

DOI: 10.13382/j.jemi.B1902780

三维力传感器静态解耦方法的研究*

周 山¹ 刘利平^{1,2} 高建宇³ 张宝存⁴

(1. 华北理工大学 人工智能学院 唐山 063210; 2. 华北理工大学 矿业学院 唐山 063210;

3. 华北理工大学 轻工学院 唐山 063000; 4. 德森特传感系统工程有限公司 深圳 518000)

摘要: 维间耦合是影响三维力传感器测量精度的重要因素。针对存在耦合的现象,介绍了三维力传感器维间耦合的基本原理,分析了基于克拉默法,求解矩阵广义逆解耦算法,并对传统基于耦合误差建模的静态解耦算法进行改进,对耦合方向的数据采用牛顿三次插值法进行处理。以自主研发的三维力传感器进行标定实验,采用3种解耦方法进行计算。实验结果表明改进后的基于耦合误差建模解耦算法与传统解耦方法和改进前的方法相比,具有更高的解耦精度。

关键词: 三维力传感器;静态解耦;维间耦合

中图分类号: TP212 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4030

Research on static decoupling algorithm for 3-axis wrist force sensor

Zhou Shan¹ Liu Liping^{1,2} Gao Jianyu³ Zhang Baocun⁴

(1. College of Artificial Intelligence, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, China;

2. College of Mining Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, China;

3. Qing Gong College, North China University of Science and Technology, Tangshan 063000, China;

4. Desente (Shenzhen) sensor system engineering Co., Ltd, Shenzhen 518000, China)

Abstract: Static coupling is one of the most important factors affecting the measuring accuracy of three-axis force sensor. For the phenomenon of coupling, this paper introduces the principle of three-axis force sensor's couple. Analysis of two different linear decoupling algorithms, which were based on the Cramer theorem and the least square method. The static decoupling algorithm based on coupling error modeling is improved. Processing the data in the coupling direction using Newton's cubic interpolation method. The experimental results on the self-developed three-axis wrist force sensor show that the novel algorithm has high precision.

Keywords: three-axis force sensor; static decoupling; static coupling

0 引言

多维力传感器指的是一种能够同时测量两个方向以上力及力矩分量的力传感器。多维力传感器应用于多种领域,如对机器人指、手爪研究,航空航天领域^[1-4]的飞行器就需要测量多维力的信息等。多维腕力传感器由于^[5-6]机械加工精度,结构设计原理等原因,维间耦合是不可避免的,即力信号与应变桥的输出信号之间存在着较强的耦合作用。想要提高多维力传感器的测量精度,

消除维间耦合是至关重要的。

减小维间耦合可以从制造工艺和原理入手,从而消除其产生的根源,但难度较大。研究合适的解耦算法比较现实。传统的静态线性解耦采用基于克拉默法则的解耦或最小二乘法求解矩阵广义逆的方法,这两种方法各有利弊,基于克拉默法则的线性解耦方法简单但难以满足在满量程范围内总体误差最小,而采用最小二乘法解耦可满足在满量程范围内总体误差最小,但若实验数据存在^[7]粗大误差,病态矩阵的存在会影响得到错误的C矩阵。传统的基于耦合误差建模的静态解耦算法虽然解

收稿日期: 2019-11-24 Received Date: 2019-11-24

* 基金项目: 华北理工大学研究生创新项目资助

决了这些问题,并提高了计算精度,但是对小量程的传感器,标定数据较少时,在对耦合方向的数据进行拟合时可能存在拟合效果较差的情况,导致实验结果的误差较大。

本文以自主研发的三维力传感器为研究对象,设计了三维力传感器静态标定试验。优化基于耦合误差建模的静态解耦算法,对耦合方向的数据采用牛顿三次插值的方法进行处理。对三种解耦方法进行了具体应用及误差分析比较。

