

DOI: 10.13382/j.jemi.B2003566

工业机器人六维力传感器在线标定方法研究*

张春涛 王 勇

(合肥工业大学 机械工程学院 合肥 23000)

摘 要: 针对工业机器人实时检测末端执行器工作受力情况的需求,提出一种工业机器人六维力传感器在线标定方法。首先,建立传感器数据关系计算模型,并在此基础上重点考虑传感器“零漂”引起的干扰;然后,采用最小二乘法确定机器人底座安装倾角、末端执行器重力及重心坐标参数;最后,根据机器人实时运动学参数,采用时间序列方法在线补偿末端执行器重力和传感器零点偏移。实验表明在线标定方法对比静态标定方法可完全消除传感器“零漂”引起的干扰,具有较好的在线补偿效果。通过对工业机器人末端执行器受到的外部恒力和变力进行实时跟踪检测,验证了算法的有效性和实用性。

关键词: 工业机器人; 六维力传感器; 零点补偿; 在线标定

中图分类号: TN06; TP242 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.8050

Research on online calibration method of six-axis force sensor for industrial robot

Zhang Chuntao Wang Yong

(College of Mechanical Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 23000, China)

Abstract: An online calibration method of a six-axis force sensor for the industrial robot was proposed based on the requirement of real-time detecting of end effector working force of industrial robots. First, establish a calculation model of a sensor data relationship, and on this basis, focus on the interference caused by the sensor's "zero drift". Then, the least square method was used to identify the base angle, end effector weight and barycenter coordinate parameters of the robot. Finally, according to the real-time kinematic parameters of the robot, the time series method was utilized to compensate for the weight of the end effector and the zero of the sensor online. Experiments show that the online calibration method can eliminate the interference caused by the "zero drift" of the sensor compared with the static calibration method, and have a better online compensation effect. Through real-time tracking detection of the external constant and variable forces received by the end-effector of the industrial robot, the validity and practicability of the algorithm are verified.

Keywords: industrial robots; six-axis force sensor; zero compensation; online calibration

0 引 言

随着机器人技术的快速发展,机器人已经应用到很多高精度加工的场景,例如采用工业机器人用于完成钻铆、装配、搬运、打磨、拖动示教等^[1-5]任务,而这就要求精确监测机器人末端与环境之间的接触力。机器人在腕部安装六维力传感器能够实时检测大小和方向不断变化的三维力和三维力矩的信息,精确感知机器人末端执行器与外界环境的接触力,机器人控制系统从而能及时修正

机器人的运动和控制^[6-9]。为精确得到机器人与环境之间接触力,需要重点分析机器人作业时末端执行器的姿态变化导致其重力分量变化和传感器的零点以及“零漂”带来的影响。

很多学者对工业机器人六维力传感器标定方法进行研究,文献[10]通过机器人连杆的变换矩阵和静力学关系变换,获取工具重力分量对六维力传感器数值的影响,但未考虑机器人底座安装角和力传感器零点数据对传感器数据的影响。文献[11-12]假定负载的重量与重心位置已知,根据机器人姿态实时计算重力并补偿对六维力

收稿日期: 2020-10-22 Received Date: 2020-10-22

* 基金项目: 国家自然科学基金(U1713210)项目资助

传感器力与力矩值的影响。文献[13-14]默认重力方向与机器人基座坐标系的 z 轴方向相反,调整机器人特定姿态测定负载重力大小和标定传感器的安装角度,也未考虑机器人的底座安装角带来的影响。文献[15]在重力补偿中考虑机器人的安装姿态,采用最小二乘法求得机器人的安装倾角、负载重力及重心坐标等参数,但未考虑传感器的零点带来的影响。文献[16-17]在静态模式下采用不同机器人末端姿态下的六维力传感器采集数据求解传感器零点、机器人安装倾角、负载重力与负载重心坐标等参数,标定效果较好。文献[18]提出基于极大似然估计的在线标定算法,考虑在不同运行速度下重力与末端工具惯性力的影响,实现机器人在高速运动情况下工业机器人腕部六维力传感器在线标定。

