

# 精密磨抛加工机器人自主重力补偿方法研究

祁若龙<sup>1,2</sup>, 邵健铎<sup>1</sup>, 李 论<sup>2</sup>

(1. 沈阳建筑大学机械工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 中国科学院沈阳自动化研究所

机器人学国家重点实验室, 辽宁 沈阳 110169)

**摘要** 目的 针对工业机器人磨抛加工过程需消除不同位姿条件下重力矢量对末端力感知的影响,提出一种重力补偿算法,从而精确控制三维磨削力。方法 借助安装在机器人末端的六维力传感器,读取机器人多个随机位姿下实时力和力矩信息,并基于卡尔曼滤波对传感器信息进行有效降噪;通过线性拟合算法对降噪后数据开展数值分析,计算出传感器误差、机器人世界坐标系偏移、末端负载重心大小及重心坐标等参数;根据以上参数并结合机器人当前姿态来实时消除负载重力影响。结果 采用笔者所提算法对同样静态条件下的机器人进行重力补偿,补偿后的重力影响产生的各方向力均近似为0,偏差小于0.1 N。结论 笔者所提出的算法充分考虑了重力补偿参数之间的耦合作用,能够消除重力影响,精确测量出机械臂末端六维力传感器受到的外力以及外力矩。

**关键词** 六维力传感器;工业机器人;重力补偿;系统标定

中图分类号 TP242

文献标志码 A

**引用格式:** 祁若龙,邵健铎,李论. 精密磨抛加工机器人自主重力补偿方法研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2024,40(1):158-166. (QI Ruolong, SHAO Jianduo, LI Lun. Gravity compensation method for precision grinding and polishing robot[J]. Journal of Shenyang jianzhu university(natural science),2024,40(1):158-166.)

## Gravity Compensation Method for Precision Grinding and Polishing Robot

QI Ruolong<sup>1,2</sup>, SHAO Jianduo<sup>1</sup>, LI Lun<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. State Key Laboratory of Robotics, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang, China, 110169)

**Abstract:** The purpose of this paper is to eliminate the influence of gravity vector on the end force perception of the industrial robot in different position and pose conditions in the process of precision grinding and polishing, so as to accurately control the three-dimensional grinding force, a gravity compensation algorithm is proposed. The method is to read the force and torque information of the robot under multiple random positions and poses based on the six-dimensional force sensor installed at the end. The sensor error, the deviation of the robot world coordinate system, the size and

收稿日期:2023-03-02

基金项目:国家自然科学基金-辽宁省联合基金项目(U1908230)

作者简介:祁若龙(1983—),男,教授,博士,主要从事机器人自主决策等方面研究。

coordinates of the center of gravity of the terminal load can be calculated by using Kalman filter to de-noise the data of the sensor information. According to the above parameters and the robot's current attitude, the effect of load gravity can be eliminated in real time. The results show that the experimental data are from the static robot. The experimental data are from the static robot. The algorithm is used to compensate the gravity of the static robot, and the gravity after compensation is approximately zero. The conclusion is that the algorithm proposed in this paper can measure the external force and torque on the end load of the manipulator satisfying the machining accuracy by using the sensor data under the general attitude of the robot and fully considering the coupling effect between the parameters affecting the gravity compensation.

**Key words:** six dimensional force sensor; industrial robot; gravity compensation; system calibration

航天业的发展可以极大地推进一个国家的工业化进程,代表着一个国家的最高工业水平。航空发动机作为飞机的动力源,决定了飞机的性能,而叶片是发动机的核心零件,其精度直接关乎发动机的性能。航空发动机叶片作为一种典型的薄壁弱刚度复杂曲面零件,其精加工无疑是一个难题。目前大多数叶片加工方式仍以手工抛磨为主,但是加工精度难以保证、效率低以及可重复性低。目前,柔性好、自由度高的机器人化叶片磨抛加工是替代手工作业的最优方案,但尚有亟待解决的关键难题。

为保证叶片加工的高精度要求,必须被精确感知和控制机器人末端加工力。一般在机械臂末端安装六维力传感器作为力感知系统。六维力传感器可以测得空间上的三个正交力和三个正交力矩。在机器人低速或静态下,传感器读数由传感器零点漂移、负载重力以及外部力三部分组成。由于传感器的自身误差受到负载以及安装方式等影响,因此只能在安装负载时测量。而负载重力对传感器的影响会在随机器人改变姿态时不断变化,所以要想得出准确的传感器数据必须对这两部分进行补偿。

A. Lewis 等<sup>[1]</sup>针对外科手术机器人的重力诱导力矩问题,提出了一种考虑加速度矢量、质心参数和运动学细节的总定位执行器重力力矩求解方法,将重力补偿推广到基础运动补偿。G. Massa 等<sup>[2]</sup>提出了一种高精