1 三种静态解耦算法

1.1 基于克拉默法则的静态解耦算法

假设传感器^[8]各通道电桥的输入量与输出量有良好的线性关系。即传感器系统为线性系统,则输入力 F 与输出电压 U 之间满足如下数学模型:

$$F = C \cdot U \quad (1)$$

式中: F 为广义力向量; C 为 3×3 标定矩阵; U 为输出矩阵。

选取 3 个线性无关的力向量组成标定力,通过求解线性方程组的方式直接求出标定矩阵 C 。把多次(3 次以上)标定实验的各通道各级载荷的测量数据取算数平均数,即:

$$F_{i,j} = \frac{\sum_n F_{i,j}^n}{n} \quad (2)$$

$$U_{i,j} = \frac{\sum_n U_{i,j}^n}{n} \quad (3)$$

式中: $i, j=1, 2, 3$; $F_{i,j}$ 表示在第 n 次加载过程中第 i 号广义力的大小; $U_{i,j}$ 表示第 i 号广义力在第 n 次加载过程中第 j 号电桥的输出。

根据式(1)~(3)即可求出唯一的标定矩阵 C 。

1.2 基于求解矩阵广义逆的静态解耦算法

基于求解矩阵广义逆的静态解耦法本质还是线性解耦,可满足在满量程范围内总体误差最小。即在^[9-10]量程范围内标定多个力,将载荷按量程点从 0 逐级增加至正满量程值,然后逐级卸载至 0,再从 0 增加至负满量程,最后逐级卸载至 0,重复多次。根据最小二乘法,依据标定数据进行线性拟合,可以得到广义外力各分量分别单独加载时,力分量与各电桥输出电压之间的线性回归方程:

$$\begin{cases} u_{11} = k_{11} \cdot f_{x1} + b_{11} \\ u_{12} = k_{12} \cdot f_{x2} + b_{12} \\ u_{13} = k_{13} \cdot f_{x3} + b_{13} \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} u_{21} = k_{21} \cdot f_{y1} + b_{21} \\ u_{22} = k_{22} \cdot f_{y2} + b_{22} \\ u_{23} = k_{23} \cdot f_{y3} + b_{23} \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} u_{31} = k_{31} \cdot f_{z1} + b_{31} \\ u_{32} = k_{32} \cdot f_{z2} + b_{32} \\ u_{33} = k_{33} \cdot f_{z3} + b_{33} \end{cases} \quad (6)$$

即:

$$\begin{pmatrix} u_{11} & u_{12} & u_{13} \\ u_{21} & u_{22} & u_{23} \\ u_{31} & u_{32} & u_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} f_{x1} & f_{x2} & f_{x3} \\ f_{y1} & f_{y2} & f_{y3} \\ f_{z1} & f_{z2} & f_{z3} \end{pmatrix} \quad (7)$$

则输入力 F 和输出电压 U 的关系为:

$$U = KF \quad (8)$$

式中: U 为各电桥输出电压; F 为广义外力各分量; K 为所求的常数矩阵。

结合式(1)和(8)可得到标定矩阵 C 的最小二乘解即:

$$C = (K^T K)^{-1} K^T \quad (9)$$

式中: C 为解耦矩阵,反应了各维输入力与输出之间的耦合关系。

1.3 基于优化的耦合误差建模的静态解耦算法

基于求解矩阵广义逆的静态解耦算法所求标定矩阵的精确性受到变态矩阵的影响,且矩阵运算比较多。为了解决这些问题,故提出了基于耦合误差建模的静态解耦算法。

理想状态下,三维力传感器^[11-12]不存在维间耦合的现象,在某方向施加的力分量只会对该方向的电压输出值有影响。即:

$$\begin{cases} u_x = k_{1x} f_x \\ u_y = k_{2y} f_y \\ u_z = k_{3z} f_z \end{cases} \quad (10)$$

现实状态下,三维力传感器存在维间耦合的现象,在某方向加的力分量会对其他方向的电压输出值有影响。如光施加 X 方向的单向力会对 Y, Z 方向的电压输出值产生影响。即:

$$\begin{cases} u_x = u_{11} + u_{21} + u_{31} \\ u_y = u_{12} + u_{22} + u_{32} \\ u_z = u_{13} + u_{23} + u_{33} \end{cases} \quad (11)$$