上述的方法大多采用静待标定的方法,经过实验获得末端执行器的重力参数和传感器零点数据。但六维力传感器存在“零漂”现象,其静态标定精度虽高,但只能表征当前通电状态下传感器的零点数据值,不适用于末端执行器的拆装、传感器多次重新上电以及环境变化频繁等应用工况。针对工业机器人末端配置的六维力传感器在复杂工况下对外力感知的需求,重点考虑传感器“零漂”引起的干扰,根据系统力学求解机器人底座安装倾角、末端执行器重力及重心坐标参数,在线补偿末端执行器重力和传感器零点漂移,精确获取机器人末端执行器所受到的外力。

1 计算模型的建立

1.1 传感器的数据关系

六维力传感器能够测量空间中任意力系中的三维正交力和三维正交力矩^[19]。机器人处于中低速运动或者静态条件下,机器人末端安装的六维力传感器测得的力与力矩数据 $[F_x \ F_y \ F_z \ M_x \ M_y \ M_z]^T$ 由 3 部分组成。1) 传感器自身系统误差,为空载状态下的读数并不为零,假定传感器自身的系统误差为常数,称之为“零点”,因传感器存在“零漂”现象,其值不恒定,表示为 $[F_{0x} \ F_{0y} \ F_{0z} \ M_{0x} \ M_{0y} \ M_{0z}]^T$ 。2) 末端执行器的自身重力,传感器连接的末端执行器的重力对六维力传感器的重力作用,其值会随着末端执行器的姿态而变化,表示为 $[F_{Gx} \ F_{Gy} \ F_{Gz} \ M_{Gx} \ M_{Gy} \ M_{Gz}]^T$ 。3) 机器人末端执行器所受外部力,为六维力传感器所检测到的力的相对输出,表示为 $[F_{ex} \ F_{ey} \ F_{ez} \ M_{ex} \ M_{ey} \ M_{ez}]^T$ 。则工业机器人配置的六维力传感器检测的力与力矩表示如下:

$$\begin{cases} F_x = F_{0x} + F_{Gx} + F_{ex} \\ F_y = F_{0y} + F_{Gy} + F_{ey} \\ F_z = F_{0z} + F_{Gz} + F_{ez} \\ M_x = M_{0x} + M_{Gx} + M_{ex} \\ M_y = M_{0y} + M_{Gy} + M_{ey} \\ M_z = M_{0z} + M_{Gz} + M_{ez} \end{cases} \quad (1)$$

1.2 模型坐标系的建立

1) 机器人的安装姿态,表示机器人基坐标系 B 相对世界坐标系 G 的旋转矩阵。世界坐标系定义为 $O X_0 Y_0 Z_0$,令 Z_0 轴方向垂直向上,机器人基坐标系定义为 $O_0 X_1 Y_1 Z_1$, B 与 G 的原点重合。世界坐标系 G 通过先绕 Y_0 轴旋转 V ,再绕当前 X_0 轴旋转 U 变换到基坐标系 B ,姿态变换矩阵可表示为^[20]:

$${}^G_B R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos U & -\sin U \\ 0 & \sin U & \cos U \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos V & 0 & \sin V \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin V & 0 & \cos V \end{bmatrix} \quad (2)$$

2) 机器人的末端执行器的姿态,表示机器人末端执行器坐标系 T 相对于基坐标系 B 的旋转矩阵。工业机器人的连杆长度以及偏距等可以测量,关节角度可由机器人控制系统直接得到,假定机器人第 6 关节的姿态与末端执行器姿态一致,可由正运动学通式求解末端执行器的姿态。

3) 传感器的安装姿态,表示六维力传感器安装坐标系 S 相对于末端执行器坐标系 T 的旋转矩阵。需要考虑到六维力传感器与末端执行器安装的结构,两个坐标系的 z 轴一般情况下为共线,相应的六维力传感器的坐标轴方向可根据出厂参数查询获取。

根据转换矩阵的复合变换关系得到传感器坐标系 S 相对世界坐标系 G 的旋转矩阵为:

$${}^G_S R = {}^G_B R \cdot {}^B_T R \cdot {}^T_S R \quad (3)$$

1.3 参数求解过程

末端执行器的重力为 G ,在世界坐标下其分力表示为:

$$\begin{cases} {}^G F_G = [0 \ 0 \ -G] \\ {}^G M_G = [0 \ 0 \ 0] \end{cases} \quad (4)$$

