

空间大型机械臂末端 12 维传感器设计及应用

倪风雷, 邹 添, 孙永军, 刘 宏, 李 奎

(哈尔滨工业大学机器人技术与系统国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘 要: 针对空间大型机械臂, 设计了 12 维传感器, 在 6 维力/力矩传感器基础上一体化设计了 6 维加速度传感器, 并集成了基于 FPGA (现场可编程门阵列) 的高速多通道数据采集系统. 采用最小二乘法和静、动态标定方式对力矩和加速度传感器分别进行了标定. 设计的传感器具有维间耦合小、集成度高、易于安装、可靠性高等优点. 最后, 将设计的 12 维传感器安装在大型机械臂末端, 进行了残余振动抑制试验. 实验结果表明, 利用此 12 维传感器的加速度信息, 可有效地补偿惯性力、抑制机械臂末端的残余振动, 设计的传感器合理可行.

关键词: 空间机械臂; 12 维传感器; 标定; 加速度控制

中图分类号: TP212, TN247

文献标识码: A

文章编号: 1002-0446(2017)-03-0257-08

Design and Application of a 12-DOF Sensor on the End of Large Space Manipulator

NI Fenglei, ZOU Tian, SUN Yongjun, LIU Hong, LI Kui

(State Key Laboratory of Robotics and System, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: For the large-scale space manipulator, a 12-DOF (degree of freedom) sensor is designed, which consists of a 6-dimensional acceleration sensor and a 6-dimensional force/torque sensor. The high-speed multi-channel data acquisition system based on FPGA (field-programmable gate array) is integrated. The least squares method and the static and dynamic calibration method are adopted to calibrate torque and acceleration sensors respectively. The designed sensors have the advantages of small dimension coupling, high integration, easy assembly and high reliability. Finally, the 12-DOF sensor is installed on the end of a large-scale manipulator, and the residual vibration suppression experiment is carried out. The experimental results show that the inertia force is compensated and the residual vibration of the manipulator is restrained effectively according to the acceleration information from the designed 12-DOF sensor. The designed sensor is reasonable and feasible.

Keywords: space manipulator; 12-DOF sensor; calibration; acceleration control

1 引言 (Introduction)

空间站建设和在轨服务迫切需要空间大型机械臂进行在轨服务. 然而由于空间大型机械臂关节柔性大、臂杆长、负载惯量大、基座飘浮等特点, 必然会降低系统带宽, 使机械臂末端存在较大的残余振动, 影响系统的鲁棒性, 降低机械臂的工作效率^[1-3]. 例如, 航天飞机远程机械臂系统 (SRMS) 的一个突出问题是机械臂操作过程中大约有 1/3 的时间等待振动停止. 因此, 需要采取措施抑制机械臂的残余振动. 目前, 抑制残余振动的方法主要可分为被动控制方法和主动控制方法. 被动控制方法是通过选用各种耗能或储能材料, 以及优化机械结构设计, 达到降低柔性系统弹性变形的目的^[4]. 主动控制方法主要是设计控制器抑制机械臂残余振

动, 如输入整形^[5-6]、轨迹规划^[7]以及逆动力学^[8]等方法. 然而输入整形方法是一种前馈控制方法, 存在调节时间长、抗干扰能力差的缺点; 轨迹规划方法需要离线编程规划轨迹, 在线应用较难; 而动力学等方法需要准确的机械臂动力学模型, 才能使机器人很好地跟踪输入的期望轨迹, 然而由于空间环境恶劣, 准确的动力学模型很难建立. 加速度反馈控制 (controller with acceleration feedback, AFC) 技术^[9]在 20 世纪 80 年代初就被提出, 但是受限于加速度传感技术的发展, 一般的加速度信号都是通过位置传感器信息的 2 次微分得到, 噪声较大, 在实际机械臂系统中很难应用.

为提高机械臂操作性能, 国内外的学者开展了 12 维传感器技术的研究. 如 Kubus 等人^[10]研究了基于 12 维力和加速度信息融合的传感器, 进行末

端操作器与载荷或环境之间接触力的辨识，加速度信息可用于惯性力补偿。Garcia 等人^[11]在 ABB 机器人末端安装了腕力传感器和加速度计组成 12 维传感器，并结合关节编码器的信息，提出了一种基于卡尔曼状态估计的运动控制策略，通过准确获取笛卡儿坐标系下的真实接触力来提高机械臂的运动控制性能，Winkler 和 Suchy^[12]提出了使用 12 维传感器测量并补偿目标运动过程中的动态力，并在机器人末端安装了 JR3 公司的 12 自由度力传感器进行了实验。Garcia 和 Robertsson 又研究了带有加速度闭环的阻抗控制策略，提出了一种基于观测的力和加速度信息融合模型，并在安装有 ATI 力/力矩传感器、线加速度计和陀螺仪的 Staubli RX60 工业机械臂上进行了实验^[13]，通过实验证明了在接触力的过渡中，使用力和加速度融合的信息可以使机器人更好地适应非确定模型和未知环境，提高了机器人的智能化水平。国内合肥自动化研究所的孟明等人曾提出了一种 12 维力/力矩传感器^[14]，其实现方法是将一种基于双环状膜结构的 6 维加速度传感器整合到一个 6 维腕力传感器之中，且 2 个传感器具有相同的坐标系。通过 6 维加速度传感器的反馈补偿，可以从 6 维腕力传感器信息中分离得到末端操作器在运动过程与外界环境之间的真实接触力。哈尔滨工业大学邹添等人设计了 6 维加速度传感器^[15]，具有精度高、体积小等特点。