式中: u_{ii} 为主方向力对该方向电压输出的影响分量; u_{ij} 为其他方向力对该方向电压输出的影响分量。

由分析可知,每一个通^[13]道的电压输出值由三路作用力的分量叠加而成,将 f_x, f_y, f_z 考虑进去,即:

$$\begin{cases} u_x = k_{1x} f_x + k_{2y} f_y + k_{3z} f_z \\ u_y = k_{1y} f_x + k_{2y} f_y + k_{3z} f_z \\ u_z = k_{1z} f_x + k_{2y} f_y + k_{3z} f_z \end{cases} \quad (12)$$

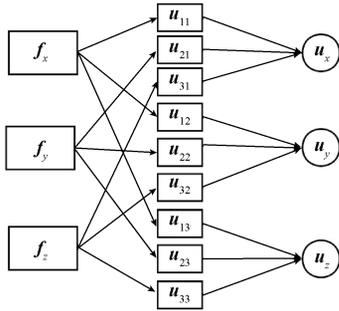


图 1 三维力传感器输入输出模型

Fig. 1 Input and output model of three-axis force sensor

式中: $k_{ij}(i \neq j)$ 为 i 方向对 j 方向的耦合系数。

在实际的解耦过程中,电压值为已知量,力 f_x 为未知量,令 $k_{ij}k'_{ji} = k'_{ij}, k_{ij} = 1/k'_{ij}$, 可得解耦公式:

$$\begin{cases} f_x = k'_{11}(u_x - k'_{21}u_y - k'_{31}u_z) \\ f_y = k'_{22}(u_y - k'_{12}u_x - k'_{32}u_z) \\ f_z = k'_{33}(u_z - k'_{13}u_x - k'_{23}u_y) \end{cases} \quad (13)$$

式(13)为基于耦合误差建模的静态解耦算法的基本模型,即将各路得到的电压输出值减去其他路的影响电压值。

根据式(13)对实验标定得到的数据进行处理,对 X 、 Y 、 Z 三个主方向和耦合方向均采用线性拟合,得到拟合公式如表 1 所示。

表 1 线性拟合表

Table 1 Linear fitting table

拟合公式	R^2
$f_x = 15.8917u_x$	0.999 9
$u_y = -0.0423u_x - 0.019$	0.897 0
$u_z = -0.0023u_x + 0.000 9$	0.723 0
$f_y = 15.3111u_y$	0.999 8
$u_x = 0.0231u_y + 0.000 3$	0.857 5
$u_z = 0.0038u_y + 0.000 07$	0.791 7
$f_z = 15.0089u_z$	0.999 8
$u_x = 0.0242u_z - 0.000 001$	0.933 3
$u_y = 0.015u_z - 0.000 02$	0.574 1

R^2 的值介于 0~1, 越接近 1, 回归拟合效果越好, 一般认为超过 0.8 的模型拟合优度比较高。由表 1 数据分析可得, 在 X 、 Y 、 Z 主方向上, 数据线性拟合效果很好, 但是在部分耦合方向, 如 X 对 Z 的耦合, Y 对 Z 的耦合, Z 对 Y 的耦合上, 线性拟合效果不是太好, 不能满足对实验精度的要求。各通道的维间耦合不完全是线性的。为了得到较好的解耦效果, 从实验室的三维力传感器标定数据考虑, 对 X 、 Y 、 Z 主方向的数据进行一元线性回归拟合, 对耦合方向的数据采用多阶拟合或者多阶插值的方法