根据机器人静力的笛卡尔变换关系^[21]可得力和力矩在 G 、 S 两个坐标系的转换关系:

$$\begin{bmatrix} {}^S F_S \\ {}^S M_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^S R & \mathbf{0} \\ {}^S P_G \times {}^S R & {}^S R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^G F_G \\ {}^G M_G \end{bmatrix} \quad (5)$$

${}^S F_S$ 和 ${}^S M_S$ 分别为末端执行器的重力在传感器坐标系 S 下力与力矩的分量, ${}^S P_G \times$ 为末端执行器在传感器坐标系下的重心坐标。

$${}^S P_G \times = \begin{bmatrix} 0 & -p_z & p_y \\ p_z & 0 & -p_x \\ -p_y & p_x & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

式(5)化简为:

$$\begin{cases} {}^S F_S = {}^S R \cdot {}^G F_G \\ {}^S M_S = {}^S P_G \times {}^S R \cdot {}^G F_G \end{cases} \quad (7)$$

进一步化简:

$${}^S M_S = {}^S P_G \times {}^S F_G \quad (8)$$

$$\begin{cases} M_{Gx} = G_x \times p_y - G_y \times p_z \\ M_{Gy} = G_x \times p_z - G_z \times p_x \\ M_{Gz} = G_y \times p_x - G_x \times p_y \end{cases} \quad (9)$$

按照文献[16-17]的方法 联立式(9)和(1)可得:

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & F_z & -F_y \\ 0 & 1 & 0 & -F_z & 0 & F_x \\ 0 & 0 & 1 & F_y & -F_x & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ k_3 \\ p_x \\ p_y \\ p_z \end{bmatrix} \quad (10)$$

式(10)化简为:

$$M_S = F \cdot P \quad (11)$$

中间变量 k_1, k_2, k_3 分别定义如下:

$$\begin{cases} k_1 = M_{0x} + F_{0y} \times z - F_{0z} \times y \\ k_2 = M_{0y} + F_{0z} \times z - F_{0x} \times y \\ k_3 = M_{0z} + F_{0x} \times z - F_{0y} \times y \end{cases} \quad (12)$$

$F(N)$ 和 $M_S(N)$ 表示为机器人末端执行器的姿态变换 $N(N \geq 3)$ 次采样得到传感器力和传感器力矩的数据堆叠量 采用最小二乘法辨识 P :

$$P = (F(N)^T F(N))^{-1} F(N)^T M_S(N) \quad (13)$$

式(13)计算出末端执行器的重心坐标(p_x, p_y, p_z)和中间变量 k_1, k_2, k_3 。

根据式(1)和(5)有:

$${}^S F_S = {}^G R^T \cdot {}^G F_G = {}^S R^T \cdot {}^B R^T \cdot {}^G R^T \cdot {}^G F_G = {}^S R^T \cdot {}^B R^T \cdot \begin{bmatrix} G \cos U \sin V \\ -G \sin U \\ -G \cos U \cos V \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix} = {}^S R^T \cdot {}^B R^T \cdot \begin{bmatrix} G \cos U \sin V \\ -G \sin U \\ -G \cos U \cos V \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} F_{0x} \\ F_{0y} \\ F_{0z} \end{bmatrix} \quad (15)$$

进一步化简为:

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix} = [{}^S R^T \cdot {}^B R^T \quad I] \cdot \begin{bmatrix} k_4 \\ k_5 \\ k_6 \\ F_{x0} \\ F_{y0} \\ F_{z0} \end{bmatrix} \quad (16)$$

简化为:

$$F_S = R \cdot Q \quad (17)$$

中间变量 k_4, k_5, k_6 分别定义如下:

$$\begin{cases} k_4 = G \cos U \sin V \\ k_5 = -G \sin U \\ k_6 = -G \cos U \cos V \end{cases} \quad (18)$$

$F_S(N)$ 和 $R(N)$ 表示为机器人末端执行器姿态变换 $N(N \geq 3)$ 次采样得到传感器力和机器人关节角度的数据堆叠量 采用最小二乘法辨识 Q :

$$Q = (R(N)^T R(N))^{-1} R(N)^T F_S(N) \quad (19)$$

可由式(19)计算出 k_4, k_5, k_6 , 由式(2)和(18)可计算末端执行器的重力 G 和机器人底座的安装角(U, V) 分别为:

$$G = \sqrt{k_4^2 + k_5^2 + k_6^2} \quad (20)$$

$$\begin{cases} U = \arcsin(-\frac{k_5}{G}) \\ V = \arctan(-\frac{k_4}{k_6}) \end{cases} \quad (21)$$

