机器人用六维腕力传感器标定研究

陈雄标 袁哲俊 姚英学 (哈尔海T # 大学 150001)

摘 要 本文在基于获得最高标定精度的基础上, 推导出标定力的选取原则; 同时提出了传感器 相对干扰矩阵的新概念, 在此基础上, 建立了一套传感器标定的实验系统, 并对笔者研制的六维腕力 传感器进行了标定.

关键词 六维腕力传感器,标定,系统误差,干扰矩阵

1 引言

六维腕力传感器是当今智能机器人的重要传感器之一.将它安装在机器人操作手腕部,用 来检测机器人操作手与外部环境相互接触或抓放工件时所承受力的大小和方向,为机器人控 制提供力感信息.六维腕力传感器由于设计原理和制造加工误差等因素的影响,使得传感器各 输出通道之间具有相互耦合.这种相互耦合的关系比较复杂,难以从理论上进行精确的描述, 通常采用实验的方法来进行标定.其标定精度将直接影响传感器使用时的测量精度.

六维腕力传感器的标定均是基于假设传感器系统模型为线性系统下进行的,即:

(1)

其中 $V = R^6$ 为传感器各通道的输出; $F = R^6$ 为作用在传感器上力和力矩; $A = R^{6\times 6}$ 为常数矩阵, 其元素由传感器所决定.

 $V = A \times F$

传感器标定的实质是根据已知加载在传感器上的力 *F*(谓之为标定力)和传感器各通道的 输出测量值 *V*,由式(1)求解标出矩阵 *A*.以往传感器的标定通常是选取6个线性无关的力向 量组成标定力,显然为获取最高的标定精度,任意选取线性无关的标定力矩阵并一定是最优 的.另外,当标定力包含的力向量的维数 *n* 大于6时,标定具有冗余的观测.冗余观测对于标定 精度的影响如何? 也是传感器标定研究有待解决的问题.

本文在基于获得最高标定精度的基础上,推导出标定力的选取原则;同时建立了一套传感器标定的实验系统,并对该系统所引起的标定系统误差进行了分析.本文还提出了传感器相对 干扰矩阵的新概念,其可直接作为传感器设计制造好坏的评价准则,同时又为传感器的解耦提 供了依据.在此基础上,开发一套传感器自动标定的软件.最后对笔者研制的六维腕力传感器 进行了标定.

2 六维腕力传感器标定精度分析及最佳标定力的选取原则

假设作用在传感器的力向量 $F_{i=} [F_{i1}F_{i2}...F_{i6}]^{T}$, *i* <u>n</u>, 测量出各通道的输出为 $V_{i=} [V_{i1}V_{i2} ...V_{i6}]^{T}$, *i* <u>6</u>, 由式(1) 可得关于矩阵 *A* 的第*j* 行元素的线性方程组(*j* <u>6</u>):

$$V_{1j} = F_{11}a_{j1} + F_{12}a_{j2} + \dots + F_{16}a_{j6}$$
$$V_{2j} = F_{21}a_{j1} + F_{22}a_{j2} + \dots + F_{26}a_{j6}$$

(4)

$$V_{ij} = F_{n1}a_{j1} + F_{n2}a_{j2} + \ldots + F_{n6}a_{j6}$$
(2)

亦即

$$V^{j} = F a^{j} \qquad j \quad \underline{6} \tag{3}$$

传感器标定根据标定力向量数目 *n* 是等于 6 还是大于 6, 可分为两种情形. 下面分别进行 讨论.

情形 1:

标定力向量的数目 n = 6, 且 $F_i(i = n)$ 线性无关, 方程式(3) 具有唯一解, 其解为

$$a_j = F^{-1}V_j \qquad j \qquad 6$$

根据数值分析,上述求解的误差传播可表示为

$$\epsilon_a = (\epsilon_V + \epsilon_F) K(F)$$

其中 $\epsilon_{i} = \delta_{a_{i}}$ / a_{i} , $\epsilon_{i} = \delta_{V_{i}}$ / V_{i} , $\epsilon_{i} = \delta_{F}$ / F 分别为传感器标定的相对 误差, V_{i} 的测量相对误差和标定力的相对误差; K(F) 为误差传播因子, 其存在上界:

$$K(F) = \frac{\operatorname{cond}(F)}{1 - \operatorname{cond}(F)\epsilon}$$
(6)

其中 cond(F) 为矩阵 F 的条件数,且由范数理论有: cond(F) 1.