法进行处理。

传统的基于耦合误差的静态解耦算法对耦合方向的数据采用了^[14-15]基于最小二乘法的二阶分段拟合的方法进行了处理。最小二乘法是一种数学优化技术, 通过给定的点来找到一个已知形式的函数来最大限度地逼近这些点, 拟合曲线不一定经过所有的已知离散数据点 (x, y) 。插值法是找到一个连续曲线来穿过这些点。而这些点是通过多次标定实验得到的精确数据, 是可以用来计算的。且此次实验数据量不是很大, 二阶拟合效果欠佳, 如 Y 正方向对 Z 耦合拟合公式的 R^2 值为 0.700 3, Z 正方向对 X 耦合拟合公式的 R^2 值为 0.642 7, 因此对耦合方向的数据采用三次牛顿插值法进行处理, 构建一个插值函数 $N_n(x)$ 来表示耦合方向的电压值的关系:

$$\begin{cases} f_x = k'_{11}u_x \\ u_y = k'_{12}u_x^3 + m'_{12}u_x^2 \\ u_z = k'_{13}u_x^3 + m'_{13}u_x^2 \end{cases} \quad (14)$$

式中: k'_{12} 、 m'_{12} 的值分别为牛顿插值函数的三次项系数, 二次项系数。

$$N_n(x) = \sum_{i=0}^n f[x_0, x_1, \dots, x_k] w_k(x) \quad (15)$$

式中: $w_{(n+1)}(x) = \prod_{i=0}^n (x - x_i)$, $f[x_0 \dots x_k] = \frac{f[x_1 \dots x_k] - f[x_0 \dots x_{k-1}]}{x_k - x_0}$, $f[x_0, x_1 \dots x_k]$ 为差商, $k = 0, 1, 2 \dots$ 。

本次实验将 X 、 Y 、 Z 力^[16-17]方向每隔 4 N 作为一个测量点。在传感器的全量程范围内, 对每个方向, 将载荷从 0 值逐步加载至正向满量程, 再逐步减少至 0; 再逐步加载至负向满量程, 再逐步减少至 0。如此重复 6 遍, 记录标定实验数据。做实验中应注意动作小心轻缓, 等待数据稳定后再进行记录。

根据实验数据, 建立各路差商表, 建立 X 方向对 Y 耦合的差商表如表 2 和 3 所示。

表 2 X 负方向对 Y 耦合的差商表

Table 2 Difference quotient of X negative direction to Y coupling

U_x	U_y	一阶均差	二阶均差	三阶均差
-1.260 0	0.018 39			
-1.004 9	0.014 61	-0.015		
-0.754 4	0.011 03	-0.0164	-0.222 8	
-0.503 8	0.007 06	0.0138	0.005 2	0.010 7
-0.251 2	0.002 99	-0.015 9	-0.004 1	-0.012 4
0	0	-0.012 1	0.007 4	0.015 2

由于测得的电压值是变化的, 因此在对得到的数据进行牛顿插值函数的构建时, 用 4 个最接近测量点的数据进行计算, 选用适合的三阶均差。

表 3 X 正方向对 Y 耦合的差商表

Table 3 Difference quotient of X positive direction to Y coupling

U_x	U_y	一阶均差	二阶均差	三阶均差
0	0			
0.253 60	-0.017 0	-0.065 1		
0.507 01	-0.035 0	-0.069 3	-0.008 3	
0.757 3	-0.049 9	0.072 4	-0.006 1	0.002 9
1.010 1	-0.069 8	-0.076 6	-0.008 4	-0.003 1
1.239 9	-0.079 7	-0.069 1	0.015	0.031 1