度的力-扭矩传感器和虚拟控制器方法,并解释了重力补偿和控制算法。王彬等<sup>[3]</sup>根据机器人的重力模型,提出了在不精确了解时间延迟的情况下保证机器人稳定性和位置调节的控制算法,其中重力力矩以配置的方式进行预补偿。J. Boisclair 等<sup>[4]</sup>提出了一种新的机械臂静态重力补偿的概念。利用磁场来产生所需的扭矩,在运动范围内减少系统内部摩擦力对重力补偿的影响,但是最终的原型装置体积太大,成本过高。以上研究在进行机器人重力补偿时采取的方法并非一般实验条件下可以进行,需要借助昂贵的仪器辅助测量,不适合于现场快速、准确地对负载进行重力补偿。

H. P. Du 等<sup>[5]</sup>研究了一种机器人自动磨抛系统,并通过模糊 PI 控制器控制接触力,假设机器人基坐标系 Z 轴与重力方向相同,但是实际安装中并不针对机器人的 Z 轴方向进行特殊安装,机器人基坐标系 Z 轴与重力方向有倾角误差。高强等<sup>[6]</sup>采用了一种基于位置内环力的外环主动柔性控制策略,为了磨抛复杂自由曲面建立了机器人磨抛系统,但在其重力补偿过程中并没有考虑机器人基坐标系 Z 轴的方向问题。以上研究在进行重力补偿时,不是没有考虑到传感器零点问题,就是没有考虑机器人基坐标系 Z 轴的偏角问题。

魏秀权等<sup>[7]</sup>提出了一种位置伺服机器人表面跟踪方法,用于实现任务空间标定,采

用直接拟合最小二乘算法对工件表面进行拟合。张婷等<sup>[8]</sup>基于速度伺服的力位混合控制策略,设计了一种机器人打磨系统。L. J. Zhang 等<sup>[9]</sup>提出了一种基于极大似然估计的机器人腕部传感器在线标定方法,可在机器人高速运动时有效抵抗其干扰。Y. L. Yu 等<sup>[10]</sup>提出了一种基于模型学习的重力补偿参数标定算法,该方法根据机械臂的结构和采样数据,利用线性回归方法求解机械臂的重力项,解决了传统动态建模方法推导出的模型与实际模型存在较大偏差的问题。林君健<sup>[11]</sup>提出了一种具有非线性外干扰力的机械臂的重力补偿系统方法,该方法采用多项式函数对非线性扰动行为进行建模,并结合 MLSE 框架进行参数估计。以上研究采用的数学方法过于复杂,涉及机器人动力学建模问题,而机器人动力学建模一般情况下不够准确,误差较大。

综上所述,针对工业机器人精密磨抛加工过程中,需要消除机器人在不同位姿条件下重力矢量对末端力感知的影响,从而精确控制三维磨削力,笔者提出一种重力补偿算法,基于卡尔曼滤波对传感器信息降噪处理后的数据,相较于六维力传感器直接采集数据,更加准确;该算法可一次计算出传感器误差、机器人世界坐标系偏移、末端负载重心大小及重心坐标等参数,从未通过单次计算消除负载重力影响。研究表明,该算法切实可行,标定结果可以满足磨抛等力/力矩计量需要。

## 1 卡尔曼滤波

通过在机器人末端安装六维力传感器可感知机器人末端力,但是传感器由于内部构造及元件热噪声影响再加上外部的电磁扰动使得采集信号精度偏低。卡尔曼滤波算法是一种将系统状态视为线性变化,并根据观测信号来预测和估计状态量变化以达到滤波目的,其原理<sup>[12]</sup>不再赘述。假设系统的状态方程和测量方差可用线性公式描述:

$$\begin{cases} \mathbf{x}_k = \boldsymbol{\zeta} \mathbf{x}_{k-1} + \boldsymbol{\psi} \mathbf{U}_k + \mathbf{w}_k; \\ \mathbf{y}_k = \boldsymbol{\Gamma} \mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k. \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{x}_k$  为 6 维状态向量; $\mathbf{y}_k$  为 6 维观测向量; $\boldsymbol{\zeta}$  为从  $k-1$  时刻到  $k$  时刻的状态转移矩阵; $\mathbf{U}_k$  为系统输入控制向量; $\boldsymbol{\psi}$  为输入控制向量矩阵; $\boldsymbol{\Gamma}$  为状态量到观测量矩阵; $\boldsymbol{\sigma}_k$  为输入噪声; $\boldsymbol{\lambda}_k$  为观测噪声。依据机器人运动与传感器数据采集非确定性理论<sup>[13]</sup>:

$$\mathbf{x}_k = \mathbf{e}^{-\varepsilon T} \times \mathbf{x}_{k-1} + \mathbf{V} \times \mathbf{F}_k + \boldsymbol{\sigma}_k. \quad (2)$$