从误差传播式(5)中可以看到, 传感器的标定误差完全由(e + e)项和K(F)项所决定. 其 中(e + e)项由传感器各通道输出的测量精度和标定力的精度所决定. 因此提高测量精度和 标定力的精度, 对于提高传感器的标定精度具有重要的意义. 通过降低误差传播因子K(F)亦 是提高标定精度的有效途径. 从(6)式可以看到: 传播因子K(F)的上边界是关于矩阵F的条 件数的单调非减函数, 因此通过适当选取力矩阵F, 降低矩阵F的条件数 cond(F), 可以使得 传播因子的上边界达到最小. 当(e + e)一定时, 获得误差传播最小, 实现传感器的最高标定 精度.

根据范数理论, 当矩阵 F 为正交矩阵时, 其条件数最小等于 1. 因此最优标定力的选取原则就是使得标定力矩阵为一正交矩阵.

情形 2:

标 定力向量的数目 n > 6, 方程式(3) 无唯一解, 而只有近似解. 由(3) 式两边同乘以矩阵 F^{T} , 当矩阵($F^{T}F$)⁻¹为满秩时, 其逆矩阵存在, 则可得

$$a_{j} = (F^{T}F)^{-1}F^{T}U_{j} \qquad j \qquad 6$$
(7)

可以证明,上式解为方程式(3)的最小二乘解.其可解的误差传播可表示为

$$\boldsymbol{\epsilon}_{a} = (\boldsymbol{\epsilon}_{FF} + \boldsymbol{\epsilon}_{FV}) K (FF) \tag{8}$$

将 EFF, EFV 重新整理可得

$$\epsilon_{FF} = \frac{(F^{\mathrm{T}} + \delta F^{\mathrm{T}})(F + \delta F) - F^{\mathrm{T}}F}{F^{\mathrm{T}}F} = 2\epsilon_{F}$$
(9)

$$\epsilon_{FV} = \frac{(F^{\mathrm{T}} + \delta F^{\mathrm{T}})(V + \delta V) - F^{\mathrm{T}}V}{F^{\mathrm{T}}V} - \frac{F^{\mathrm{T}}V}{F^{\mathrm{T}}V}(\epsilon_{F} + \epsilon_{V})$$
(10)

为了求出(10)式中的上边界,不妨假定向量与矩阵的范数分别为向量和矩阵的 2-范数. 根据向量 2-范数的性质,可有

$$\frac{F^{\mathrm{T}}V^{2}}{V^{2}} = \frac{V^{\mathrm{T}}(FF^{\mathrm{T}})V}{V^{\mathrm{T}}V} = R_{FF^{\mathrm{T}}}(V) > \delta_{\min}^{2} = \left(\frac{1}{(F^{\mathrm{T}})^{+}}\right)^{2}$$
(11)

其中 $R_{FF^{T}}(V)$ 为矩阵 (FF^{T}) 的瑞利商; δ_{min} 为矩阵 FF^{T} 的最小正奇值; $(F^{T})^{*}$ 为矩阵 F^{T} 的伪逆 矩阵.

引入长方矩阵的条件数,定义为

 $\operatorname{cond} (F^{\mathrm{T}}) \qquad F \qquad F^{+} = \operatorname{cond}(F) \tag{12}$

则(10) 式变换为

$$\epsilon_{FV} \quad \operatorname{cond}(F)(\epsilon_F + \epsilon_V) \tag{13}$$

最后由(9)式和(13)式,误差传播式(8)可表示为

$$\epsilon_{a} \{ [2 + \operatorname{cond}(F)] \notin + \operatorname{cond}(F) \notin \} K(F^{T}F)$$

其中 $K(F^{T}F) = \frac{[\operatorname{cond}(F)]^{2}}{1 - 2[\operatorname{cond}(F)]^{2}} [\operatorname{cond}(F)]^{2} :$ 当 F 为次正交矩阵, 亦即

$$F^{\mathrm{T}}F = 1 \tag{15}$$

矩阵 F 具有最小条件数(等于 1). 由(14) 式, 当 e, e 一定时, 此时传感器具有最小误差传播, 亦即获得最高传感器标定精度. 最小的传播误差为

$$\epsilon_a = 3\epsilon_F + \epsilon_V \tag{16}$$

从上式可以看到,当标定力向量数目 n> 6时,标定力矩阵的相对误差在标定误差中被放 大,因此从获得最小标定误差的角度来考虑,传感器的标定力向量数目不宜采用大于 6 的值. 但在实际传感器标定时,由于各通道输出的测量存在随机误差,为减少随机误差的影响,则往 往采用标定力向量的数目大于 6.

