

基于 PSD 集成装置挠性机器人动态误差建模*

周正华** 徐卫良 朱维乐

(电子科技大学电子工程学院 成都 610054)

【摘要】 提出了一种基于位置敏感探测器(PSD)、用于挠性机器人动态误差测量的新型集成装置,分析和导出了其测量原理和线性化模型。利用该装置可研究多杆机器人的高精度测量及其反馈控制,推导出了基于该装置的机器人三维挠性动态误差模型,由此得到用于平面机器人简化的线性化实时控制模型。

关键词 PSD集成装置; 测量; 动态误差模型; 线性化

中图分类号 V556.6

1 PSD 集成装置及其测量原理

为了有效地抑制挠性机器人系统末端的变形,一般采用基于末端挠性偏差的反馈控制方法,而良好的反馈控制取决于末端位姿变量的精确测量。通过 PSD 集成装置对挠性杆件末端位姿偏差的测量^[1,2],可计算出各个补偿关节的调整量,进而可算出反馈控制器的输入补偿量;利用该装置的测试方法不仅可避免复杂的动力学计算,而且能有效地减小机器人末端的挠性偏差,故能使挠性机器人系统达到很高的精度。

在挠性杆的前端固定一个激光装置,包括两个平行的激光发生器,其光线平行于杆长方向,在杆的末端固定一个PSD集成装置,由一个45°分光直角棱镜和三个PSD传感器组成,都固定在一个长方体的框架内,如图1所示。在挠性杆机器人系统的每个挠性杆上安装这种测量装置,当挠性杆发生弹性变形时,PSD集成装置将随着末端的变形而产生摄动,使投射到各个PSD上的光点发生偏移,由偏移量经误差模型可算出挠性误差。

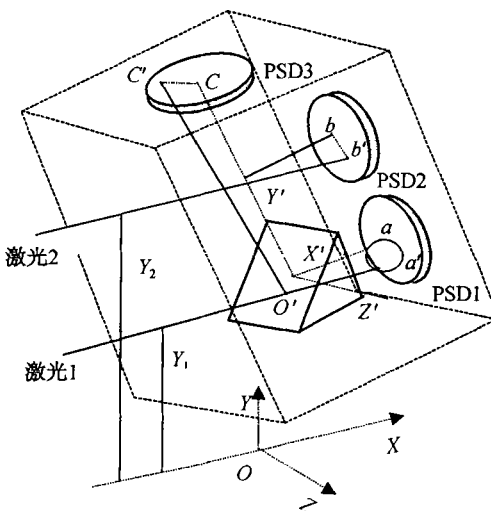


图1 PSD 集成装置示意图

2 PSD 集成装置的线性化建模

因工程的实际需要,本文提出用一般棱镜代替分光镜的方法。一般棱镜由于折射率的影响,其透射光总呈向下偏的特点,为此光路需作线性化处理。设45°直角棱镜边长为 a , 折射率为1.5163, 距光电传感器的距离为 d , 入射角为45°, 光线的两个折射角分别为 I_1 、 I_2 。棱镜误差如图2所示,即可算得偏差量为

$$e = e_1 + e_2 = \frac{a}{2} \text{tg}(45 - I_1) + d \text{tg}I_2 = 0.155a + 0.502d$$

当挠性杆末端发生微振动时,假设集成测量装置的空间位姿变化为 $(dx, dy, dz, \Delta x, \Delta y, \Delta z)$, 且设 $\Delta z \leq 3$, 则此时在入射面的入射角为 $45 + \Delta z$, 由折射关系可算得

