 类误

差)和静态耦合率(II 类误差)来表示^[13]。

解耦精度是评价解耦算法的重要指标之一,也是评价传感器好坏的重要指标。两种误差分析见表 1。

由表 1 知,与解耦前的相比,解耦后的 I 类误差没有多大的变化,但 II 类误差有着显著的提高。未分段拟合的解耦与分段拟合的解耦相比, I 类误差相差不大,但 II 类误差都有约 1% 的提高。因此,基于耦合误差和分段拟合建模的解耦算法显著地提高了传感器的精度。大量现场实验数据表明,传感器在量程范围内长时间的使用,拟合参数仍然适用求解传感器的测量精度,物理特性的变化可以忽略。

表 1 传感器未解耦的精度以及未分段及分段解耦算法解耦后的精度对比

	F_x			F_y			F_z		
	未解耦	未分段解耦	分段解耦	未解耦	未分段解耦	分段解耦	未解耦	未分段解耦	分段解耦
I 类误差	0.60%	0.544%	0.48%	0.36%	0.333%	0.49%	0.03%	0.036%	0.035%
II 类误差	19.2%	5.158%	4.365%	17.12%	3.959%	2.965%	21.95%	4.736%	3.72%

	M_x			M_y			M_z		
	未解耦	未分段解耦	分段解耦	未解耦	未分段解耦	分段解耦	未解耦	未分段解耦	分段解耦
I 类误差	0.64%	0.51%	0.51%	0.53%	0.585%	0.59%	0.47%	0.458%	0.425%
II 类误差	6.14%	4.104%	2.92%	9.12%	2.72%	1.725%	11.77%	1.967%	1.845%

4 结束语

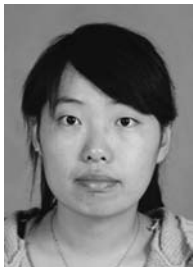
本文提出了一种基于耦合误差和分段拟合建模的六维力传感器解耦算法。以本实验室自行设计的六维力传感器为样机,对传感器进行标定试验,将标定实验得到的数据应用于该解耦算法中,计算出解耦前后六维力传感器的 I 类误差和 II 类误差。同时,将标定试验得到的数据应用于基于耦合误差建模的解耦算法中,得到未分段拟合时六维力传感器的 I 类误差和 II 类误差。结果表明,本文提出的静态解耦算法显著地提高了十字梁结构的六维力传感器的精度。

参考文献:

[1] Perry D. Multi-Axis Force and Torque Sensing[J]. Sens Rev, 1997, 17: 117-120.
 [2] 肖汶斌,董文才. 六维力传感器静态解耦算法[N]. 武汉: 海军工程大学学报, 2012.
 [3] Xu G, Song A, Li H. Adaptive Impedance Control for Upper-Limb Rehabilitation Robot Using Evolutionary Dynamic Recurrent Fuzzy

Neural Network[J]. J Intell Robot Syst, 2011, 62: 501-525.
 [4] Nagata F, Kusumoto Y, Watanabe K, et al. Polishing Robot for PET Bottle Molds Using a Learning-Based Hybrid Position/Force Controller. Proceedings of the 5th Asian Control Conference; Melbourne, Australia. June 2004: 914-921.
 [5] Lee S, Asada H. A Perturbation/Correlation Method for Force Guided Robot Assembly[J]. IEEE Trans Robot Autom, 1999, 15: 764-773.
 [6] Ma Junqing, Song Aiguo, Xiao Jing. A Robust Static Decoupling Algorithm for 3-Axis Force Sensors Based on Coupling Error Model and ϵ -SVR [J]. MDPI. Basel, Switzerland. October, 2012, 12 (11): 14537-14555.
 [7] 李益永,杨庆之. 广义逆矩阵几种算法的复杂度比较[J]. 天津南开大学学报: 自然科学版, 2012, 45(5): 7-13.
 [8] 马俊青,宋爱国. 基于耦合误差建模的多维力传感器解耦算法[P]. 中国, 201010168331. 8. 2010-09-15.
 [9] 曹会彬,孙玉香. 多维力传感器耦合分析及解耦方法的研究[J]. 传感技术学报, 2011, 24(8): 1136-1140.
 [10] LU T F, LN G C I, HE J R. Neural-Network Based 3D Force/Torque Sensor Calibration for Robot Applications[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 1997, 10(1): 87-97.
 [11] 姜力,刘宏,蔡鹤皋. 多维力/力矩传感器静态解耦的研究[J]. 仪器仪表学报, 2004, 25(3): 284-287.

[12] 秦岗,曹效英,宋爱国,等. 新型四维腕力传感器弹性体的有限元分析[J]. 传感技术学报,2003,16(3):238-241.



武秀秀(1986-),女,安徽宿州人,硕士研究生。主要研究方向为多维力传感器, wuxiuxiu626@126.com;

[13] 马俊青,宋爱国,吴涓. 三维力传感器静态解耦算法的研究与应用[J]. 计量学报,2011,32(6):517-521.



宋爱国(1968-),男,安徽黄山人,教授,博士生导师。主要研究方向为机器人传感与控制技术、人机交互与虚拟现实技术, a.g.song@seu.edu.cn。