3 六维腕力传感器标定实验系统

3.1 传感器标定实验系统组成

六维腕力传感器标定实验系统如 图 1 所示,它主要由加载定度台,数据 采集系统以及微型计算机等几个部分 组成.



图1 六维腕力传感器标定实验系统组成

(1) 加载定度台. 加载定度台用于

安装被标定的传感器,并按标定要求对传感器进行加载.其有采用专用的加载定度台;也有将 传感器直接安装在机器人操作手腕部,驱动操作手在不同的位置,以获得不同方向的力和力矩 的加载.

(2)数据采集系统.数据采集系统用以对传感器各通道数据进行采集和处理,然后再将测 量数据通过并行口传输给微型计算机.在微型计算机上进行相应的数据处理,求出标定矩阵.

3.2 标定实验系统的系统误差分析

在传感器精度分析中可知, 传感器标定系统误差在很大程度上取决于标定系统的测量误 差和标定力加载定度误差. 标定系统的测量精度主要源自于数据采集系统的信号检测和放大 电路的漂移, 以及各种干扰所引起的误差. 标定力加载定度误差可分为标定力绝对值的偏差和 加载力位置的偏差,本节着重的分析在加载定度台中由于加载力位置的偏差所引起标定力的 系统偏差. 至于由于加载重量的不精确所引起标定力绝对值的偏差, 在以后分析中将可以看 到, 当选取标定传感器的相对干扰的大小时可以消除其影响, 加载定度台中加载力位置的偏差

(14)

可分为两种情况. 下面分别讨论此两种情况下所引起标定的系统误差.

3.2.1 力作用点偏差所引起系统误差



力作用点位置的偏 差将会引起附加力矩作 用在传感器上.以加载 F_{y} 为例,如图 2(a).假设 作用力点在 Z 方向偏离 了 Δl ,则将会产生一个 X 方向的附加力矩,在图 示力方向下,该力矩 $M^{\frac{1}{2}}$ 为 $M^{\frac{1}{2}} = -F \times \Delta l$,则引

起的系统相对误差为

$$\epsilon_F = \delta F / F = \frac{F_{ymax}}{M_{ymax}} \Delta l$$

(17)

其中 F_{ymax} , M_{xmax} 分别为传感器在Y力方向和X力矩方向的额定最大测量值.

3.2.2 力作用线偏差所引起的系统误差

力作用线偏离将会引起附加力和附加力矩产生. 仍以加载 F_Y 为例, 如图 2(b). 假设力作 线与 Y 轴成一夹角 $\Delta \alpha$, 则将会产生 Z 方向附加力为 $F \sin(\Delta \alpha)$ 和 X 方向上的附加力矩为 FD $\sin(\Delta \alpha)/2$, 其引起的系统相对误差为

$$\epsilon_{F} = \frac{\delta F}{F} = \sin(\Delta \alpha) \left(\frac{F_{\text{ymax}}}{F_{z \text{max}}} \right)^{2} + \left(\frac{F_{\text{ymax}}D}{2M_{\text{xmax}}} \right)^{2}$$
(18)

4 六维腕力传感器自动标定的实现及其标定结果

4.1 传感器相对干扰矩阵

在(1)式中所建立起的矩阵 *A* 反映的是传感器各通道的灵敏度以及通道相互干扰绝对值 大小.为了衡量相互干扰的的相对值,本节提出六维腕力传感器相对干扰矩阵 *C*,其元素 *C*^{ij}定 义如下:

$$C_{ij} = a_{ij}/a_{ii} \qquad j \qquad 6i \qquad 6 \tag{19}$$

其中aij为矩阵A的各元素.

在传感器标定精度分析中可知: 当标定力矩阵为正交矩阵, 可获得最高标定精度. 同时兼顾加载的方便性, 标定力矩阵不妨设计为对角矩阵. 即

$$F = \operatorname{diag}(F_1 F_2 \dots F_6) \tag{20}$$

则由(19)式和(20)式,可得

$$C_{ij} = (V_{ji}/F_i) / (V_{ii}/F_i) = V_{ji}/V_{ii}$$
(21)

其中Vij表示第 j 次加载第 i 通道的输出.

