

机器人多维力传感器标定 Kalman 滤波

许德章^{1, 2, 3} 葛运建^{1, 2} 高理富¹

(1. 中国科学院合肥智能机械研究所, 安徽 合肥 230031;

2. 中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026;

3. 安徽工程科技学院, 安徽 合肥 241000)

摘要: 在多维力传感器标定过程中, 往往出现比较大测量噪声, 零漂幅度较大, 严重地限制了多维力传感器标定精度。鉴于 Kalman 滤波器在滤除系统随机干扰噪声方面良好效果, 并考虑到在力传感器标定加载前, 噪声信号便于测量的特点。本文从单维力传感器入手, 把标定测量模型简化为一阶惯性和零阶保持器串联, 并把传感器的输入/输出分为有载荷作用和无载荷作用两个状态, 分别推导出输入/输出关系, 获得单维力传感器状态和测量方程, 并进一步推导出单维力传感器 Kalman 滤波算法。在合理假设基础上, 再使单维力传感器标定 Kalman 滤波算法推广到多维力传感器。标定实验表明, 在多维力传感器标定中, Kalman 滤波有效地滤除了测量噪声, 提高了标定精度。

关键词: 多维力传感器, 机器人, 标定, Kalman, 滤波

Kalman Filter for the Multi-Component Force/Moment Sensor of Robot Calibration

Xu DeZhang^{1, 2, 3} Ge Yun Jian^{1, 2} Gao lifu¹

(1. Institute of Intelligent Machines, Chinese Academy of Science 230031;

2. University of Science & Technology of China 230026; 3. AnHui University of Technology & Science 241000)

Abstract: During calibrating for multi-component force/moment sensors, there are often measure noises that exhibit more draft range. Because it is difficult to cancel the drifts by analog circuit filters, the drifts badly restrict calibration precision of multi-component force/moment sensor. According to Kalman filtering fine effect of canceling drift, and convenience for measuring easily noise signals of the multi-component force/moment sensor, the paper simplified the single-component force sensor into a system for a series connection with a class inertial device and zero-holder. After the input and output of the single-component force sensor is divided into two states with load and without load, then the input and output relation of the single-component force sensor is derived respectively, finally the state and measure equations are inferred. Based on reasonable hypothesis, Kalman filtering for single-component force sensor is applied to the multi-component sensor. The Calibration experiment showed that filtering algorithm is successful in canceling drift, and improving effectively the calibrating precision of multi-component force/moment sensor.

Keyword: multi-component force/moment sensor, robot, calibration, Kalman, filter.

当操作型机器人需要精确地控制操作接触力时, 一般选用六维腕力传感器。六维腕力传感器能同时提供三维空间全力信息, 即沿 X、Y、Z 三根轴线方向上的线性力 F_x 、 F_y 、 F_z 及绕 X、Y、Z 轴转动的力矩 M_x 、 M_y 、 M_z 。

六维腕力一般采用整体结构, 敏感元件选用电阻应变片^{[1][2]}。由于设计原理和制造加工等因素影响, 多维力传感器各输出通道之间存在相互耦合。这种耦合关系比较复杂, 难以从理论上进行精确描述, 通常采用实验方法标定, 以获得各测量方向间的

本文受国家自然科学基金项目“数字运动员仿真”(编号: 60343006)和安徽省自然科学基金“基于力学信息和数字运动员人体仿真的运动指导系统研究”(编号: 03042304)资助。

本文于 2004 年 11 月收到。许德章: 副教授; 葛运建: 研究员, 博导; 高理富: 副研究员。

耦合关系,并用一个矩阵描述,该矩阵称为耦合矩阵^[3]。多维力传感器有在线、和离线两种基本标定方法。离线标定方法是将传感器安放在标定实验台上进行精确标定,在传感器制造过程中或者在传感器使用一段时间后需要重新精确标定的情况下,一般选用离线标定方法。在线标定方法指不需要把传感器从机器人上卸下,让机器人抓取一个固定重量物体实施标定^[4]。很显然,离线标定的精度比在线高,但需要专用标定设备,一般说多维力传感器标定的都是离线标定^[5]。