机器人的本体和末端工具安装好后,其末端工具的重力 G 、重心(p_x, p_y, p_z)和机器人的安装角度(U, V)均为恒定值 则需要进行末端执行器的重力和传感器零点的在线补偿。

2 基于时序控制的在线补偿方法

为避免六维力传感器因发生“零漂”而导致机器人末端受力感知不精确 采用时序控制的方法在线补偿末端执行器重力和六维力传感器零点数据。在保持机器人末端执行器与环境未发生接触情况下,时序控制在线补偿将六维力传感器标定时段分为传感器零点标定时段 $0 \sim T_1$ 、末端执行器重力与零点补偿时段 $T_1 \sim T_2$ 进行处理 处理流程如1所示。首先在时段 $0 \sim T_1$ 内的某个采样时刻 t 控制机器人自由运动,由机器人控制器可获得关节变量为 $[\theta_1(t) \ \theta_2(t) \ \theta_3(t) \ \theta_4(t) \ \theta_5(t) \ \theta_6(t)]^T$ 实时计算出 ${}^S R(t)$, 六维力传感器采样的力和力矩数据为 $[F(t) \ M(t)]^T$ 末端执行器重力补偿值 $[F_c(t) \ M_c(t)]^T$ 为:

$$\begin{bmatrix} F(t) \\ M(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^S F_c(t) \\ {}^S M_c(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} F_0(t) \\ M_0(t) \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$\begin{bmatrix} {}^s F_c(t) \\ {}^s M_c(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^s R(t) & \mathbf{0} \\ {}^s P_c \times {}^s R(t) & {}^s R(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^c F_c \\ {}^c M_c \end{bmatrix} \quad (23)$$

假定传感器每次通电后的零点数据经过一段时间波动后为恒定值 $[F_0 \ M_0]^T$, 注意因传感器“零漂”影响, 每次开机稳定的零点数据均不一样。定义本次上电后传感器的零点数据为 $[F_0(t) \ M_0(t)]^T$, 则有:

$$\begin{bmatrix} F_0(t) \\ M_0(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F(t) \\ M(t) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} F_c(t) \\ M_c(t) \end{bmatrix} \quad (24)$$

然后, 在末端执行器重力和零点补偿时段 $T_1 \sim T_2$ 内某时刻 k 控制机器人自由运动, 机器人的关节变量为 $[\theta_1(k) \ \theta_2(k) \ \theta_3(k) \ \theta_4(k) \ \theta_5(k) \ \theta_6(k)]^T$, 实时计算 ${}^s R(t)$ 在线计算末端执行器的重力补偿数据为 $[F_c(k) \ M_c(k)]^T$ 根据前述传感器的零点为恒定值 $[F_0 \ M_0]^T$ 有:

$$\begin{bmatrix} {}^s F_c(k) \\ {}^s M_c(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^s R(k) & \mathbf{0} \\ {}^s P_c \times {}^s R(k) & {}^s R(k) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^c F_c \\ {}^c M_c \end{bmatrix} \quad (25)$$

$$\begin{bmatrix} F(k) \\ M(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^s F_c(k) \\ {}^s M_c(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} F_0 \\ M_0 \end{bmatrix} \quad (26)$$

最后, 可根据在线补偿结果, 实现对外部力/力矩进行精确检测。定义 k 采样时刻六维力传感器检测到相对的外部力和力矩为 $[F_e(k) \ M_e(k)]^T$, 由式(1)、(23)有:

$$\begin{bmatrix} F_e(k) \\ M_e(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F(k) \\ M(k) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} F_c(k) \\ M_c(k) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} F_0 \\ M_0 \end{bmatrix} \quad (27)$$