很明显, 矩阵 *C* 的主对角线均为 1, 其余元素 *Cii*为第 *i* 路单位力或力矩所引起的第 *j* 通道输出相对第 *i* 通道输出的大小. 因此传感器相对干扰矩阵可直接作为传感器设计制造好坏的 评价准则, 同时又为传感器的解耦提供了依据. 传感器标定的最终结果亦就是标定出该矩阵.

另外以(21)式可以看到:传感器相对干扰矩阵的标定,其值可以不受标定力值的影响.

4.2 传感器标定软件

传感器标定时,测量系统将测得的各通道输出的数据通过并行口传输给微型计算机,微型 计算机在接受完一次数据后进行处理.当处理完毕后,提醒标定操作员进行下一次加载,当最 后加载全部完毕后,求出传感器的相对干扰矩阵,同时并求出其逆阵.该标定软件框图在此省 略.

4.3 传感器标定结果

采用本文介绍的标定方法,对笔者研制的六维腕力传感器进行标定,所得的相对干扰矩阵 如下:

	1	0.032	0.038	- 0.030	0.021	0.026
<i>C</i> =	- 0.025	1	0.026	- 0.026	0.010	0. 020
	0.037	- 0.015	1	- 0.048	0.037	0.014
	- 0.010	- 0.020	0.030	1	0.048	0. 029
	0.043	- 0. 021	- 0.021	0. 010	1	- 0.010
	0.016	- 0.027	0.013	0. 038	0.025	1]

5 结论

本文在基于获得最高标定精度的基础上,提出标定力的选取原则为:

- (1) 当标定力向量的数目等于6时,标定力矩阵应为正交矩阵;
- (2) 当标定力向量的数目大于6时,标定力矩阵应为次正交矩阵.

同时,建立了一套传感器标定的实验系统,并对该系统所引起标定的系统误差进行了分析.还提出了传感器对干扰矩阵的新概念.在此基础上,开发一套传感器自动标定的软件,对笔者研制的六维腕力传感器进行了标定.

参考文 献

- 1 Ricciardi G, Borsati L. Six Axis of Sensitivity Force Sensors for Robots. Annuals of the CIRP, 1993, 42
- 2 Tsuneo Yoshikawa et al. A Six-Axis Force Sensor with Three-Dimensional Cross-Shape Structure. IEEE Conf, on Robotics and Automation, 1989
- 3 Koll E et al. Decoupling Load Components and Improving Robot Interfacing with an Easy to-use 6-Axis Force Sensor. Theory of Maching Mechanisms, Proc of 7th World Congress, 1986
- 4 Uchiyama M, Hakomori K. A Few Considerations on Structural Design of Force Sensors. Proc 3rd Annual Conference on Japanese Robotics Society, 1985
- 5 储钟武等编译. 数值分析. 黑龙江科学技术出版社, 1987
- 6 杨克勋, 包学游编. 矩阵分析. 哈尔滨工业大学出版社, 1988

STUDY ON CALIBRATION OF 6-AXIS WRIST FORCE SENSORS FOR ROBOT

CHEN Xiongbiao YUAN Zhejun YAO Yingxue

(Harbin Institute of Technology 150001)

Abstract In order to obtain the highest accuracy of calibration, this paper deduces the criterion of selecting calibration force and proposes the new concept of relative interference matrix of sensors. An experimental system for calibrating sensors is discussed and the sensor which was designed and manufactured by the authors is calibrated.

Key words 6-axis wrist force sensor, calibration, system error, interference matrix

作者简介

陈雄标:研究领域:机器人、传感器等.

(上接第6页)

DESIGN AND IMPLEMENTATION OF THE ACCURACY ASSEMBLY ROBOT CONTROLLER

WANG Yuechao WANG Chang TAN Dalong

(Sheny ang Institute of Automation, Robotics Laboratory, The Chinese Academy of Sciences 110015)

Abstract Under the support of the National High Technology R&D Program, a high performance assembly robot named Accuracy I has been developed. The Accuracy I robot is of the SCARA configuration with 4 joints. It uses direct drive technology and has vision and force sensors. This paper presents the controller of Accuracy I robot, including the hardware and software architecture, the functions and the features.

Key words Robot controller, assembly robot, robot language

作者简介

王越超: 男,36,研究员.研究领域: 机器人学.
王 祖: 男,26,助理研究员.研究领域: 机器人控制.
谈大龙: 男,56,研究员.研究领域: 机器人学.