在多维力传感器制造过程中,影响精度的环节很多。其中标定方法和耦合矩阵的确定对多维腕力传感器测量精度的影响至关重要。目前,国内尚无统一标准,国外也没有关于标定装置的设计资料更属于机密^{[6][7]}。国内只有为数不多的几家科研单位具备研制多维腕力传感器能力,如中国科学院合肥智能机械研究所(1989年在国内率先研制出第一个六维腕力传感器)、中国科学院沈阳自动化所、东南大学、哈尔滨工业大学、华中理工大学等^[8]。在多维力传感器标定方法的选择和耦合矩阵的确定方面,这些单位都有自己的处理方法。

多维力传感器一般选用电阻应变片作为敏感元件,组桥方式采用全桥,满量程输出一般仅有十几毫伏,后续电路需要放大近一千倍才能满足 A/D 转换接口电路输入电平的要求。由于放大电路和电阻应变片本身的热噪声和电磁噪声,往往出现比较大零点漂移,即传感器在没有加载时,各通道输出值不为零,且波动较大、没有明显规律。零漂的出现对传感器的标定精度影响比较大,甚至导致标定工作无法进行。关于多维力传感器标定过程中的零漂处理,仅有个别文献资料作了简单讨论,如 Lu Tien-Fu 提出采用神经网络方法消除三维力传感器标定过程的零漂^[1]。对于不同传感器标定,神经网络方法都需要大量样本供网络训练和学习,数据处理的工作量过于庞大、耗时太长,难以在实际标定过程中使用。我实验室(智能所机器人传感器实验室)目前处理方法是,重复测量多次,去除不正常奇异值,然后再求平均。很显然,这种处理方法比较粗糙,难以消除零漂的影响,特别是零漂的数学期望值非零。寻找合适方法消除噪声对多维力传感器标定精度的影响,提高标定精度一直是我室努力解决的问题。在多年

工程实践中,发现传感器标定过程中噪声信号统计规律不难获得,选用 Kalman 滤波计算量并不大,理论与工程实践表明去噪效果比较理想。

本文的内容安排是:第二部分简要地介绍一下多维力(以六维力传感器为例)标定原理;第三部分建立多维力传感器标定过程的动态数学模型,并推导出多维力传感器标定 Kalman 滤波算法;第四部分以我室为东北大学研制的某型六维力传感器为例,介绍 Kalman 滤波算法应用实例;第五部分为结论。

1 六维力传感器标定原理

机器人六维力传感器能同时测量空间笛卡尔三个坐标方向上的线性力与绕三个坐标轴的转矩,且弹性体一般设计成整体结构,以利于简化传感器结构和增强刚度。虽然通过弹性体结构巧妙设计和电阻应变片合理组桥,各输出方向间的耦合已很小,但难以彻底消除。这种耦合关系用矩阵 R 描述。

$$F_{6 \times 1} = R_{6 \times 6} \epsilon_{6 \times 1} \quad (1)$$

其中 F 为六维传感器测量的力信号。

$$F = [F_X, F_Y, F_Z, M_X, M_Y, M_Z]^T \quad (2)$$

$F_X, F_Y, F_Z; M_X, M_Y, M_Z$ 分别为沿坐标轴 X, Y, Z 的力与绕 X, Y, Z 的力矩。

$$\begin{aligned} \epsilon &= [\epsilon_X, \epsilon_Y, \epsilon_Z, \epsilon_{MX}, \epsilon_{MY}, \epsilon_{MZ}] \\ &= [\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3, \epsilon_4, \epsilon_5, \epsilon_6] \end{aligned} \quad (3)$$

$\epsilon_X, \epsilon_Y, \epsilon_Z; \epsilon_{MX}, \epsilon_{MY}, \epsilon_{MZ}$ 在坐标轴 X, Y, Z 方向上分力、与绕 X, Y, Z 轴分力矩作用下,弹性体分别产生的应变。

$$R = \begin{bmatrix} R_{11} & \cdots & R_{16} \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ R_{61} & \cdots & R_{66} \end{bmatrix} \quad (4)$$