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{x}_k + \boldsymbol{\lambda}_k n. \quad (3)$$

根据上式可推导出的最优估计为

$$\hat{\mathbf{x}}_{k+1} = (1 - K_{k+1}) \cdot (\mathbf{e}^{-\varepsilon T} \cdot \hat{\mathbf{x}}_k + \mathbf{V} \cdot \mathbf{P}_{k+1}) + K_{k+1} \mathbf{y}_{k+1}. \quad (4)$$

式中: $\mathbf{F}_k$  为传感器收到的外部力; $T$  为采样的时间间隔; $\varepsilon$  为滤波器时间常数的倒数, $\mathbf{V} = 1 - \mathbf{e}^{-\varepsilon T}$ 。

因为传感器内部元件在一定范围内所受的应力<sup>[14-15]</sup>和应变呈线性变化且耦合关系矩阵元素均为自然数,由此可将传感器推广到六维,保证了卡尔曼滤波算法的有效性。

## 2 计算模型的建立

### 2.1 六维力传感器数据组成

获取力的信息对于工业机器人加工至关重要,六维力传感器一般安装在工业机器人末端,为机器人提供受力感知。六维力传感器可测得平面上某一点的所有力与扭矩分量,即三个正交力  $F_x, F_y, F_z$  和三个正交力矩  $T_x, T_y, T_z$ ,力与力矩如图 1 所示。设世界坐标系为  $O_0 - X_0 Y_0 Z_0$ ,机器人基坐标系为  $O_1 - X_1 Y_1 Z_1$ ,两个坐标系如图 2 所示。

传感器坐标系为  $O_s - X_s Y_s Z_s$ ,六维力传感器的力分量零点为 ${}^s\mathbf{F}_0 = [F_{x0}, F_{y0}, F_{z0}]^T$ ,力矩分量零点为 ${}^s\mathbf{T}_0 = [T_{x0}, T_{y0}, T_{z0}]^T$ 。若负载重心在传感器坐标下的数据为 ${}^s\mathbf{H} = [h_x, h_y, h_z]$ ,将六维力传感器直接测得的数据记为 ${}^s\mathbf{F} = [F_x, F_y, F_z]^T$ , ${}^s\mathbf{T} = [T_x, T_y, T_z]^T$ ,负载叶片的重力在传感器坐标系下对  $X_1, Y_1, Z_1$

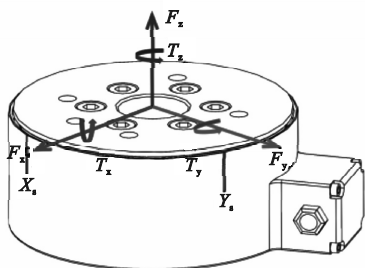


图1 传感器的正交力和力矩

Fig. 1 The diagram of orthogonal forces and torques for force sensors

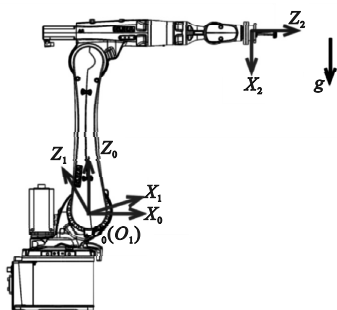


图2 机器人坐标系示意图

Fig. 2 The diagram of coordinate system for robot

轴的分量分别为  $G_x, G_y, G_z$ , 对  $X_1, Y_1, Z_1$  轴的作用力矩分别为  $T_{gx}, T_{gy}, T_{gz}$  可得:

$$\begin{cases} T_x = T_{gx} + T_{x0}; \\ T_y = T_{gy} + T_{y0}; \\ T_z = T_{gz} + T_{z0}. \end{cases} \quad (5)$$

根据理论力学分析可知,负载重力与重力矩之间的关系为

$$\begin{cases} T_{gx} = G_z \times h_y - G_y \times h_z; \\ T_{gy} = G_x \times h_z - G_z \times h_x; \\ T_{gz} = G_y \times h_x - G_x \times h_y. \end{cases} \quad (6)$$

已知传感器数据由传感器零点及所受实际外力组成,则可表示为

$$\begin{cases} G_x = F_x - F_{x0}; \\ G_y = F_y - F_{y0}; \\ G_z = F_z - F_{z0}. \end{cases} \quad (7)$$

将式(7)、式(6)代入式(5),可得:

$$\begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_z \times h_y - F_y \times h_z + T_{x0} + F_{y0} \times h_z - F_{z0} \times h_y \\ F_x \times h_z - F_z \times h_x + T_{y0} + F_{z0} \times h_x - F_{x0} \times h_z \\ F_y \times h_x - F_x \times h_y + T_{z0} + F_{x0} \times h_y - F_{y0} \times h_x \end{bmatrix}. \quad (8)$$