为确保传感器检测的数据更加精确, 将 T_2 时段后检测到的传感器数据作为有效数据。六维力传感器在多次重复上电复位情况下, 机器人的末端执行器位姿如何变化, 末端执行器的重力和传感器零点都将实时补偿, 传感器检测值与补偿值几乎相等, 并持续更新并输出 $[F_e \ M_e]^T$ 。由于机器人机构存在一定的机械偏差, 末端执行器的重心和重力采用最小二乘法拟合而来, $[F_e \ M_e]^T$ 始终趋近于为 0 附近稳定, 也可以称为补偿误差。

3 实验及分析

3.1 实验平台

本实验采用 SRI 6 轴力/力矩传感器 F_x 、 F_y 、 F_z 的测量范围为 500 N, M_x 、 M_y 、 M_z 测量范围为 12 N·m, 重复性误差为 0.05%, 采用 SRI 的 M8128 采集卡实现传感器的信号激励、放大、调理、A/D 转换。工业机器人六维力传感器系统如图 2 所示, 控制系统采用北京灵思创奇科技有限公司的嵌入式工控机, 其 CPU 配置为 Intel i7-2600, 主频 3.4 GHz, 运行 VxWork 实时操作系统。工控机与传感器、机器人伺服驱动之间使用 EtherCAT 总线进行通信, 工控机每 2 ms 读取传感器数据值、机器人关节位置、

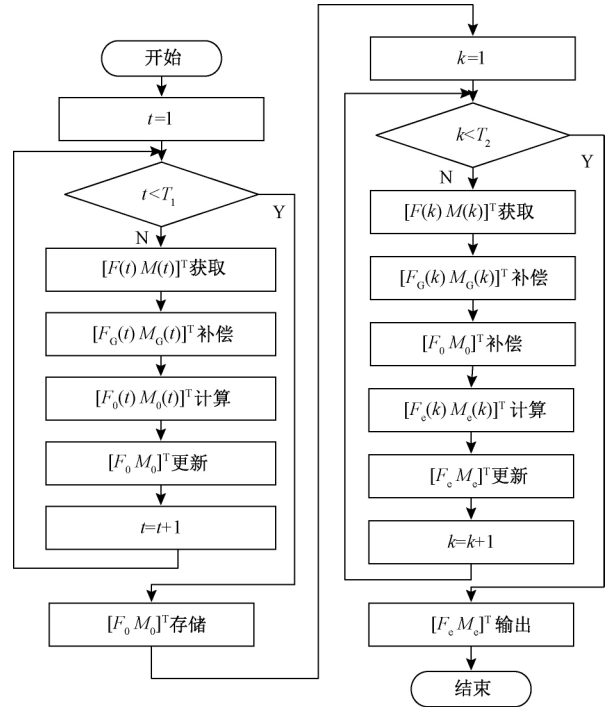


图 1 时序控制在在线补偿流程

Fig.1 Flow chart of time series control online compensation

电流值及发送驱动器控制指令等。工业机器人采用交流伺服电机驱动, 机器人的 D-H 参数如表 1 所示。机器人控制与六维力传感器在线标定算法基于 MATLAB 和 Simulink 开发, 所设计的算法可直接由 Simulink 编译通过并生成 C 代码下载到嵌入式工控机实现程序功能。



图 2 工业机器人六维力传感器系统

Fig.2 Industrial robot six-axis force sensor system

3.2 实验结果分析

1) 在线标定方法的有效性验证

按照文献[15-16]的方法, 随机重新上电采集传感器数据并计算零点数据, 并测试 50 组零点数据。分别求出每个力和力矩分量数据序列中最大值与最小值的差 ε 、

标准差 σ , 平均值 a 结果如表 2 所示, 其中变化范围最大的 F_{0x} 的零点漂移误差数据统计信息如图 3 所示, 最大误差约 1 N。因此, 对于采用静态标定方法得到的零点数据只能表征本次上电测试的结果, 多次上电复位数据会因“零漂”干扰导致数据波动范围较大, 进而影响传感器的力/力矩检测。而基于时序控制的在线补偿方法的主要影响因素是末端执行器重力、重心和机器人安装倾角, 不会涉及到传感器零点的辨识和计算, 可完全消除六维力传感器因“零漂”导致数据不准确的干扰。