六维力传感器标定目的是确定矩阵 R 中 36 个元数值 R_{ij} ,一般通过标定实验确定。由(1)可推导出:

$$\epsilon = R^{-1} F \quad (5)$$

各通导间耦合关系矩阵 R 也可以用图 1 表示,图 1 表明六维力传感器是一个多输入多输出系统,其中图 a 表示某一个方向载荷对其它方向应变的耦合关系,如 F_X 对 $\epsilon_2, \epsilon_3, \epsilon_4, \epsilon_5, \epsilon_6$ 耦合影响;图 b 表示其它方向载荷对某一方向应变的耦合关系,如 F_Y, F_Z, M_X, M_Y, M_Z 对 ϵ_1 的耦合影响。

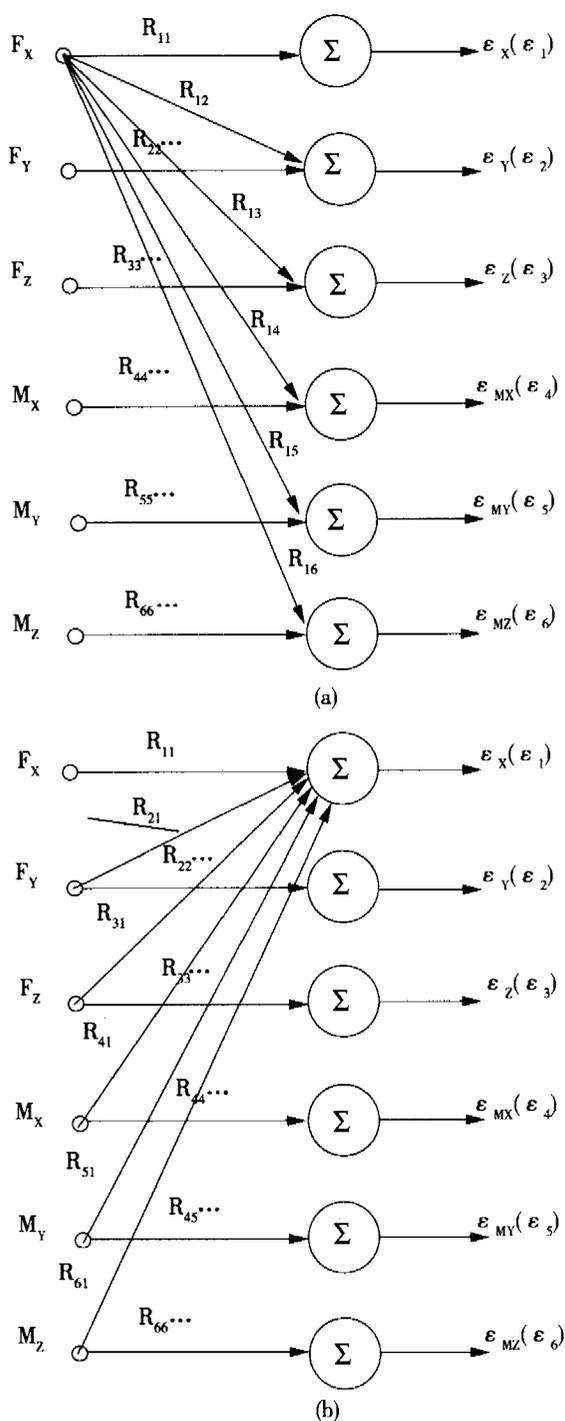


图 1 六维力传感器耦合映射关系

2 六维力传感器标定过程中 Kalman 滤波

2.1 Kalman 滤波简介

Kalman 滤波器主要是用条件期望和状态转移解决维纳所提出的滤波问题,它只需要知道有限时

间间隔内数据,就可以实现滤波计算。离散时间系统 Kalman 滤波的状态方程和量测方程如下^[6]:

$$X_{k+1} = \phi_k X_k + B_k U_k + Q_k \omega_k \quad (6)$$

$$Y_k = C_k X_k + \gamma_k \quad (7)$$

- 式中: X ——系统的状态;
- ϕ ——系统状态转移矩阵;
- B ——系统输入关系矩阵;
- U ——系统输入量;
- Q ——系统干扰关系矩阵;
- ω ——作用到系统中的随机干扰;
- Y ——系统输出;
- C ——输出与系统状态的关系矩阵;
- γ ——输出测量引入的随机干扰。