## 2.2 机器人坐标系变换

利用笛卡尔变换可推导出机器人不同坐标系之间的姿态变换矩阵<sup>[16]</sup>,由于传感器测得数据是在自身坐标系下,要想实时消除负载重力的影响就必须得出负载重力在该坐标系下的分量。对于一个具有  $n$  个自由度的操作臂来说,它的所有连杆位置可由一组  $n$  个关节变量加以确定。这样的一组变量常被称为  $n \times 1$  的关节矢量。所有关节矢量组成的空间称为关节空间。如何将已知的关节空间描述转化为笛卡儿空间的描述就是坐标变换的意义。

通过机器人操作臂运动学推导出的连杆变化可求得基坐标系相对于世界坐标系的姿态变换矩阵。即基坐标系的  $X_1$  轴绕世界坐标系的  $X_0$  轴先转过  $M$  度,再把变换后的坐标系绕自身的  $Y_1$  轴转过  $N$  度,同理可得传感器坐标系相对于基坐标系的姿态变换矩阵即传感器的  $Z_s$  轴先绕基坐标系的  $Z_2$  轴转过  $\alpha$  度,得到变换后的坐标系绕自身  $Y_s$  轴转过  $\beta$  度,最后绕  $Z_s$  轴转过  $\gamma$  度,则这两个姿态变换矩阵分别为

$${}^0_1R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos M & -\sin M \\ 0 & \sin M & \cos M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos N & 0 & \sin N \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin N & 0 & \cos N \end{bmatrix}. \quad (9)$$

$${}^1_sR = R_Z(\alpha)R_Y(\beta)R_X(\gamma) =$$

$$\begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \gamma & -\sin \gamma \\ 0 & \sin \gamma & \cos \gamma \end{bmatrix}. \quad (10)$$

已知重力的方向向量在世界坐标系下为

$${}^0g = [0 \quad 0 \quad -1]^T. \quad (11)$$

则通过矩阵变换到传感器坐标系下的方向向量为

$${}_s g = {}^1_s R^T \cdot {}^0_1 R^T \cdot {}^0g. \quad (12)$$

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_x \\ G_y \\ G_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} F_{x0} \\ F_{y0} \\ F_{z0} \end{bmatrix} = {}^1_s\mathbf{R}^T \begin{bmatrix} G\cos M\sin N \\ -G\sin M \\ -G\cos M\cos N \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} F_{x0} \\ F_{y0} \\ F_{z0} \end{bmatrix}. \quad (13)$$

可知,  $F_{x0}, F_{y0}, F_{z0}, T_{x0}, T_{y0}, T_{z0}, h_x, h_y, h_z$  均为常数,则令

$$\begin{cases} v_1 = T_{x0} + F_{y0} \times h_z - F_{z0} \times h_y; \\ v_2 = T_{y0} + F_{z0} \times h_x - F_{x0} \times h_z; \\ v_3 = T_{z0} + F_{x0} \times h_y - F_{y0} \times h_x. \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} E_x = G\cos U\sin V; \\ E_y = -G\sin U; \\ E_z = -G\cos U\cos V. \end{cases} \quad (15)$$

将式(14)和式(15)分别代入到式(7)和式(13)中可得:

$$\begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & F_z & -F_y & 1 & 0 & 0 \\ -F_z & 0 & F_x & 0 & 1 & 0 \\ F_y & -F_x & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_x \\ h_y \\ h_z \\ v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{bmatrix}. \quad (16)$$

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix} = [{}^1_s\mathbf{R}^T \quad \mathbf{I}] \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \\ F_{x0} \\ F_{y0} \\ F_{z0} \end{bmatrix}. \quad (17)$$

控制机器人进行姿态变换,为避免机器人姿态过于接近而出现奇异矩阵,应控制机器人位姿在笛卡尔空间的三个坐标系下的明显变化(至少有3个末端向量不共面),则可读取到  $N$  组传感器数据,可根据式(18)和式(19)进行下一步计算。

$$\begin{bmatrix} T_{x1} \\ T_{y1} \\ T_{z1} \\ T_{x2} \\ T_{y2} \\ T_{z2} \\ \vdots \\ T_{xN} \\ T_{yN} \\ T_{zN} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & F_{z1} & -F_{y1} & 1 & 0 & 0 \\ -F_{z1} & 0 & F_{x1} & 0 & 1 & 0 \\ F_{y1} & -F_{x1} & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & F_{z2} & -F_{y2} & 1 & 0 & 0 \\ -F_{z2} & 0 & F_{x2} & 0 & 1 & 0 \\ F_{y2} & -F_{x2} & 0 & 0 & 0 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & F_{zN} & -F_{yN} & 1 & 0 & 0 \\ -F_{zN} & 0 & F_{xN} & 0 & 1 & 0 \\ F_{yN} & -F_{xN} & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_x \\ h_y \\ h_z \\ v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{bmatrix}. \quad (18)$$

$$\begin{bmatrix} F_{x1} \\ F_{y1} \\ F_{z1} \\ F_{x2} \\ F_{y2} \\ F_{z2} \\ \vdots \\ F_{xN} \\ F_{yN} \\ F_{zN} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^1_s\mathbf{R}_1^T & \mathbf{I} \\ {}^1_s\mathbf{R}_2^T & \mathbf{I} \\ \vdots & \vdots \\ {}^1_s\mathbf{R}_N^T & \mathbf{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \\ F_{x0} \\ F_{y0} \\ F_{z0} \end{bmatrix}. \quad (19)$$