表 1 机器人 D-H 参数

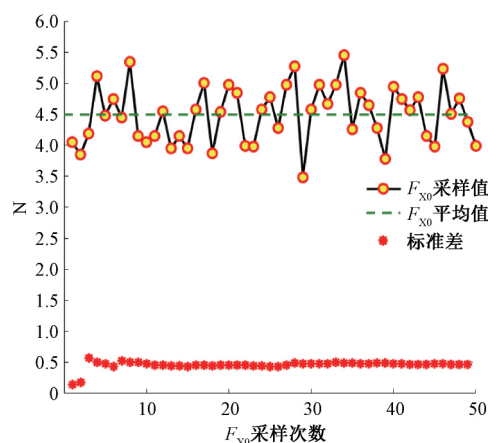
Table 1 The D-H parameters of the robot

关节轴	θ_i	d_i/m	a_i/m	α_i
1	θ_1	0.320 0	0.049 9	$-\pi/2$
2	θ_2	0	0.270 0	0
3	θ_3	0	0.070 4	$-\pi/2$
4	θ_4	0.299 1	0	$\pi/2$
5	θ_5	0	0	$-\pi/2$
6	θ_6	0.078 5	0	0

表 2 传感器零点漂移误差数据统计信息

Table 2 Sensor zero drift error data statistics

项目	F_{0x}	F_{0y}	F_{0z}	M_{0x}	M_{0y}	M_{0z}
极值 ε	1.98	1.05	0.86	0.01	0.01	0.01
平均值 a	4.498	-2.706	38.13	-0.246	-0.183	0.098
标准差 σ	0.462	0.264	0.153	0.005	0.005	0.005

图 3 F_{0x} 零点漂移误差Fig.3 F_{0x} zero drift error

为验证在线标定方法的有效性, 采样机器人末端 17 次不同姿态的力传感器数据进行计算和处理, 得到机器人底座安装倾角为 $U=0.105^\circ$, $V=0.125^\circ$, 末端执行器重力 $G=4.3053\text{ N}$, 重心 (p_x, p_y, p_z) 为 $[0.0037 \ -0.0001 \ -0.0753]^\text{T}$ 。

在此基础上, 控制机器人末端姿态进行大范围变化, 获得当前的力/力矩输出和补偿结果如图 4 所示。图 4 中将 T_1 设置为第 10 s, 将 T_2 设置为第 11 s, 并在 11 s 控制机器人的末端姿态由 $\alpha=180^\circ, \beta=0^\circ, \gamma=0^\circ$ 连续变为 $\alpha=120^\circ, \beta=30^\circ, \gamma=30^\circ$, 传感器的测量力/力矩输出值为 $[F_{sy} \ F_{sy} \ F_{sz} \ M_{sx} \ M_{sx} \ M_{sz}]^\text{T}$, 重力与传感器零点补偿之和为 $[F_{ex} \ F_{cy} \ F_{cz} \ M_{cx} \ M_{cy} \ M_{cz}]^\text{T}$, 测量值与补偿值对称分布在采样时间轴两侧, 误差结果表示为 $[F_{ex} \ F_{ey} \ F_{ez} \ M_{ex} \ M_{ey} \ M_{ez}]^\text{T}$, 与时间轴几乎重合, 可见在线补偿效果较好。

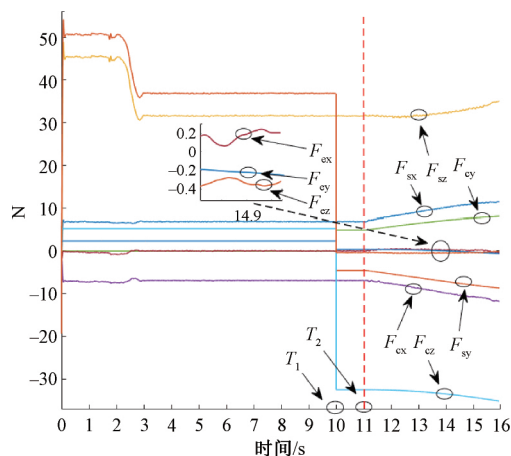
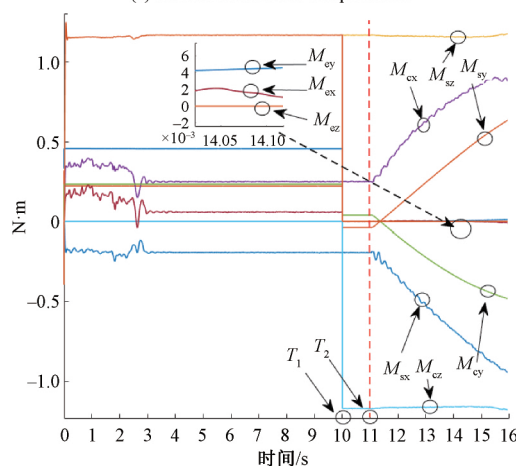
(a) 力的检测与补偿
(a) Force detection and compensation(b) 力矩的检测与补偿
(b) Torque detection and compensation