然而 12 维传感器因其结构复杂，标定和解耦困难，在空间机械臂中应用较少。针对哈尔滨工业大学研制的空间大型机械臂，本文设计了一种新的 12 维传感器，感知机械臂末端 6 维力/力矩和加速度等信息，提高空间机械臂的操作能力。传感器设计考虑如下因素：

- 1) 综合考虑系统集成性：既要限制传感器的尺寸和质量，又要保证传感器的测量范围；
- 2) 集成化设计思想：将传感器的电气系统和机械结构一体化、微型化设计，改进信号处理方法；
- 3) 数据处理融合简单方便设计：优化传感器结构设计，使维间耦合小，数据处理方便，计算量小。

2 12 维传感器系统 (12-DOF sensor system)

2.1 传感器总体设计

本文研制的 12 维传感器将用于空间机械臂，主要由 4 部分组成：6 维加速度测量模块、6 维力/力矩测量模块、传感器信号采集电路板模块以

及传感器的连接外壳，3 维爆炸模型和实物照片如图 1 所示。



图 1 12 维传感器系统原理图及实物照片
Fig.1 System diagram and photo of 12-DOF sensor

力/力矩测量模块的弹性体固定在传感器的外壳上。为减小空间，提高传感器的集成度，在力/力矩测量模块弹性体的内壁上集成加速度测量模块，两者的坐标系都位于圆柱几何中心位置，坐标系轴和圆柱轴线重合，2 个模块之间没有耦合。传感器信号采集电路板模块位于传感器外侧，就近实现传感器的数字化，提高系统的抗干扰能力。传感器的外壳一方面实现传感器的固定，另一方面实现与机械臂的接口功能。设计的力/力矩模块弹性体结构尺寸为 $\Phi 224\text{ mm}\times 117\text{ mm}$ ，加速度模块结构尺寸为 $\Phi 68\text{ mm}\times 20\text{ mm}$ ，具体的参数性能指标如表 1 所示。

表 1 传感器的主要参数
Tab.1 Main parameters of the sensor

技术指标	测量范围	测量误差
力	$\pm 500\text{ N}$	$\pm 0.015\text{ N}$
力矩	$\pm 100\text{ N}\cdot\text{m}$	$\pm 0.003\text{ N}\cdot\text{m}$
线加速度	$\pm 2\text{ g}$	0.002 g
角加速度	$\pm 10\text{ rad/s}^2$	$\pm 0.01\text{ rad/s}^2$
采样周期	2 ms	$\pm 0.1\text{ ms}$

2.2 6 维力/力矩测量模块

6 维力/力矩的测量是基于电阻应变式原理，设计的弹性体结构如图 2 所示，其主要由内环 (C)、内梁 (F)、外梁 (B)、过载保护梁 (D)、连接板 (E) 和电阻应变片 (A) 等组成。

弹性体内梁和过载保护梁沿内环外壁均匀交错布置，外梁在内梁的外侧，构成 T 型结构。每个内梁的两侧面上和外梁的上表面上各粘贴有 2 组应变片，对称布置。从弹性体的有限元分析结果可以看出：每个方向单独作用下的应变敏感区域变化比较明显；传感器的维间耦合较小，需通过标定试验进行解耦。每路力矩传感器都采用由 4 个应变片组成

的惠斯通全桥电路输出方式. 作用在弹性体的力或力矩的变化导致 4 个应变片变形, 设变形量为 ε_d , 灵敏系数为 K , 阻值发生变化, 从而导致输出电压 U_0 改变, 具体关系如式 (1) 所示, 其中 U_p 为桥臂供电电压. 因此, 通过采集每组全桥输出的电压, 即可确定弹性体所受力或力矩的情况.

$$U_0 = U_p K \varepsilon_d \quad (1)$$

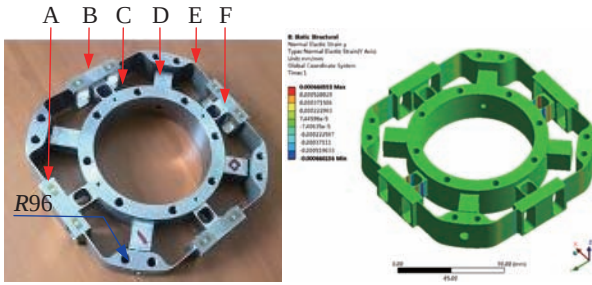


图 2 力矩传感器弹性体结构和仿真结果

Fig.2 Structure of the elastic body and simulation result of the torque sensor

2.3 6 维加速度测量模块

对于惯性坐标系 Σ_0 中自由运动的刚体, 如图 3 所示, 其在惯性坐标系下的位置向量为 p_b , p_i 为 i 点在惯性坐标系中的位置向量, r_i 为 i 点在刚体坐标系 Σ_b 中的位置向量, w_b 为刚体的角速度, 则刚体上任意一点 i 的速度如式 (2) 所示, 通过对此速度微分即可得到 i 点的加速度, 如式 (3) 所示:

$$\dot{p}_i = \dot{p}_b + w_b \times r_i \quad (2)$$

$$\ddot{p}_i = \ddot{p}_b + \dot{w}_b \times r_i + w_b \times (w_b \times r_i) \quad (3)$$