则上式可简写为

$$\begin{cases} \mathbf{t} = \mathbf{F} \cdot \mathbf{q}; \\ \mathbf{f} = \mathbf{R} \cdot \mathbf{e}. \end{cases} \quad (20)$$

$$\begin{cases} \mathbf{q} = [h_x \ h_y \ h_z \ v_1 \ v_2 \ v_3]^T; \\ \mathbf{e} = [E_x \ E_y \ E_z \ F_{x0} \ F_{y0} \ F_{z0}]. \end{cases} \quad (21)$$

分别左乘矩阵  $\mathbf{F}^T$  和  $\mathbf{R}^T$  得:

$$\begin{cases} \mathbf{q} = (\mathbf{F}^T \mathbf{F})^{-1} \cdot \mathbf{F}^T \mathbf{t}; \\ \mathbf{e} = (\mathbf{R}^T \mathbf{R})^{-1} \cdot \mathbf{R}^T \mathbf{f}. \end{cases} \quad (22)$$

则可求得负载的重力为

$$G = \sqrt{E_x^2 + E_y^2 + E_z^2}. \quad (23)$$

根据上述公式即可推出机器人安装角度

为

$$\begin{cases} U = \arcsin\left(-\frac{E_y}{G}\right); \\ V = \arctan\left(-\frac{E_x}{E_z}\right). \end{cases} \quad (24)$$



2.4 负载重力补偿

若想消除负载重力对力传感器的影响,必须求得负载重力在传感器坐标系下的数据并根据机器人当前姿态进行补偿,已知重力对传感器坐标系的  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  轴的作用力为

$$\begin{bmatrix} G_x \\ G_y \\ G_z \end{bmatrix} = \mathbf{G} \cdot \mathbf{g}_s = {}^s\mathbf{R}^T \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{bmatrix}. \tag{25}$$

再由式(25)可得重力的作用力矩,进而得出可得传感器的实际数据:

$$\begin{cases} F_x = F_{kx} + F_{x0} + G_x; \\ F_y = F_{ky} + F_{y0} + G_y; \\ F_z = F_{kz} + F_{z0} + G_z; \\ T_x = T_{kx} + T_{x0} + T_{gx}; \\ T_y = T_{ky} + T_{y0} + T_{gy}; \\ T_z = T_{kz} + T_{z0} + T_{gz}. \end{cases} \tag{26}$$

至此,求得传感器零点及负载重力的影响,得到了补偿之后的传感器数据。

3 实验及数据分析

实验设备为 KUKA 公司生产的 KR22R16 机器人,如图 3 所示。其额定负载为 22kg,最大工作范围为 1 612 mm,位姿重复精度为  $\pm 0.04$  mm,在其第六轴上通过法兰盘安装六维力传感器。实验中操纵 KUKA 机器人,分别调整到如图 3 所示的位姿,每种位姿下连续采取 800 组传感器数据并计算出平均值。机器人姿态实验数据如表 1 所示, $R_x, R_y, R_z$  分别是机械臂绕  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  轴旋转的三个姿态角,不同姿态对应的传感器数值如表 2 所示。TI 六维力传感器出厂时会自带一个可配置的系统,并且配有 NET Box 保证力传感器与上位机的通讯。传感器的出厂默认 IP 地址为 192. 168. 1. 1,如果需要更改可以在传感器通过 NET Box 连接上位机后在浏览器上直接输入地址。