图 4 传感器的力/力矩补偿效果

Fig.4 The effect of force/torque compensation of the sensor

2) 末端执行器检测外力效果验证

为测试算法的实用性, 在传感器多次开机的情况下, 控制机器人末端执行器在平面上进行打磨实验, 测试传感器检测外力的效果。末端执行器定义 z 方向为力控制, x, y 方向为位置控制, 控制方法为基于速度伺服的力/位混合控制。在传感器预热启动后 $0 \sim T_1(10\text{ s})$ 进行传感器零点标定, $T_1(10\text{ s}) \sim T_2(11\text{ s})$ 进行末端执行器和

传感器零点补偿, T_3 (25 s) 机器人开始进行打磨, T_4 (53 s) 停止打磨。分别设定末端执行器 z 轴方向施加恒力 27.8 N 和变力 $(27.8 + 5\sin t)$ N, 假定机器人末端执行器控制输出力与打磨平面的反作用力的大小相等。采用六维力传感器跟踪检测力控制输出力的大小, 验证末端执行器外力检测效果, 具体如图 5 所示。图 5 中打磨刚开始时产生一定的冲击, 数据有一定波动, 随着机器人力/位混合的有效控制, 传感器检测值在力控制输出值上下波动并趋于稳定, 检测效果较好。因此, 在机器人中低速状态下, 六维力传感器在线标定方法能够实时检测机器人末端受到的外力。

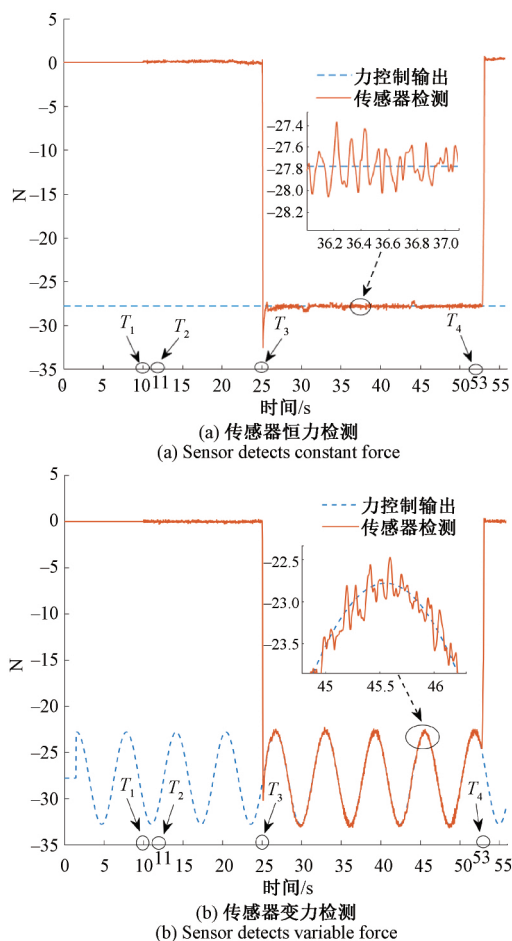


图 5 末端执行器外力检测效果

Fig.5 The effect of end effector force detection

4 结 论

针对工业机器人实时检测末端执行器受力情况的需求, 提出一种工业机器人六维力传感器在线标定方法。重点考虑传感器零点漂移引起的干扰, 根据系统力学采用最小二乘法求解机器人底座安装倾角、末端执行器重力及重心坐标参数, 采用时序控制方法在线补偿末端执

行器重力和传感器零点。通过对比实验表明在线标定方法可完全消除末端执行器重力和传感器零点变化引起的干扰, 并对工业机器人末端受到的恒力和变力进行实时跟踪检测, 验证算法的有效性和实用性。