对于力传感器系统,可以认为随机干扰源是独立的高斯白噪声序列,即它们具有如下特性:

(1) 时间平均值为零

$$E\{\omega_k\} = 0, E\{\gamma_k\} = 0$$

$$\text{其中: } (k = 0, 1, \dots, N) \quad (8)$$

(2) 平均平方误差为一个常数:

$$E\{\omega_k \omega_k^T\} = \delta_\omega^2, E\{\gamma_k \gamma_k^T\} = \delta^2 \quad (k = 0, 1, \dots, N) \quad (9)$$

(3) ω_k 与 γ_j 相互独立,即: $E\{\omega_k \gamma_j\} = 0$

$$(k = 0, 1, \dots, N; j = 0, 1, \dots, N) \quad (10)$$

(4) 干扰源每次采样统计之间独立:

$$E\{\omega_k \omega_j\} = 0, E\{\gamma_k \gamma_j\} = 0 \quad k \neq j \quad (11)$$

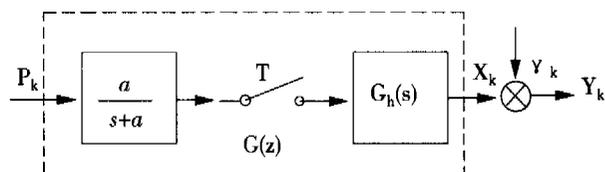


图 2 单维力传感器测试模型

2.2 单维力传感器动态测试模型

为了建立六维力传感器测试模型,建立 Kalman 滤波算法,先着重讨论单维力传感器测试模型,并推导出其 Kalman 滤波算法,再将单维讨论结果推广到六维。单维力传感器测试模型可以表述为图 2。其中 P_k 表示单维力传感器受到的载荷,当力传感器弹性体和放大电路等效简化为一阶惯性环节时,其传递函数为:

$$\frac{a}{s+a} = \frac{1}{\tau s + 1} \quad (12)$$

$$\text{其中: } \tau = \frac{1}{a} \quad (13)$$

τ 为低通滤波器惯性时间常数。

当力传感器输出的模拟信号经过 A/D 转换成数字量,其采样环节可以简化成零阶保持器,即:

$$G_h(s) = \frac{1 - e^{-sT}}{s} \quad (14)$$

传感器输出 X_k 再混合电路噪声信号 γ_k 构成总输出。对系统进行离散化,即对模拟环节取 z 变换得:

$$\begin{aligned} G(z) &= Z\left[\frac{a}{s+a} \cdot \frac{1 - e^{-Ts}}{s}\right] \\ &= (1 - z^{-1}) \cdot Z\left[\frac{a}{s(s+a)}\right] \\ &= \frac{(1 - e^{-aT}) \cdot Z^{-1}}{1 - e^{-aT} \cdot Z^{-1}} = \frac{A \cdot z^{-1}}{1 - e^{-aT} \cdot z^{-1}} \end{aligned} \quad (15)$$

其中:

$$A = 1 - e^{-aT} \quad (16)$$

T 为计算机采样时间间隔。由图 2 的测试模型得:

$$X(z) = G(z) \cdot P(z) = \frac{A \cdot z^{-1}}{1 - e^{-aT} z^{-1}} P(z) \quad (17)$$

则:

$$(1 - e^{-aT} z^{-1}) X(z) = A \cdot z^{-1} P(z) \quad (18)$$

对式(18)两边取 z 反变换,并考虑到传感器标定时,载荷 P 为标量,即 $P(z) = P_k$,得差分方程:

$$X_k = e^{-aT} \cdot X_{k-1} + A \cdot P_k \quad (19)$$

2.3 单维力传感器标定 Kalman 滤波算法

当力传感器在标定时,一般通过法码加固定载荷,其模型误差 $\omega_k = 0$,认为干扰噪声只来源于测量,由式(6)和(7)得:

$$X_{k+1} = \phi_k X_k + B_k U_k \quad (20)$$

$$Y_k = C_k X_k + \gamma_k \quad (21)$$

将式(19)与(20)相比较,并参照图 2,得单维力传感器标定过程中的状态方程和量测方程如下:

$$X_{k+1} = e^{-aT} X_k + A P_k \quad (22)$$

$$Y_k = X_k + \gamma_k \quad (23)$$

其中 $\phi_k = e^{-aT}$, $B_k = A$, $C_k = 1$ 。当观察(22)和(23)式输入作用情况时,将系统状态和量测划分成有法码作用和无法码作用两种情况的叠加,有:

$$X_{k+1} = X_{k+1}^P + X_{k+1}^N \quad (24)$$

$$Y_k = Y_k^P + Y_k^N \quad (25)$$

式中角标 P 表示载荷法码作用项, N 无载荷作用仅由噪声作用项。因此有:

$$Y_{k+1}^P = e^{-aT} X_k^P = A P_k \quad (26)$$

$$X_{k+1}^N = e^{-aT} X_k^N \quad (27)$$

$$T_k^P = X_k^P \quad (28)$$

$$Y_k^N = X_k^N + \gamma_k \quad (29)$$

对 X_{k+1}^N 进行估计,求得其估计值 \hat{X}_{k+1}^N 为:

$$\hat{X}_{k+1}^N = e^{-aT} \hat{X}_k^N + K_{k+1} (Y_{k+1}^N - e^{aT} \hat{X}_k^N) \quad (30)$$

式中 K_{k+1} 称为增益,它反映了对预测经过量测后的修正量。将式(25)代入式(30)消去 Y_{k+1}^N 有:

$$\hat{X}_{k+1}^N = e^{aT} \hat{X}_k^N + K_{k+1} (Y_{k+1} - Y_{k+1}^P - e^{-aT} \hat{X}_k^N) \quad (31)$$

由式(26)和(28)得:

$$Y_{k+1}^P = X_{k+1}^P = e^{aT} X_k^P + A P_k \quad (32)$$

将式(32)代入式(31)消去 Y_{k+1}^P 项有:

$$\begin{aligned} \hat{X}_{k+1}^N &= \\ &e^{-aT} \hat{X}_k^N + K_{k+1} Y_{k+1} - K_{k+1} A P_k - K_{k+1} e^{aT} \hat{X}_k^N \end{aligned} \quad (33)$$

利用式(24)的关系,将式(26)的估值与式(33)相加后有:

$$\hat{X}_{k+1} = (1 - K_{k+1}) (e^{-aT} \hat{X}_k + A P_k) + K_{k+1} Y_k \quad (34)$$

进一步根据 Kalman 滤波器理论导出一组含未知数 K_{k+1} 在内的递推求解关系为^[9]:

$$K_{k+1} = \frac{M_{k+1}}{M_{k+1} + \delta^2} \quad (35)$$

式中 M_{k+1} 代表 k 时刻预估 $k+1$ 时刻状态的条件方差,且有:

$$M_{k+1} = E\{(X_{k+1} - E\{X_{k+1}\})/Y_k\} \quad (36)$$

当传感器在标定过程中,数据采样周期 T 可以设得足够长,如取 $T=2s$;当传感器弹性体一阶固有频率 f 足够高,如 $f=100Hz$,即式(13)中 $a \approx f=100$ 。则:

$$e^{-aT} \approx 0 \quad (37)$$

$$A = 1 - e^{-aT} \approx 1 \quad (38)$$

将式(37)和(38)代入(34)式得:

$$\hat{X}_{k+1} = (1 - K_{k+1}) \cdot P_k + K_{k+1} Y_k \quad (39)$$

其中 δ 为统计噪声信号,当传感器处于空载时 ($P_k=0$),系统所测信号仅为噪声信号,可进行噪声统计求出 δ 。在对传感器作标定之前,因尚未对状态进行估计,因此 $\hat{X}_{-1}=0$,在开始时刻,由式(39)得: $\hat{X}_0 = K_0 Y_0$,再由(36)式 M_{k+1} 定义得:

$$M_0 = E\{(X_0 - E\{X_0/Y_{-1}\})^2\} = E\{X_0^2\} \quad (40)$$

式(40)即为卡尔曼滤波器的初始条件。一旦初始条件确定之后,即可用式(35)、(36)与(39)递推计算,实现单维力传感器标定过程中的 Kalman 滤波。

2.4 六维力传感器标定 Kalman 滤波

假设 1:在工作量程范围内,六维力传感器弹性体

内的应力在屈服极限内,且应变与应力呈线性关系。

假设 2:在工作量程范围内,耦合关系矩阵 R 内元数 R_{ij} 为常数,即各通导间耦合关系恒定,即意味耦合关系矩阵 R 内各元素 R_{ij} 相互独立。

工程实践表明,在传感器设计精度范围内,上述两个假设一般都能得到满足,这是六维力传感器设计、标定、与使用的基本依据。在上述假设基础上,六维力传感器可以简化为 36 个相互独立的单维传感器,即耦合矩阵 R 中的元素 R_{ij} 相当于 36 单维力传感器刚度。由图 1 中 a 可知,当在某一坐标方向加标定载荷,其它方向不加载荷时,可求出 R_{ij} 中 6 个元素值,如令 $F_x = 50\text{kg}, F_y = 0, F_z = 0, M_x = 0, M_y = 0, M_z = 0$,可等效求出 6 个单维力传感器的刚度 $R_{11} \sim R_{16}$ 。因此,上述关于单维力传感器标定的 Kalman 滤波算法可以推广到六维力传感器。

3 六维力传感器标定 Kalman 滤波实例

下面以我室为东北大学研制的某型六维力传感器为例,介绍 Kalman 滤波算法实际应用结果,应用过程如下:

把六维力传感器放置在标定台上,使其处于标定状态,取采样周期 $T = 2\text{s}$,读 100 组数据,分别求出 X、Y、Z、 M_x 、 M_y 、 M_z 坐标方向上噪声的方差 $\delta_x^2, \delta_y^2, \delta_z^2, \delta_{Mx}^2,$

$\delta_{My}^2, \delta_{Mz}^2$,如求出 $\delta_z^2 = 0.7675$ (单位:A/D 采样值)。

在某一坐标方向上加载,如 $F_x = 0, F_y = 0, F_z = 50\text{kg}, M_x = 0, M_y = 0, M_z = 0$,分别采用 Kalman 算法求出六个坐标方向信号的滤波值 $S_{31} \sim S_{36}$ (S_{ij} 中的角标 i 代表加载方向, $i = 1, \dots, 6$ 依次表示 X、Y、Z、 M_x 、 M_y 、 M_z 坐标方向加载; j 表示标定时信号输出通道, $j = 1, \dots, 6$ 依次表示 X、Y、Z、 M_x 、 M_y 、 M_z 坐标方向信号输出)。采样周期 $T = 2\text{s}$,连续读 50 组数据作为滤波采样值, S_{33} 滤波前后数据列于表 1。图 3 是 S_{33} 滤波前后对照曲线(其它滤波结果和对照曲线省略)。从 S_{33} 滤波前后数据和对照曲线可以清楚看出, S_{33} 的零漂噪声很好地得到抑制。

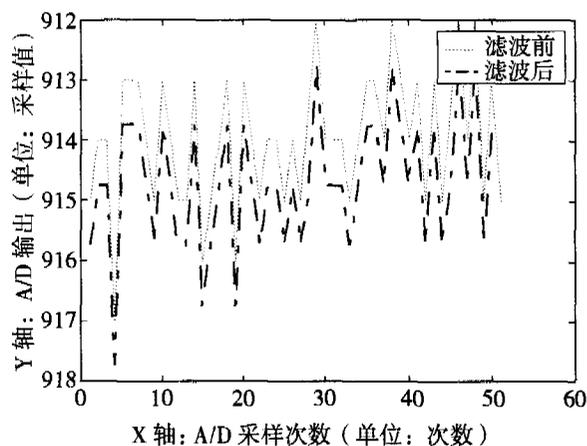


图 3 S_{33} 滤波前后对照曲线

表 1 S_{33} 滤波前后数据(单位:A/D 采样值)