X 方向与各路输出的关系如图 2 所示。

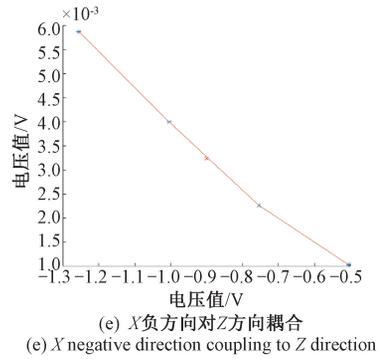
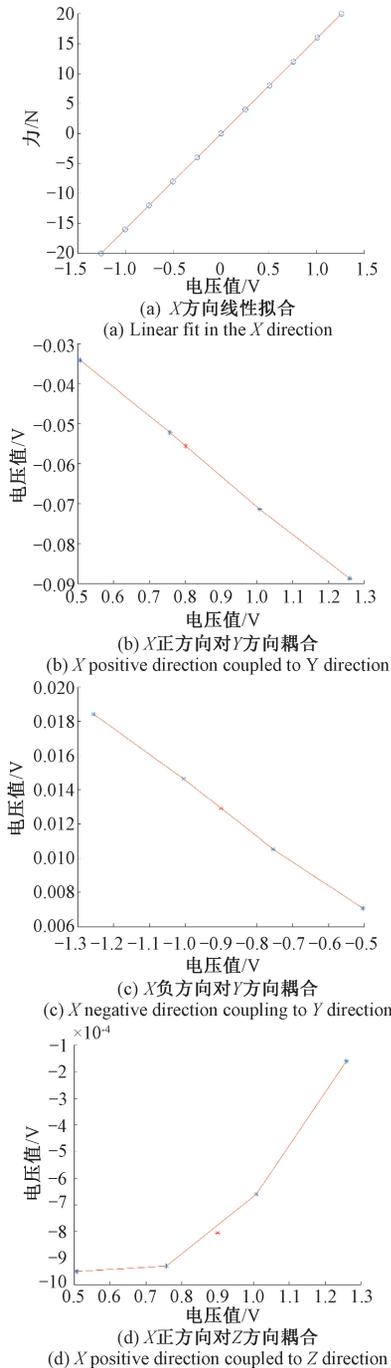


图 2 X 方向与各路输出的关系

Fig. 2 The relationship between X direction and each output

同理,对 Y、Z 方向的得到的数据进行同样的处理,求得各路的输出关系,得到解耦方程组如下:

$$\begin{cases} f_x = 15.891 7u_x \\ u_y = \begin{cases} 0.031 1u_x^3 - 0.079 1u_x^2, u_x \geq 0 \\ 0.010 7u_x^3 + 0.029 5u_x^2, u_x < 0 \end{cases} \\ u_z = \begin{cases} -0.000 2u_x^3 + 0.002 5u_x^2, u_x \geq 0 \\ 0.003 9u_x^3 + 0.012 9u_x^2, u_x < 0 \end{cases} \end{cases} \quad (16)$$

$$\begin{cases} f_y = 15.311 1u_y \\ u_x = \begin{cases} -0.011 7u_y^3 + 0.033 1u_y^2, u_y \geq 0 \\ -0.004 6u_y^3 - 0.012 3u_y^2, u_y < 0 \end{cases} \\ u_z = \begin{cases} -0.007 4u_y^3 + 0.025 1u_y^2, u_y \geq 0 \\ -0.042 8u_y^3 - 0.140 1u_y^2, u_y < 0 \end{cases} \end{cases} \quad (17)$$

$$\begin{cases} f_z = 15.0089u_z \\ u_x = \begin{cases} 0.0986u_z^3 - 0.2938u_z^2, u_z \geq 0 \\ 0.0987u_z^3 - 0.2943u_z^2, u_z < 0 \end{cases} \\ u_y = \begin{cases} -0.0061u_z^3 + 0.0216u_z^2, u_z \geq 0 \\ -0.0061u_z^3 - 0.0217u_z^2, u_z < 0 \end{cases} \end{cases} \quad (18)$$

将求解系数代入解耦方程组,用 u_{ij} 表示 i 方向对 j 方向的耦合,得到解耦公式;即:

$$f_x = \begin{cases} 15.891 7(u_x - u_{xy} - u_{xz}), u_x \geq 0 \\ 15.891 7(u_x - u_{xy} - u_{xz}), u_x < 0 \end{cases} \quad (19)$$

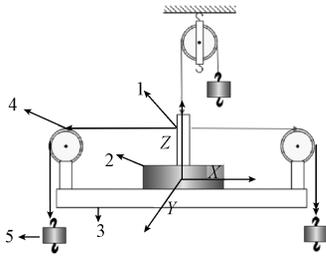
$$f_y = \begin{cases} 15.311 1(u_y - u_{yx} - u_{yz}), u_y \geq 0 \\ 15.311 1(u_y - u_{yx} - u_{yz}), u_y < 0 \end{cases} \quad (20)$$

$$f_z = \begin{cases} 15.008 9(u_z - u_{zx} - u_{zy}), u_z \geq 0 \\ 15.008 9(u_z - u_{zx} - u_{zy}), u_z < 0 \end{cases} \quad (21)$$