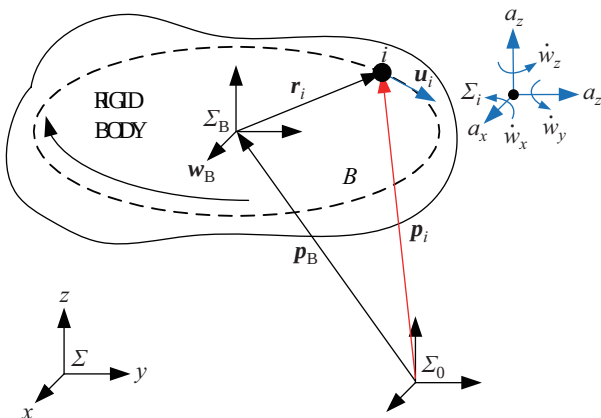


图 3 加速度测量原理

Fig.3 Principle of acceleration measurement

因此将线加速度计安装在 i 点, 设线加速度计的敏感轴方向为 $u_i = [u_{ix}, u_{iy}, u_{iz}]^T \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$, 则线加速度计的输出为

$$a_i = u_i^T \ddot{p}_i = [u_i^T, -u_i^T R_i] \begin{bmatrix} \ddot{p}_b + g \\ \dot{w}_b \end{bmatrix} + u_i^T \Omega_b^2 r_i \quad (4)$$

其中 $R_i \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ 和 $\Omega_b \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ 分别是 r_i 和 w_b 的反对称矩阵. 因此, 利用 N 个线加速度计根据一定的空间几何关系布置, 可以得到各个线加速度计的输出为

$$\begin{bmatrix} a_1 \\ \vdots \\ a_N \end{bmatrix} = [J_1^T, J_2^T] \begin{bmatrix} \ddot{p}_b + g \\ \dot{w}_b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_1^T \Omega_b^2 r_1 \\ \vdots \\ u_N^T \Omega_b^2 r_N \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中,

$$J_1 = [u_1, u_2, \dots, u_N]$$

$$J_2 = [-R_1^T u_1, -R_2^T u_2, \dots, -R_N^T u_N]$$

当且仅当 $J = [J_1^T, J_2^T] \in \mathbb{R}^{6 \times N}$ 可逆时, 6 维加速度可以通过方程解耦. 因此, 理想情况下只需要 6 个线加速度计便可以获得 6 维速度, 但由于 Ω_b^2 、刚体运动角速度耦合项未知, 实际使用时需要通过角加速度的积分获得, 因此这种方法的累积误差较大. 本文将角速度耦合项作为待求解变量, 通过增加线加速度计的数量, 实现 6 维加速度的测量.

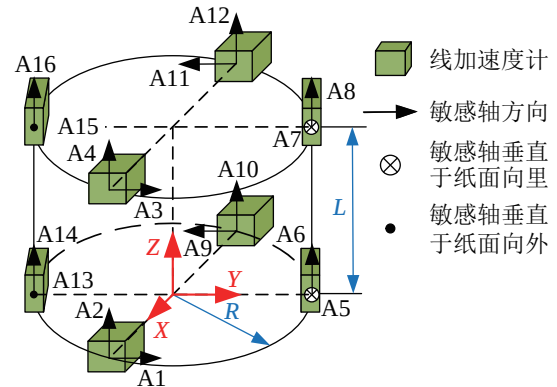


图 4 6 维加速度传感器构型及照片

Fig.4 Configuration and photo of the 6-DOF accelerometer

为提高传感器系统的集成度, 对 6 维力矩传感器和加速度传感器进行一体化设计, 6 维加速度传感器布置在力矩传感器弹性体内环的圆柱空间. 传感器共使用了 8 个 2 轴线加速度计, 如图 4 所示, 其中 4 个均匀地布置在圆柱底面, 另外 4 个布置在圆柱顶面. 圆柱半径和高分别为 R 和 L , 每个加速计的 2 个轴在其平面内相互垂直, 6 维加速度计传感器坐标原点位于圆柱的几何中心上, z 轴和圆柱轴线重合. 通过求解方程 (5) 的广义逆矩阵, 实现 6 维加速度的解耦, 解耦矩阵如式 (6) 所示. 通过几何精度扩散因子 (geometric dilution of procession,