$$E = e_2 + e_1 = -0.155a - 0.310dy + 0.004a\Delta z + 0.502d + 0.003d\Delta z$$

2000年6月6日收稿

* 电子部预研基金资助项目

** 男 29岁 博士生

经上述线性化处理，只要把 PSD 安装在棱镜坐标系下方 E 处时，即可精确地测出杆件末端点在垂直平面内的偏移。

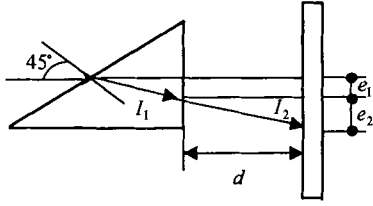


图2 棱镜误差示意图

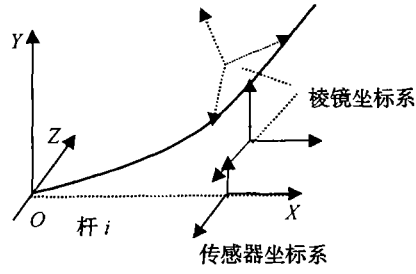


图3 第 i 杆坐标系分布图

3 传感器坐标系和棱镜坐标系的建立

为了把各个 PSD 上测量出的光点偏移值转换为杆件本身动坐标系上的位姿摄动量，需借助于一个固定在杆件动坐标系上的传感器坐标系来实现。设第 i 杆的传感器坐标系 $(O - XYZ)'$ ，传感器坐标系固定在挠性杆刚化后的第 i 坐标系上， X 轴沿杆长方向。设光线1与 X 轴距离为 Y_1 ，光线2与 X 轴的距离为 Y_2 ； Y 轴方向为杆长与光线的公垂线方向，且杆件变形前 Y 轴过棱镜反射面的中心点 O' ；取 Y 轴与杆长的交点为传感器坐标系的原点 O ，则传感器坐标系随之确定。为了得到末端的相对位姿，还需建立一个反映末端位置变化的棱镜坐标系 $(O' - X'Y'Z')$ 。它固定在 PSD 传感器集成装置上，坐标系原点选在棱镜反射面的中心点 O' 上， X' 轴垂直于 PSD1，且过 PSD1 的中心； Y' 轴垂直于 PSD3，且过 PSD3 的中心；杆件变形前棱镜坐标系为在传感器坐标系中沿 Y 轴平移 Y_1 分量，其坐标变换矩阵为

$$T_0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & Y_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

传感器坐标系、棱镜坐标系和杆件的 $D-H$ 坐标系的相互位置关系如图3所示。传感器坐标系实际是固结在挠性杆的始端，反映了变形前末端的位姿，而棱镜坐标系固定在 PSD 集成装置上，随着末端位姿的变化而改变。在挠性杆的弹性变形为微量的前提下，可由传感器坐标系中的3个微分平移 (dx, dy, dz) 和三个微分转动 $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ 表示挠性杆在三维空间中变形量的大小。

4 机器人扰动误差建模

由机器人微分变换理论可知^[3,4]，棱镜坐标系在传感器坐标系中作微分平移和微分旋转后的坐标变换矩阵应为

$$T = \text{Trans}(dx, dy, dz)\text{Rot}(\vec{K}, d\theta)T_0 = \begin{bmatrix} 1 & -\Delta z & \Delta y & -Y_1\Delta z \\ \Delta z & 1 & -\Delta x & Y_1 + dy \\ -\Delta y & \Delta x & 1 & Y_1\Delta x + dz \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

在传感器坐标系中，激光光线1与 Y 轴的交点 S 的齐次坐标为 $(0, Y_1, 0, 1)^T$ ，而激光光线1的矢量可表示为 $(1, 0, 0)^T$ ，所以 S 点在棱镜坐标系中的齐次坐标为

$$\begin{pmatrix} S_x \\ S_y \\ S_z \\ 1 \end{pmatrix} = T^{-1} \begin{pmatrix} 0 \\ Y_1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Y_1 \Delta z + Y_1 \Delta x \Delta y + \Delta y dz - \Delta z dy \\ -Y_1 (\Delta x^2 + \Delta z^2) - dy - \Delta x dz \\ -Y_1 \Delta x + Y_1 \Delta y \Delta z + \Delta x dy - dz \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

在棱镜坐标系中, 激光光线1投射在 PSD1中的光点坐标设为 $a(a_x, a_y, a_z)$, 沿其 x' 轴的分量是 $o_1 a$, 则由激光光线1在棱镜坐标系中的直线方程可解得 PSD1上的偏移量为

$$\begin{cases} y_a = -a \Delta z - dy \\ z_a = a \Delta y - Y_1 \Delta x - dz \end{cases} \quad (3)$$

式中 y_a 和 z_a 为激光光线1在PSD1上投射点的偏移值。同理可求得PSD2、PSD3上的偏移量为

$$\begin{cases} y_b = -a \Delta z - dy + (Y_2 - Y_1) \\ z_b = a \Delta y - Y_2 \Delta x - dz \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} x_c = -c \Delta z - dy \\ z_c = c \Delta y - Y_1 \Delta x - dz \end{cases} \quad (5)$$