2 静态标定和误差及不确定度分析

为了研究三维力传感器输出信号维间耦合的现象,设计了图 3、4 所示的标定装置。标定装置^[18-20]由标定

杆、力传感器、试验台基座、滑轮组件、砝码等组成。加载单元由 X 加载单元, Y 加载单元, Z 加载单元组成, 各方向通过调节加载砝码的重量来改变加载力的大小。



1-标定杆;2-力传感器;3-试验台基座;4-滑轮组件;5-砝码

图 3 标定装置示意图

Fig. 3 Calibration device schematic



图 4 加载台实物图

Fig. 4 Photo of the loading platform

在上述标定装置上, 对该三维力传感器各方向施加单维力, 进行标定, 具体步骤如下。

- 1) 将加载系统, 传感器安装好, 注意保证传感器定位准确, 连线牢固; 并调整底座, 使其水平。
- 2) 进行预实验, 按照 10% 的级差加载, 以此验证加载系统的稳定性。
- 3) 以 X 轴方向为例, 在传感器量程范围内将载荷按测量点从零步增加至满量程值 (每 4 N 为一个测量点), 然后卸载至 0, 再逐步增加至负向满量程值, 然后再卸载至 0。此过程重复 6 次, 加载过程中操作需缓慢轻稳, 避免引起碰撞。
- 4) 按照步骤 3) 完成其他方向的标定, 对应记录测试数据。
- 5) 求解标定矩阵并利用标定矩阵进行解耦实验。
以自主研发的三维力传感器进行标定实验, 通过获

取的输出数据对传感器的精度进行分析与研究, 从而评价传感器性能的优劣。对该三维力传感器各方向施加单维力与采用 3 种解耦算法后传感器的输出测量值及误差如表 4~7 所示。

表 4 克拉默法则的误差

Table 4 Error of Cramer's rule

载荷方向	F_x	F_y	F_z
理论值	15	8	10
克拉默法则	15.038 0	8.106 3	10.027 8
误差	0.038 0	0.106 3	0.027 8

表 5 最小二乘法解耦误差

Table 5 Error of least squares rule

载荷方向	F_x	F_y	F_z
理论值	15	8	10
矩阵广义逆法	15.123 9	7.916 3	10.017 0
误差	0.123 9	0.083 7	0.017 0

表 6 二阶分段的建模解耦法的误差

Table 6 Error of modeling decoupling method for second order segmentation

载荷方向	F_x	F_y	F_z
理论值	15	8	10
二阶分段法	14.852 0	7.910 0	9.974 8
误差	0.148	0.09	0.025 2

表 7 牛顿三次插值的建模解耦法的误差

Table 7 Error of modeling decoupling method for Newton cubic interpolation

载荷方向	F_x	F_y	F_z
理论值	15	8	10
牛顿插值法	15.028 1	7.914 2	10.016 5
误差	0.028 1	0.085 8	0.016 5

由表 4~7 可得, 对得到的数据采用 3 种解耦方法进行处理后, 采用克拉默法则和求解矩阵广义逆法在 X 、 Y 、 Z 三方向的误差值偏大, 解耦效果不太理想。而采用二阶分段的建模解耦法由于拟合效果较差, 导致得到的数据在 X 和 Y 方向的误差值较大, 采用牛顿三次插值得到的数据精度高于用二阶分段测得的数据精度, 也远高于克拉默法和求解矩阵广义逆法的精度。