GDOP) 指标对比分析可知^[15], 此种布置方案不仅能够大幅度地提高 6 维加速度的计算精度, 而且冗余的加速度计信息可以为系统角速度的解算提供多

种方法, 保证传感器系统在某些加速度计出现问题或者错误输出时, 仍然能够解算出正确的 6 维加速度信息, 提高了传感器系统的可靠性。

$$\begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{p}}_b + \mathbf{g} \\ \dot{\mathbf{w}}_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -0.5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.5 & 0 & 0 & 0 \\ 0.5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0.5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.25 & 0 & 0.25 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.25 & 0 & 0.25 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{4L} & 0 & -\frac{1}{4L} & 0 & 0 & \frac{1}{8R} & 0 & \frac{1}{8R} & -\frac{1}{4L} & 0 & \frac{1}{4L} & 0 & 0 & -\frac{1}{8R} & 0 & -\frac{1}{8R} \\ 0 & -\frac{1}{8R} & 0 & -\frac{1}{8R} & \frac{1}{4L} & 0 & -\frac{1}{4L} & 0 & 0 & \frac{1}{8R} & 0 & R' & -\frac{1}{4L} & 0 & \frac{1}{4L} & 0 \\ \frac{1}{8R} & 0 & \frac{1}{8R} & 0 & \frac{1}{8R} & 0 & \frac{1}{8R} & 0 & \frac{1}{8R} & 0 & \frac{1}{8R} & 0 & \frac{1}{8R} & 0 & \frac{1}{8R} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ \vdots \\ A_{15} \\ A_{16} \end{bmatrix} \quad (6)$$

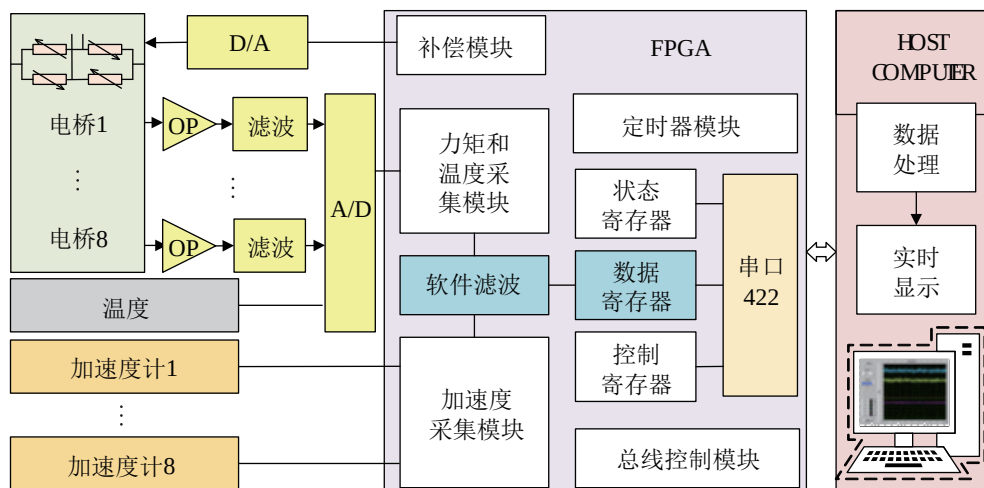


图5 传感器电气系统框图

Fig.5 Electrical system diagram of the sensor

2.4 传感器信号采集与处理

为提高力矩、加速度计等传感器信号的可靠性, 减少与外部控制器系统连接线缆的数量, 设计了基于FPGA的高速、多通道采集系统, 如图5所示, 其主要包括4个模块: 一是FPGA模块, 由于FPGA具有编程灵活和管脚丰富等优点, 采用FPGA实现传感器信息的采集、处理及总线通讯功能, 由状态机实现进程单元和数据的统一调度和管理, 工作在同步时钟模式下; 二是力矩、温度等模拟量信号调理单元模块, 由于空间温度变化剧烈, 影响弹性体和应变片形变, 导致测量力矩信息不准确, 因此粘贴温度传感器, 进行温度补偿; 三是加速度信息采集模块, 选用MEMS(微机电系统)工艺的加速度计, 其提供SPI(串行外设接口)总线接口, 因此将多个加速度计挂在SPI总线上, 通过片选实现对每路加速度计信息的采集; 四是高速串行总线通讯模块, 将采集的传感器信息经编码后通

过RS422总线发送给外部控制器, 通讯波特率的设置采用数字控制晶振(digital control crystal, DCC)技术, 有效地降低了总线通讯的误码率。

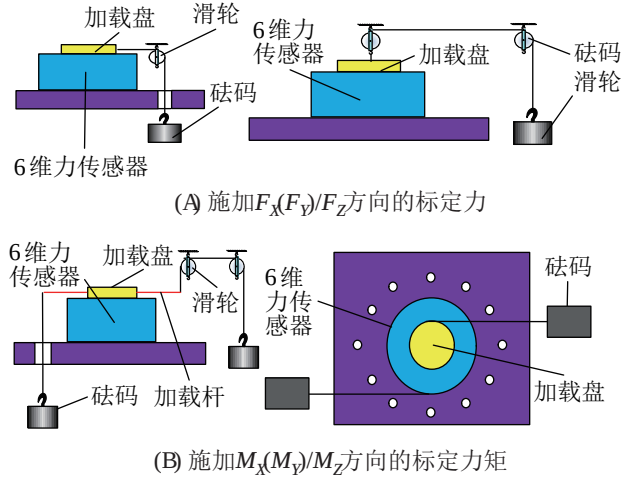
3 传感器的标定 (Sensor calibration)