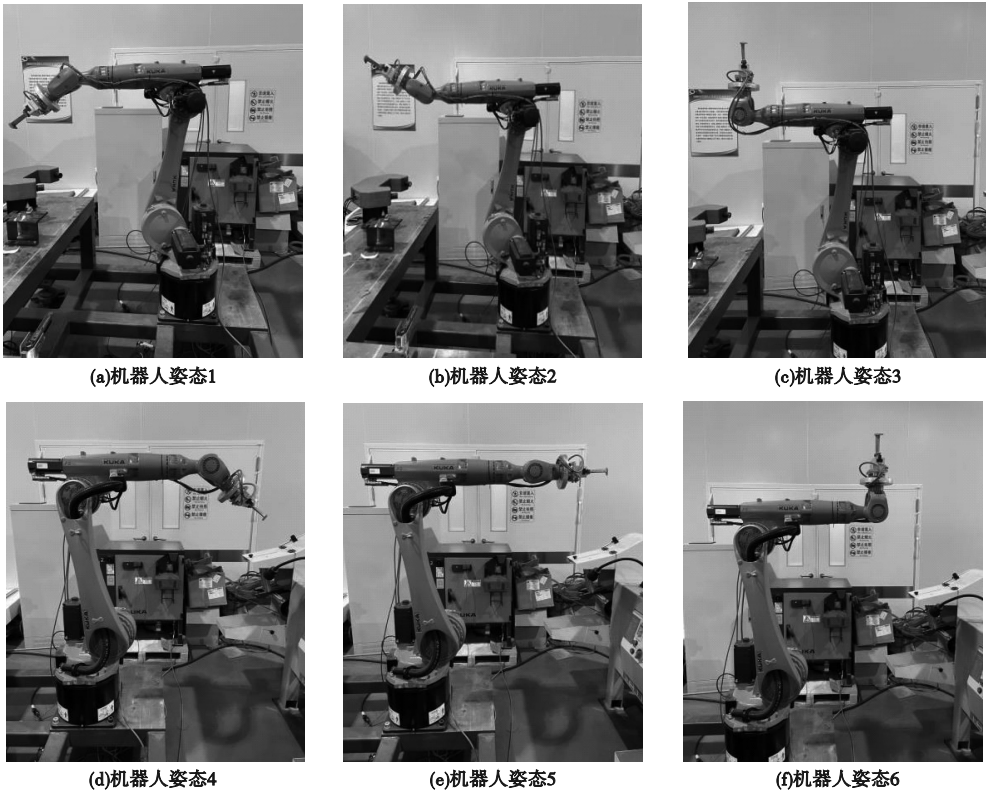


图 3 机器人末端位姿

Fig. 3 The end poses of robot

表 1 机器人姿态

Table 1 The robot attitudes (°)			
序号	$R_x$	$R_y$	$R_z$
1	-160.847	0	-180
2	-8.955	0	180
3	13.854	0	180
4	78.918	-0.713	176.366
5	-79.190	-14.476	-127.375
6	-91.295	2.324	-119.137

表 2 传感器数据

Table 2 The sensor data						
序号	$F_x/N$	$F_y/N$	$F_z/N$	$T_x/(N\cdot m)$	$T_y/(N\cdot m)$	$T_z/(N\cdot m)$
1	0.011 2	2.366 5	0.372 9	0.043 3	0.002 0	0.003 4
2	0.007 7	-7.330	-8.460	0.113 2	0.001 7	0.005 0
3	-1.268	-5.360	-11.86	0.080 8	0.015 1	0.007 9
4	-3.541	0.766 8	-13.44	0.004 3	0.049 3	0.001 9
5	-2.016	7.084 7	-8.633	0.118 5	0.025 9	0.004 4
6	0.165 0	7.436 2	-6.904	0.125 3	0.008 5	0.004 1

测六维力传感器的数据并可以通过编写 C + + 程序进行采集和输出到指定文件。将得到的数据经由卡尔曼滤波算法降噪处理后即可进行计算。由于传感器采集到的数据是在自身坐标系下,笔者假定传感器坐标系与工具坐标系重合。示教器控制机器人变换不同的位姿,保证末端力传感器是在无外力作用下反馈给上位机数据,从而对负载重心坐标和重力大小进行求解。

根据式(9)、式(23)、式(26)可计算出如表 3 所示的传感器零点漂移具体值以及表 4 中的重心坐标( $x,y,z$ )、重力大小以及机器人安装倾角等参数。同时继续采集机器人一般姿态下的传感器数据进行补偿,将所有补偿点拟合后如图 4 所示。经过笔者提出的重力补偿算法计算后,负载重力几乎为 0,证明了算法的有效性。

传感器采用 ATI 公司生产的 9105-NET-DELTA-IP60 六维力传感器,系统包括一个传感器,高柔性屏蔽电缆,智能数据采集系统和 F/T 控制器。力/力矩传感器被广泛应用于各个工业领域,传感器通过 NET Box 及线缆连接到上位机,传感器系统设置和状态监测可以通过状态 LED 和 DIP 开关或通过一个网络浏览器。通过网络浏览器即可实时监

表 3 传感器零点计算值

Table 3 The calculated zero-point of sensor					
$F_{x0}/N$	$F_{y0}/N$	$F_{z0}/N$	$T_{x0}/(N\cdot m)$	$T_{y0}/(N\cdot m)$	$T_{z0}/(N\cdot m)$
4.280	0.902	-13.446	-0.005 446	0.052 712	-0.002 657