联立方程式(3)~(5), 可求出挠性杆在传感器坐标系中的弹性变形摄动量为^[5,6]

$$\begin{bmatrix} dy \\ dz \\ \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{c}{a-c} & 0 & 0 & -\frac{a}{a-c} & 0 \\ 0 & \frac{Y_1}{Y_1 - Y_2} - \frac{a}{c-a} & -\frac{Y_1}{Y_1 - Y_2} & 0 & \frac{a}{c-a} \\ 0 & -\frac{1}{Y_1 - Y_2} & \frac{1}{Y_1 - Y_2} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{a-c} & 0 & 0 & -\frac{1}{a-c} \\ -\frac{1}{a-c} & 0 & 0 & \frac{1}{a-c} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_b \\ z_a \\ z_b \\ x_c \\ z_c \end{bmatrix} \quad (6)$$

5 应用示例

在平面机器人的动力学分析中, 一般仅需考虑在垂直平面内的偏移, 即平面情况下 $\Delta x = 0, \Delta y = 0, dx = 0, dz = 0$, 此时PSD集成装置中的PSD2可省去, 由此可建立平面两杆机器人偏转关系为

$$\begin{cases} a'_y = -c \Delta z - dy - e \\ c'_x = -c \Delta z - dy \end{cases} \quad (7)$$

式中 a'_y 和 c'_x 分别为PSD1和PSD3上 Y 、 X 方向上实测值。令 $dy' = dy + e$, $\Delta'z = \Delta z$, 整理得

$$\begin{bmatrix} dy' \\ \Delta'z \end{bmatrix} = \frac{1}{a-c} \begin{bmatrix} c & -a \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a'_y \\ c'_x \end{bmatrix} \quad (8)$$

可见, a 和 c 的长度不能相等, 即反射棱镜斜面中点到PSD1和PSD3的距离不相等, 同时挠性杆的弹性变形应保证在该测量系统的测量范围内。这样, 由传感器坐标系的估计偏差值可求出各个PSD传感器的测量值, 为后续理论分析及程序控制提供很有用的依据。

6 结束语

本文讨论了 PSD 集成装置测量原理, 分析推导出 PSD 集成装置的线性化模型, 并建立了基于 PSD 集成装置的空间挠性机器人的动态误差模型。该模型充分利用 PSD 测量的高精度、非接触等特性, 实现了复杂情况下三维挠性误差的测量。针对两杆平面机器人情况, 给出了简化的实时误

差测量模型。在挠性平面机器人动态误差控制实验中,该简化模型可用来测量机器人末端的挠性误差,并基于此实测的误差来控制挠性机器人运动中产生的微振动,利用文中提出的误差模型,能实时、有效地获取三维空间的误差参数。

参 考 文 献

- 1 Vincze M, Prenninger J P, Gander H. A laser tracking system to measure position and orientation of robot end effectors under motion. *The International Journal of Robotics Research*, 1994,13(4): 305~314
- 2 Connor B O. An optical system for detecting the positional accuracy of a robot. *Trans Inst MC*, 1990, 12(2): 6~10
- 3 陆佑方, 齐朝晖. 柔性机械臂动力学与控制建模的若干基本问题. *机器人*, 1993, 15(5): 52~59
- 4 范守文, 徐礼钜. 机器人动力学自动建模软件系统. *电子科技大学学报*, 1995, 24(3): 249~255
- 5 何旭初, 孙文瑜. 广义逆矩阵引论. 江苏: 江苏科学技术出版社, 1994
- 6 谭 营, 何振亚, 郑 超. 一种机器人逆动力学求解的神经网络方法. *电子科技大学学报*, 1997, 27(3): 310~316

Flexible Robot Dynamic Error Modeling Based on PSD Integrated Setup

Zhou Zhenghua Xu Weiliang Zhu Weile

(Dept. of Electronic Engineering, UEST of China Chengdu 610054)

Abstract In this paper, a dynamic error measuring system, which is a newly integrated setup based on PSD is analyzed and built. Its measuring principle and linear model are deduced. It can be used to measure and control spatial error for one or many beam robot. Corresponding dynamic error model is analyzed and deduced, then the reduced and linear model used for plane robot is obtained.

Key words position sensitive detector; integrated setup; measure; dynamic error model; linearization

· 科研成果介绍 ·

汽车后桥差速、减速器总成综合评价系统

主研人员: 胡绍湘 丁杰雄 臧建华等

汽车后桥主锥总成试验机是一台用于汽车后桥装配线上对成品后桥主锥总成的整体性能进行科学的自动测试和综合评判的专用测试设备。该系统的综合评价模式具有独创性,性能稳定可靠、数据检测准确;对主锥总成整体性能的评判由原来的单纯人眼观察空载运转压痕改为加载运转获取综合参数评价,使主锥总成质量得到保证,可提高工效2~3倍。

· 科 下 ·