3.1 12维传感器标定平台

12维传感器由6维力/力矩和6维加速度计组成, 2种传感器之间相互独立, 因此传感器的标定需要根据2种传感器的特性分别进行。

6维力/力矩传感器的标定实验平台如图6所示。为了使研制的6维力/力矩传感器具有较高的测量精度, 需要高精度的标定系统, 而且此标定系统要能够施加单方向的标定力/力矩, 从而减少维间干扰。本文设计的6维力/力矩传感器的标定系统基于滑轮—砝码原理。此外为了保证正、负方向的力都能够加载到6维力/力矩传感器上, 该标定系统必须能够单独加载12个方向的力或力矩。整

个标定试验台的原理如图 6 所示, 图 6(a) 左图实现 F_x 和 F_y 方向力的标定, 右图实现 F_z 方向力的标定; 图 6(b) 左图实现 M_x 和 M_y 方向力矩的标定, 右图实现 M_z 方向力矩的标定。



(A) 施加 $F_x(F_y)/F_z$ 方向的标定力

(B) 施加 $M_x(M_y)/M_z$ 方向的标定力矩

图 6 力矩传感器标定系统

Fig.6 Calibration system of the torque sensor

6 维加速度传感器标定实验平台如图 7 所示, 主要由伺服电机、圆盘、导轨以及齿轮齿条等组成^[16]。电机输出轴通过齿轮减速器驱动圆盘转动, 将电机的旋转运动转化为运动平台的直线往复运动, 平台 1 和平台 2 通过齿轮和齿轮进行啮合, 再将平台的直线往复运动转化为测试平台的圆周运动, 通过对 2 个电机转速的调整, 实现标准传感器和待测传感器的直线或旋转运动。因此设计了 3 种不同的连接件, 如图 7 中的 (a) ~ (c) 所示, 通过此运动平台和连接件的配合实现广义空间上的 3 维线加速度和角加速度的标定。

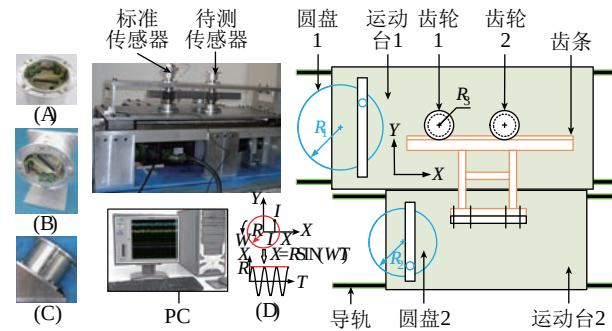


图 7 加速度传感器标定系统

Fig.7 Calibration system of the accelerometer

3.2 传感器测试与标定实验

3.2.1 6 维力/力矩传感器的标定

影响 6 维力/力矩传感器测量精度的主要因素之一是传感器的维间耦合, 需通过静态标定实验,

确定传感器的标定矩阵。本文中所研制的力/力矩传感器共有 8 组惠斯通电桥, 设 $U_{8 \times l}$ 是传感器的电压信号输出矩阵, 为了便于空间机械臂的运算, 电压信号指的是各通道输出的 AD 值, 设 $F_{6 \times l}$ 为标定力矩阵, 它由校正力向量组成, 令 $A_{6 \times 8}$ 为标定矩阵, $O_{6 \times l}$ 是误差矩阵, 则有:

$$F_{6 \times l} = A_{6 \times 8} \cdot U_{8 \times l} + O_{6 \times l} \quad (7)$$