表 4 重力参数

Table 4 The gravity parameter					
$G/N$	$x/m$	$y/m$	$z/m$	$M/(^{\circ})$	$N/(^{\circ})$
30.732 5	0.000 7	0.002 1	0.009 1	0.672 0	-0.034 7

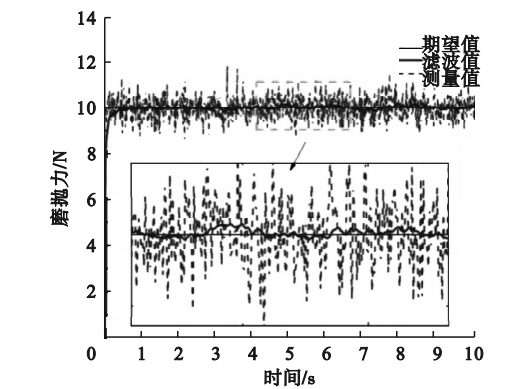


图 4 卡尔曼滤波曲线

Fig. 4 The Kalman filter curve

首先对力传感器传输回上位机的数据进行滤波处理。由图 4 可知,经过滤波之后的数据波动大大减小,最大化消除了噪声对加工过程的影响。传感器各方向的力补偿拟合曲线如图 5 ~ 图 7 所示。由图可知,补偿后的各传感器输出曲线均是一条力值近似为 0 的直线,偏差小于 0.1 N,该数据忽略了重力影响,得到的数据是对重力进行补偿后的传感器力值。

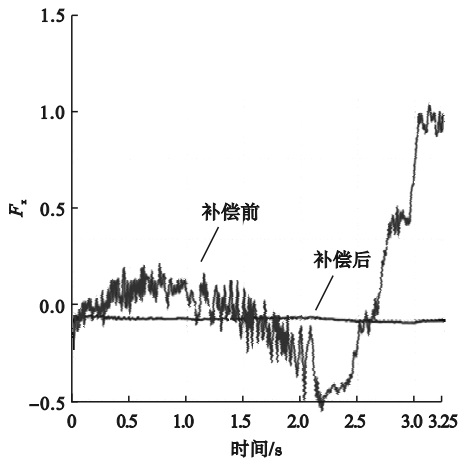


图 5 传感器 X 方向力补偿拟合曲线

Fig. 5 The fitting curve of force compensation in X direction of sensor

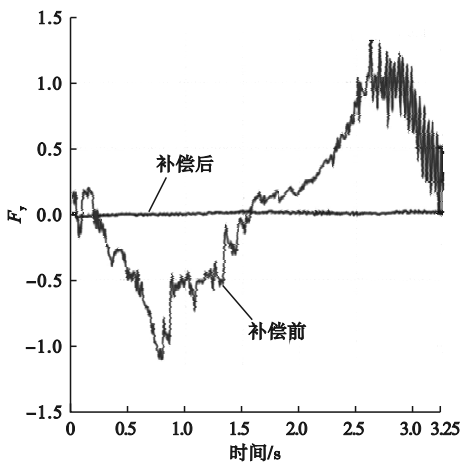


图 6 传感器 Y 方向力补偿拟合曲线

Fig. 6 The fitting curve of force compensation in Y direction of sensor

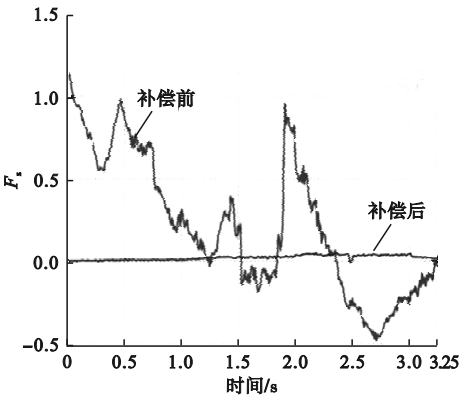


图 7 传感器 Z 方向力补偿拟合曲线

Fig. 7 The fitting curve of force compensation in Z direction of sensor

4 结 论

(1) 针对安装六维力传感器工业机器人磨抛加工需求,提出了一种包含滤波过程的精准化重力补偿算法;通过该算法能够得到机器人时变运动状态下,无重力影响的末端输出力和力矩值。

(2) 采用静态测量的方式,可以增强力传感值和机器人位姿数据采集的同步性和对应性,从而使重力补偿标定结果更加精确。

(3) 动态标定可以提高标定效率,但数据采集的时滞性和力传感器与机器人位姿数据采集的同步性一直是制约机器人重力补偿精度的主要因素,该问题将在后续工作中深入研究。

参考文献

[ 1 ] LEWIS A, HANNAFORD B. Dynamically evaluated gravity compensation for the RAVEN surgical robot [C]//IEEE international conference on robotics and automation (ICRA). HongKong, China: IEEE, 2014: 2534 – 2539.