序号 k	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
滤波前	-915	-914	-914	-917	-913	-913	-913	-914	-915	-913
滤波后	-915.75	-914.75	-914.75	-917.75	-913.75	-913.75	-913.75	-914.75	-915.75	-913.75
序号 k	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
滤波前	-914	-915	-915	-913	-916	-915	-914	-913	-916	-913
滤波后	-914.75	-915.75	-915.75	-913.75	-916.75	-915.75	-914.75	-913.75	-916.75	-913.75
序号 k	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
滤波前	-914	-915	-914	-914	-915	-914	-915	-914	-912	-914
滤波后	-914.75	-915.75	-914.75	-914.75	-915.75	-914.75	-915.75	-914.75	-912.75	-914.75
序号 k	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
滤波前	-914	-914	-915	-914	-913	-913	-914	-912	-913	-914
滤波后	-914.75	-914.75	-915.75	-914.75	-913.75	-913.75	-914.75	-912.75	-913.75	-914.75
序号 k	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
滤波前	-913	-915	-913	-915	-914	-912	-914	-912	-915	-913
滤波后	-913.75	-915.75	-913.75	-915.75	-914.75	-912.75	-914.75	-912.75	-915.75	-913.75

4 结 论

Kalman 滤波器在滤除系统随机干扰噪声方面有很好的效果,有十分重要的实际工程应用价值,但限制其应用的主要技术障碍在于:一是计算量比较大;二是噪声信号的测量与统计。本文针对多维力传感器标定数据可以离线处理;标定加载前系统便于测量噪声信号的特点。利用 Kalman 滤波器很好地滤除了测量噪声,并将单维力传感器的测量模型成功地推广到多维力传感器。多维力传感器标定过程中的 Kalman 滤波方法,为解决多维力传感器标定过程中测量噪声干扰,提高多维力传感器标定精度提供了有力工具。

参考文献:

- [1] Lu Tien - Fu, Lin Grier C. I., and He Juan R., Neural - Network - Based 3D Force/Torque Sensor Calibration for Robot Applications, Engineering Applications of Artificial Intelligence Vol. 10, Issue 1, Feb., 1997, 87 - 97.
- [2] Kim J. H., Kang D. I., Shin H. H., and Park Y. K., Design and analysis of a column type multi - component force/moment sensor, Measurement, Vol. 33, Issue 3, April, 2003, 213 - 219.
- [3] 陈雄标,袁哲俊,姚英学,机器人用六维腕力传感器标定研究,机器人,1997.1, Vol. 19, No. 1, 7 - 11.

- [4] Aghili F., On - orbit calibration of the SPDM force - moment sensor, in proc. IEEE int conf. Robotics and Automation, Vol. 4, 24 - 28 April, 2000, 3603 - 3608.
- [5] Tommy C. P. Lo, Philip C. H. Chan, Design and Calibration of A 3 - D Micro - Strain Gauge for In Situ on Chip Stress Measurements, IEEE, ICSE'96 Proc., 1996, 252 - 255.
- [6] 王国泰,葛运建,朱永亮,六维力/力矩传感器性能和使用的有关问题,智能机器人传感器实验室学术年报, 1993.12, No. 1, 18 - 20.
- [7] 刘正士,机械人多维腕力传感器静、动特性若干基本问题的研究,1996.7,博士学位论文,92.
- [8] 葛运建,孙怡宁,陈茅等,多维力传感器研究现状和我们的任务,智能机器人传感器实验室学术年报, 1993.12, No. 1, 1 - 3.
- [9] 王永初,最佳控制系统设计基础,科学技术出版社,北京,1980.

作者简介:



许德章:男,1964 年出生,于 1995 年 5 月在东南大学取得机械学硕士学位,1999 年晋升为副教授。现为中国科学技术大学在职博士研究生,中国仪器仪表学会传感器分会第三届理事会理事,在中国科学院合肥智能机械研究所从事信号获取科学和技术应用研究。截止目前为止,在国内外学术刊物上发表论文近 20 篇,其中被 EI 收录 2 篇,被 SCI 收录 1 篇;主持或参加各类研究项目 5 项,取得省级科技成果 2 项,获得发明、实用新型、外观专利各一项。