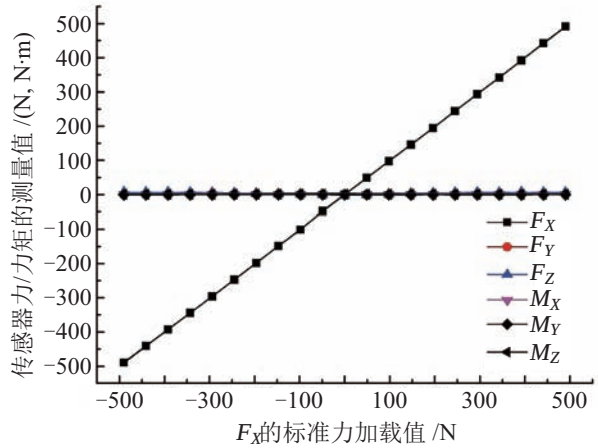


图 8 在 F_x 方向加载时传感器的输出

Fig.8 Sensor output when loading in F_x direction

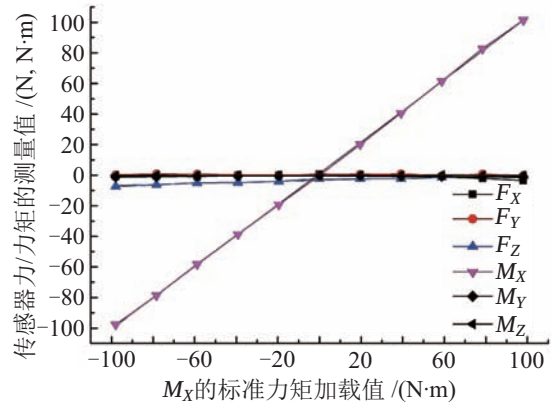


图 9 M_x 方向加载传感器的输出

Fig.9 Sensor output when loading in M_x direction

求解标定矩阵 $A_{6 \times 8}$, 使 $F_{6 \times l}$ 在最小二乘的意义下最优。加载实验中, 采取了 2 种加载方式: 一种是各个方向单独施加载荷, 获得各方向单独加载时各通道的电压值; 另外一种是对 F_x 和 F_y 进行圆周方式加载, 加载大小分别为 10 kgf 和 20 kgf 的砝码力。将第 1 种方式获得的实验数据用于求解传感器的标定矩阵, 而第 2 种方式则用来标定辨识矩阵的性能。采用最小二乘法对 F_x 方向单独施加载荷时传感器获得的实验数据进行线性解耦, 结果如图 8 所示, 可以看出在 F_x 方向力的线性度较好, 而其他方向输出约为 0, 维间耦合较小; 图 9 为 M_x 方向的

力矩加载输出曲线，可以看出在 M_x 方向力矩的线性度较好，而其他方向影响较小。

依此类推，可以得到其它方向的加载结果。通过对传感器各方向单独加载、卸载的实验数据进行处理，并用最小二乘法对传感器进行解耦，可以得到力矩传感器的标定矩阵，如式 (8) 所示。根据传感器指标的相关定义，计算得到 6 维力矩传感

器的静态性能指标：线性度小于 2%；最大的线性度是 M_x 方向的 1.86%，最小的线性度是 F_x 方向的 0.42%；最大的重复性误差为 F_z 方向的 1.37%，最小的重复性误差是 F_x 方向的 0.89%；传感器的稳定性较好，最大的稳定性误差为 M_y 方向的 0.88%；传感器的最大迟滞特性为 F_z 方向的 1.04%，最小的迟滞特性为 M_y 方向的 0.51%。

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.0015 & -0.0003 & -0.1469 & 0.0007 & 0 & -0.0052 & 0.0009 & 0.0010 \\ -0.0007 & 0.0019 & 0.0047 & -0.0047 & -0.0009 & -0.1445 & 0.0013 & -0.0047 \\ 0.0284 & 0.4069 & -0.0253 & 0.0082 & -0.0001 & -0.0035 & 0.0170 & 0.0066 \\ -0.0002 & -0.0004 & -0.0001 & -0.0006 & -0.0188 & 0.0003 & -0.0002 & 0.0004 \\ 0.0096 & -0.0005 & -0.0005 & -0.0001 & -0.0001 & 0 & 0.0093 & 0.0001 \\ 0.0005 & -0.0001 & 0.0001 & -0.0110 & 0.0001 & 0.0002 & -0.0006 & 0.0113 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \\ U_5 \\ U_6 \\ U_7 \\ U_8 \end{bmatrix} \quad (8)$$

表 2 加速度计标定结果
Tab.2 Calibration results of the accelerometers

序号	$b_i/(m/s^2)$	s_i	u_i^T	r_i^T/mm
A1	0.1850	0.9908	[-0.0163 0.9998 0.0089]	[34.4 0.8 -0.2]
A2	0.4286	0.9896	[-0.0122 -0.0137 0.9998]	[34.4 0.8 -0.2]
A3	0.1053	0.9874	[-0.0070 0.9999 0.0103]	[34.6 0.6 18.0]
A4	-0.4088	0.9936	[-0.0118 -0.0162 0.9998]	[34.6 0.6 18.0]
A5	-0.1721	0.9853	[-0.9993 -0.0371 0.0090]	[-1.1 35.0 0.4]
A6	0.4082	1.0013	[-0.0192 -0.0187 0.9996]	[-1.1 35.0 0.4]
A7	-0.0148	0.9786	[-0.9987 -0.0431 0.0275]	[-0.5 35.2 18.1]
A8	-0.0851	0.9869	[-0.0035 -0.0103 0.9999]	[-0.5 35.2 18.1]
A9	-0.7967	0.9902	[0.0068 -1.0000 0.0052]	[-35.0 -1.2 -0.7]
A10	0.1052	0.9919	[-0.0146 0.0041 0.9999]	[-35.0 -1.2 -0.7]
A11	0.3287	0.9820	[0.0074 -1.0000 0.0050]	[-35.2 -0.9 17.9]
A12	-0.3227	1.0022	[-0.0300 -0.0019 0.9995]	[-35.2 -0.9 17.9]
A13	-0.2697	0.9826	[0.9985 0.0483 -0.0245]	[0.7 -34.6 0]
A14	0.4850	0.9942	[-0.0085 -0.0171 0.9998]	[0.7 -34.6 0]
A15	0.3407	0.9896	[0.9987 0.0427 -0.0265]	[0.7 -34.2 18.0]
A16	-0.2870	0.9911	[-0.0042 -0.0025 1.0000]	[0.7 -34.2 18.0]