[ 2 ] MASSA G, CALLEGARI M, CRISTALLI C. Manual guidance for industrial robot programming [J]. Industrial robot, 2015, 42 (5): 457 – 465.

[ 3 ] 王彬. 基于视觉和力觉的机器人智能抓取与柔顺放置技术研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2020.

(WANG Bin. Research on robot intelligent grasping



- and flexible placement technology based on vision and force sense [D]. Changchun: Jilin University, 2020. )
- [4] BOISCLAIR J, RICHARD P, LALIBERT T. Gravity compensation of robotic manipulators using cylindrical halbach arrays [J]. IEEE/ASME transactions on mechatronics, 2017, 22: 457–464.
- [5] DU H P, SUN Y W, FENG D Y, et al. Automatic robotic polishing on titanium alloy parts with compliant force/position control [J]. Journal of engineering manufacture, 2015, 229(7): 1180–1192.
- [6] 高强, 田凤杰, 杨林, 等. 机器人自动研抛系统平台搭建及重力补偿研究 [J]. 工具技术, 2015, 49(8): 47–50.  
(GAO Qiang, TIAN Fengjie, YANG Lin, et al. Research on platform of robot automatic polishing system and gravity compensation [J]. Tool engineering, 2015, 49(8): 47–50. )
- [7] 魏秀权, 吴林, 高洪明, 等. 遥控焊接工具装配力控制的重力补偿算法 [J]. 焊接学报, 2009, 30(4): 109–112.  
(WEI Xiuquan, WU Lin, GAO Hongming, et al. Research on gravity compensation algorithm for tool-assembling with force control in remote welding [J]. Transactions of the China welding institution, 2009, 30(4): 109–112. )
- [8] 张婷, 徐建明, 董建伟. 一种具有重力补偿的串联弹性执行器接触力控制方法 [J]. 计算机测量与控制, 2019, 27(9): 90–94.  
(ZHANG Ting, XU Jianming, DONG Jianwei. Contact force control method for series elastic actuators with gravity compensation [J]. Computer measurement & control, 2019, 27(9): 90–94. )
- [9] ZHANG L J, HU R Q, YI W M. Research on force sensing for the end-load of industrial robot based on a 6-axis force/torque sensor [J]. Acta automatica sinica, 2017, 43(3): 439–447.
- [10] YU Chenglong, LI Zhiqi, LIU Hong. Research on gravity compensation of robot arm based on model learning [C]//IEEE/ASME international conference on advanced intelligent mechatronics (AIM). Hongkong, China: IEEE, 2019: 8868673.
- [11] 林君健. 基于力传感器的工业机器人主动柔顺装配系统研究 [D]. 广州: 华南理工大学.  
(LIN Junjian. Research in active compliant assembly system for industrial robot with force sense [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013. )
- [12] YANG C, ZHENG J, REN X, et al. Multi-sensor Kalman filtering with intermittent measurements [J]. IEEE transactions on automatic control, 2018, 63(3): 797–804.
- [13] QI Ruolong, TANG Yuanguai, ZHANG Ke. On-line self-calibration method for unattended manipulators based on Gaussian motion model and visual system [J]. Industrial robot, 2021, 48(2): 300–312.
- [14] 王志军, 刘璐, 李占贤, 等. 基于六维力传感器的机器人动态力补偿研究 [J]. 机械设计, 2020, 37(11): 72–77.  
(WANG Zhijun, LIU Lu, LI Zhanxian, et al. Research on robot dynamic force compensation based on six-dimensional force sensor [J]. Journal of machine design, 2020, 37(11): 72–77. )
- [15] YI J X, WAN X R, LI D S. Exactly decoupled Kalman filtering for multitarget state estimation with sensor bias [J]. IEEE transactions on aerospace and electronic systems, 2019, 56(3): 2256–2271.
- [16] CAI J Q, LEI T. An autonomous positioning method of tube-to-tubesheet welding robot based on coordinate transformation and template matching [J]. IEEE robotics and automation letters, 2021, 6(2): 787–794.
- [17] MONTALVO W, ESCOBAR-NARANJO J, GARCIA C A, et al. Low-cost automation for gravity compensation of robotic arm [J]. Applied sciences, 2020, 10(11): 3823.
- [18] 黄玲涛, 王彬, 倪水, 等. 基于力传感器重力补偿的机器人柔顺控制研究 [J]. 农业机械学报, 2020, 51(3): 386–393.  
(HUANG Lingtao, WANG Bin, NI Shui, et al. Robotic compliant control based on force sensor gravity compensation [J]. Transactions of the Chinese society for agricultural machinery, 2020, 51(3): 386–393. )
- [19] NGUYEN V L, KUO C H, LIN C Y. Gravity compensation design of planar articulated robotic arms using the gear-spring modules [J]. Journal of mechanisms and robotics, 2019, 12(3): 1–35.  
(责任编辑: 刘春光 英文审校: 范丽婷)