从测量方法分析, 影响测量力不确定度的影响因素主要是由重复测量引起的 A 类不确定度 u_A 和测量仪器误差引起的 B 类不确定度 u_B 。当置信因子 $k=2$ (置信水平 $P=0.954$) 时, 力 ($f_x=15\text{ N}$, $f_y=8\text{ N}$, $f_z=10\text{ N}$) 测量的扩展不确定度分别为 $u_x=0.1076\text{ N}$, $u_y=0.1052\text{ N}$, $u_z=0.0734\text{ N}$ 。力的测量结果如下:

$$f_x = f_x \pm u_x = (15 \pm 0.1076)\text{ N}$$

$$f_y = f_y \pm u_y = (8 \pm 0.1052) \text{ N}$$

$$f_z = f_z \pm u_z = (10 \pm 0.0734) \text{ N}$$

由表 8 可知,力测量的不确定度较小,结果更接近被测量值的真值,具有使用价值。

表 8 不确定度分析

Table 8 Uncertainty analysis ($P=0.954$)

被测值	A 类不确定度	B 类不确定度	合成不确定度	不确定度评定
15	0.040 0	0.036	0.053 8	0.107 6
8	0.038 3	0.036	0.052 6	0.105 2
10	0.007 3	0.036	0.036 7	0.073 4

3 结 论

本文归纳分析了基于克拉默法则和求解矩阵广义逆法解耦的基本原理,针对求解矩阵广义逆法可能产生病态矩阵的现象,进一步研究了耦合误差建模的静态解耦算法,并在耦合方向的数据处理采用了牛顿三次插值的方法代替分段二阶拟合法,以此来解决拟合效果差的情况。将这 3 种方法基于自主研制的三维力传感器进行了解耦计算。试验结果表明,牛顿三次插值的耦合误差建模的静态解耦算法误差值较小,有较好的解耦效果,满足实际应用的需要。

参考文献

- [1] 姚建涛,陈俊涛,陈新博,等. 可嵌入式多维柔性力/位传感器[J]. 仪器仪表学报,2018,39(10):184-186.
YAO J T, CHEN J T, CHEN X B, et al. Embedded flexible multi-dimensional displacement and force sensor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(10): 184-186.
- [2] 姚建涛,蔡大军,朱佳龙,等. 容错并联式六维力传感器可靠性及冗余分析[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(8): 1699-1700.
YAO J T, CAI D J, ZHU J L, et al. Reliability and redundancy analysis of fault-tolerant parallel six-axis force sensor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(8): 1699-1700.
- [3] 曹会彬,孙玉香,刘利民,等. 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): 1136-1138.
CAO H B, SUN Y X, LIU L M, et al. Coupling analysis of multi-axis force sensor and research of decoupling method [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2011, 24(8): 1136-1138.
- [4] 张晨. 多维力传感器的研究现状分析[J]. 北方工业大学学报, 2017, 29(2): 86-88.
ZHANG CH. The analysis of the current research status on multidimensional force sensor [J]. Journal of North

- China University of Technology, 2017, 29(2): 86-88.
- [5] 冯李航,王东,徐扬,等. 运动-力解耦的多维轮力传感器研究[J]. 仪器仪表学报,2017,38(5):1240-1248.
FENG L H, WANG D, XU Y, et al. Motion-force decoupling wheel force transducer [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(5): 1240-1248.
- [6] 夏秋,潘广香,卢淑群,等. 基于独立成分分析法的多维力传感器静态解耦研究[J]. 蚌埠学院学报, 2017, 6(4): 4-7.
XIA Q, PAN G X, LU SH Q, et al. Research on decoupling of multi-axis force sensor based on ICA [J]. Journal of Bengbu University, 2017, 6(4): 4-7.
- [7] 龚莉杰. 一种新型多维力传感器及其标定方法的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2015.
GONG L J. Research on a novel multi-DOF force/torque sensor and its calibration method [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.
- [8] 肖汶斌,董文才. 六维力传感器静态解耦方法[J]. 海军工程大学学报, 2012, 24(3): 46-48.
XIAO W B, DONG W C. Research on nonlinear static decoupling of six-axis force/torque sensor [J]. Journal of Naval University of Engineering, 2012, 24(3): 46-48.
- [9] 张强. 指尖三维力传感器与仿生触须传感器的研究[D]. 南京:东南大学,2017.
ZHANG Q. Study on three-dimension fingertip force sensor and biomimetic whisker sensor [D]. Nanjing: Southeast University, 2017.
- [10] 刘砚涛,郭冰,尹伟,等. 六维力传感器静态标定及解耦研究[J]. 强度与环境, 2013(1):44-49.
LIU Y T, GUO B, YIN W, et al. Research on static calibration and decoupling for six-axis force sensor [J]. Structure & Environment Engineering, 2013(1):44-49.
- [11] 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): 519-521.
MA J Q, SONG A G, WU J. Research and application of static decoupling for 3-axis wrist force sensor [J]. Acta Metrologica Sinica, 2011, 32(6): 519-521.
- [12] 宋爱国,马俊青. 基于耦合误差建模的多维力传感器解耦算法[P]. CN: 201010168331. 2010-09-15.
SONG AI G, MA J Q. A static decoupling algorithm based on coupling error model [P]. CN: 201010168331. 2010-09-15.
- [13] 李永明. 一种基于柔性结构的新型三维力传感器优化设计与解耦[D]. 赣州:江西理工大学, 2018.
LI Y M. Structural optimization and decoupling of a novel three-dimensional force sensor based on flexible structure [D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and