3.2.2 6 维加速度传感器的标定

本文设计的 6 维加速度传感器，涉及 16 个加速度计轴，采用传统的分布校准法很难获得较高的精度，因此邹添等在 Tan 等提出的“二步法”标定基础之上，建立了基于 16 加速度计圆柱布置的 6 维加速度传感器的标定模型^[15]，利用重力场中的重力加速度，采用静态法和动态法分别标定出传感器的测量误差和安装误差，获取加速度传感器在振动激励下的输出。采用文 [15] 建立的标定模型进行

解耦可以得到各单轴加速度计的安装误差和输出误差，实现 6 维加速度传感器的标定，标定结果如表 2 所示。

4 机械臂上的应用 (Application to the robot arm)

研制的 12 维传感器安装在 HIT 空间大型机械臂的腕部，如图 10 所示，臂长 5 m，每个关节均采用直流无刷电机加谐波减速器的传动方式，机械臂

内部采用高速串行总线进行通讯。为了模拟空间微重力环境,机械臂采用气浮支撑方式,实现平面大范围运动。

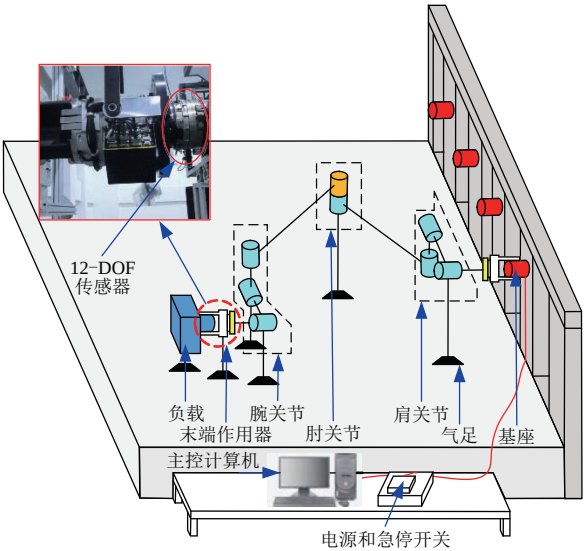


图 10 12 维传感器实验平台
Fig.10 Experimental platform for 12-DOF sensor

机械臂末端 6 维加速度与关节加速度关系为

$$\ddot{\mathbf{q}} = \mathbf{J}^{-1}(\mathbf{a} - \dot{\mathbf{J}}\dot{\mathbf{q}})$$
 (9)

式中 $\mathbf{a}$ 为末端加速度, $\ddot{\mathbf{q}}$ 为关节端加速度, $\dot{\mathbf{q}}$ 为关节端速度, $\mathbf{J}$ 为机器人雅可比矩阵。从公式可以看出, 关节加速度 $\ddot{\mathbf{q}}$ 与机械臂的杆件长度、关节位置和关节速度有关, 此部分影响较小, 在此忽略。利用末端加速度信息有助于补偿机械臂的惯性力, 抑制振动。因此, 为了验证设计的 12 维传感器的性能, 设计了基于加速度反馈的关节位置控制策略, 控制框图如图 11 所示, 其中 $G_p(s)$ 为位置调节器, 采用比例-微分调节; $G_a(s)$ 为加速度调节器, 采用比例调节, 关节电机控制量为

$$u = k_p(q_{ref} - q_r) + k_v(\dot{q}_{ref} - \dot{q}_r) + k_a(\ddot{q}_{ref} - \ddot{q}_r)$$
 (10)

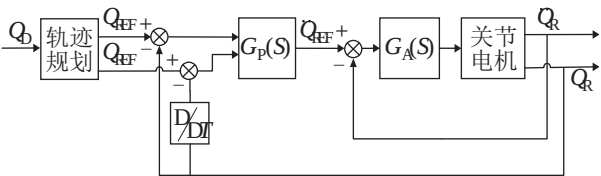


图 11 基于加速度计的位置控制框图
Fig.11 Position control diagram based on accelerometers

针对肘关节进行了加速度反馈的关节位置控制与输入整形控制 2 种控制试验, 试验结果如图 12 所示, 通过曲线对比可以看出: 输入整形技术虽然可以减小残余振动的幅度, 但是需要较长的稳定

时间; 而加速度反馈不仅可以有效地减小残余振动的幅度, 而且可以改善系统稳态性能, 降低稳态误差, 提高位置跟踪精度, 所需要的调节时间小于输入整形控制方式, 具体比较结果见表 3。

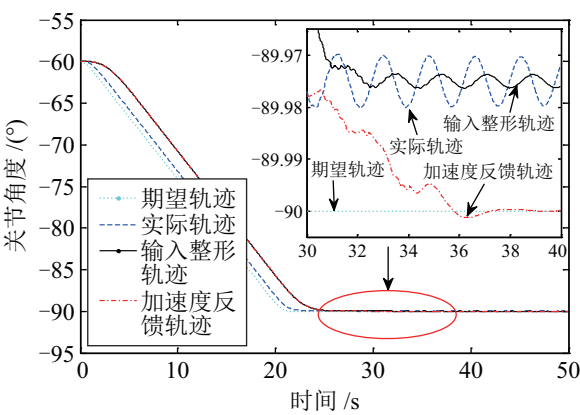


图 12 控制实验结果
Fig.12 Control experiment results

表 3 振动抑制效果对比

Tab.3 Comparison of vibration suppression effects			
指标	振动衰减时间 /s	稳态误差 /(°)	残余振幅 /(°)
不抑振	> 40	0.033	0.014
输入整形	> 30	0.033	0.003
加速度反馈	15	0.001	0.000 15