- Technology, 2018.
- [14] 贾振元, 李映君, 张军, 等. 并联式轴用压电六维力/力矩传感器[J]. 机械工程学报, 2010, 46(11): 63-65.
- JIA ZH Y, LI Y J, ZHANG J, et al. Axial piezoelectric 6-component force/torque sensor based on parallel structure[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(11): 63-65.
- [15] 茅晨, 宋爱国, 高翔, 等. 六维力/力矩传感器静态解耦算法的研究与应用[J]. 传感技术学报, 2015, 28(2): 205-210.
- MAO CH, SONG AI G, GAO X, et al. Research and application of static decoupling algorithm for six-axis force/torque sensor [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2015, 28(2): 205-210.
- [16] 李昂. 小型多维传感器设计及应用[D]. 南京: 东南大学, 2017.
- LI A. Design and application of miniaturized multi-dimension force sensor [D]. Nanjing: Southeast University, 2017.
- [17] 李颖康. 基于重载并联六维力传感器的静态标定实验研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2018.
- LI Y K. Static calibration experiment research based on parallel six-axis force sensor with heavy-load capacity[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2018.
- [18] 李亚娟. 六维力传感器的数字化应变检测及在线标定研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- LI Y J. Research on digital strain gauges and on-line calibration of six-axis force sensor [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
- [19] 赵延治, 赵铁石, 曹虎成, 等. 自标定重载并联四维测力台测量机理与标定试验[J]. 机械工程学报, 2017, 53(23): 57-58.

ZHAO Y ZH, ZHAO T SH, CAO H CH, et al. Measuring principle and calibration experiment of the overloaded self-calibration parallel four-dimensional force measuring platform [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(23): 57-58.

- [20] 李军, 聂红, 熊琪, 等. 一种新型的六维力传感器静态标定系统设计研究[J]. 机械设计与制造, 2016(5): 68-70, 74.
- LI J, NIE H, XIONG Q, et al. Research on the Design of Static Calibration System for Six-Axis Force Sensor [J]. Machinery Design & Manufacture, 2016(5): 68-70, 74.

作者简介



周山, 2018年于山西大学获得学士学位, 现为华北理工大学硕士研究生, 主要研究方向为计算机控制技术及其应用。

E-mail: 370971591@qq.com

Zhou Shan received his B. Sc. degree from Shanxi University in 2018. Now he is a M. Sc. candidate at North China University of Science and Technology. His main research interests include computer control technology and its application.



刘利平 (通信作者) 2000年于河北工业大学获得学士学位, 2009年于北京工业大学获得硕士学位, 现为华北理工大学教授、硕士生导师、博士研究生, 主要研究方向为模式识别与智能系统。

E-mail: 11745430@qq.com

Liu Liping (Corresponding author) received her B. Sc. degree from Hebei University of Technology in 2000 and M. Sc. from Beijing University of Technology in 2009. Now she is a professor, M. Sc. supervisor and Ph. D. candidate at North China University of Science and Technology. Her main research interests include pattern recognition and intelligent system.