5 结论 (Conclusion)

本文为提高空间大型机械臂操作性能, 研制了用于空间大型机械臂末端的 12 维传感器, 实现了 6 维力/力矩和 6 维加速度的感知。设计的传感器测量力范围为 $\pm 500\text{ N}$, 力矩为 $\pm 100\text{ N}\cdot\text{m}$, 线加速度为 $\pm 2g$ 、角加速度为 $\pm 10\text{ rad/s}^2$ 。传感器上集成了信号调理系统, 与外部控制器采用全双工 RS422 总线进行通讯, 有效地提高了传感器测量的精度和可靠性。同时, 传感器具有较大的中心孔结构, 便于与大型机械臂集成安装。最后, 对此传感器进行标定, 并将其安装在大型机械臂末端进行了位置控制实验。与输入整形方法相比, 采用此传感器实现的加速度抑振控制方式具有振动衰减时间短、稳态误差低、残余振幅小等特点。实验结果表明传感器设计合理可行, 具有较大的推广价值。

参考文献 (References)

[1] 王树新, 负今天, 石菊荣, 等. 柔性机械臂建模理论与控制方法研究综述 [J]. 机器人, 2002, 24(1): 86-91,96.
Wang S X, Yun J T, Shi J R, et al. A roadmap of research on modeling and control strategy for flexible manipulators[J]. Robot, 2002, 24(1): 86-91,96.

- [2] 郭闯强, 倪风雷, 孙敬颀, 等. 具有力矩传感器的柔性关节的振动抑制[J]. 机器人, 2011, 33(4): 449-454.
Guo C Q, Ni F L, Sun J T, et al. Vibration suppression for the flexible joint with torque sensor[J]. Robot, 2011, 33(4): 449-454.
- [3] Crane C D, Duffy J, Carnahan T. A kinematic analysis of the space station remote manipulator system (SSRMS)[J]. Journal of Robotic Systems, 1991, 8(5): 637-658.
- [4] 邱志成, 谢存禧, 张洪华, 等. 压电柔性机械臂的主动振动控制研究[J]. 机器人, 2004, 26(1): 45-48, 73.
Qiu Z C, Xie C X, Zhang H H, et al. Active vibration control for flexible piezoelectric manipulator[J]. Robot, 2004, 26(1): 45-48, 73.
- [5] Kapucu S, Baysec S, Alici G. Residual vibration suppression of a flexible joint system using a systematic command shaping technique[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2006, 31(2B): 139-152.
- [6] Ahmad M A, Ismail R M T R, Ramli M S. Optimal control with input shaping for input tracking and vibration suppression of a flexible joint manipulator[J]. European Journal of Scientific Research, 2009, 28(4): 583-599.
- [7] Park K J, Park Y S. Fourier-based optimal design of a flexible manipulator path to reduce residual vibration of the endpoint[J]. Robotica, 1993, 11(3): 263-272.
- [8] Thummel M, Otter M, Bals J. Vibration control of elastic joint robots by inverse dynamics models[C]//International Symposium on Vibration Control of Nonlinear Mechanisms and Structures. Dordrecht, Netherlands: Springer, 2005: 343-353.
- [9] He Y Q, Han J D. Acceleration-feedback-enhanced robust control of an unmanned helicopter[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2010, 33(4): 1236-1250.
- [10] Kröger T, Kubus D, Wahl F M. Force and acceleration sensor fusion for compliant manipulation control in 6 degrees of freedom[J]. Advanced Robotics, 2007, 21(14): 1603-1616.
- [11] Garcia J G, Robertsson A, Ortega J G, et al. Force and acceleration sensor fusion for compliant robot motion control[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, USA: IEEE, 2005: 2709-2714.
- [12] Winkler A, Suchy J. Dynamic force/torque measurement using a 12DOF sensor[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway, USA: IEEE, 2007: 1870-1875.
- [13] Garcia J G, Robertsson A, Ortega J G, et al. Sensor fusion for compliant robot motion control[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2008, 24(2): 430-441.
- [14] Wu Z C, Meng M, Shen F. Interaction force measurement of robotic manipulator based on 12DOF force sensor[C]//International Conference on Information Acquisition. Piscataway, USA: IEEE, 2004: 240-243.
- [15] Zou T, Ni F L, Guo C Q, et al. A 6-DOF acceleration sensor with cylindrical configuration[J]. Sensors and Actuators A, 2016, 251: 167-178.
- [16] 李成刚, 尤晶晶, 陈鹏, 等. 六维加速度传感器标定平台及标定方法, 中国: CN102680739A[P]. 2012-09-19.
Li C G, You J J, Chen P, et al. Calibration platform and method for 6D accelerometer, China: CN102680739A[P]. 2012-09-19.

作者简介:

倪风雷 (1975-), 男, 博士, 副教授. 研究领域: 空间机器人技术.

邹添 (1984-), 男, 博士生. 研究领域: 空间机器人技术.