参考文献

- [1] 韦溟, 张丽艳. 机器人自动钻铆系统的现场快速自定位方法[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(6): 66-75.
WEI M, ZHANG L Y. Fast on-site self-positioning method for robot automatic drilling and riveting system[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2020, 41(6): 66-75.
- [2] ZHOU H B, WU Q. Decomposition-based bi-objective optimization for sustainable robotic assembly line balancing problems [J]. Journal of Manufacturing Systems, 2019, 55: 30-43.
- [3] 贾林, 王耀南, 何静, 等. 自由曲面打磨机器人非奇异终端滑模阻抗控制[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(5): 89-96.
JIA L, WANG Y N, HE J, et al. Non-singular terminal sliding mode impedance control of free-form surface grinding robot[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(5): 89-96.
- [4] 罗坚铭, 陈新度, 吴磊. 移动机器人高精度上下料的研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(11): 187-193.
LUO J M, CHEN X D, WU L. Research on high precision loading and unloading of mobile robot [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2018, 32(11): 187-193.
- [5] 赵艺兵, 王振豪, 倪银堂, 等. 拖动示教教学机器人研究与设计[J]. 实验技术与管理, 2020, 37(6): 128-131, 175.
ZHAO Y B, WANG ZH H, NI Y T, et al. Research and design of dragging instructional teaching robot [J]. Experimental Technology and Management, 2020, 37(6): 128-131, 175.
- [6] 陈望隆, 杨述焱, 胡权, 等. 面向运动力学测量的无线六维力传感器[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(4): 129-136.
CHEN W L, YANG SH Y, HU Q, et al. Wireless six-dimensional force sensor for motion mechanics measurement [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(4): 129-136.
- [7] 姚建涛, 阮豪奇, 蔡大军, 等. 冗余正交式六维力感知机构性能分析与实验研究[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(1): 162-169.
YAO J T, RUAN H Q, CAI D J, et al. Performance

- analysis and experiment study of redundant orthogonal six-dimensional force sensing mechanism [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument 2020 , 41(1) : 162-169.
- [8] CHIAPPINI A , TREJO-GARCIA P M , CARPENTIERO A , et al. Assessment of the mechanical and optical properties of buckling periodic elastic materials as optical force sensors [J]. Optical Materials , 2020 , DOI: 10. 1016/j.optmat.2020. 110507.
- [9] 王志军 韩静如 李占贤,等. 机器人运动中六维力传感器的重力补偿研究[J].机械设计与制造 ,2018(7) : 252-255.
- WANG ZH J , HAN J R , LI ZH X , et al. Research on the gravity compensation of six-axis force sensor in the movement of robot [J]. Machinery Design & Manufacture , 2018(7) : 252-255.
- [10] KUBELA T , POCHLY A , SINGULE V , et al. Force-torque control methodology for industrial robots applied on finishing operations [C]. Mechatronics: Recent Technological and Scientific Advances. Berlin: Springer-Verlag , 2012: 429-437.
- [11] 张光辉 王耀南.末端 F/T 传感器的重力环境下大范围柔顺控制方法[J].智能系统学报 ,2015 ,10(5) : 675-683.
- ZHANG G H , WANG Y N. A wide range compliance control method in gravity environment based on end force/torque sensor[J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems. 2015 , 10(5) : 675-683.
- [12] DU H P , SUN Y W , FENG D Y , et al. Automatic robotic polishing on titanium alloy parts with compliant force/position control [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers , Part B: Journal of Engineering Manufacture , 2015 229(7) : 1180-1192.
- [13] 盛国栋 曹其新 潘铁文,等.主从式机器人系统中力反馈的实现[J].中国机械工程 ,2015 ,26(9) : 1157-1160 ,1166.
- SHENG G D , CAO Q X , PAN T W , et al. Implementation of force feedback in master-slave robot systems [J]. China Mechanical Engineering , 2015 , 26(9) : 1157-1160 ,1166.
- [14] 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 Q , TIAN F J , YANG L , et al. Research on platform of robot automatic polishing system and gravity compensation [J]. Tool Engineering , 2015 , 49 (8) : 47-50.
- [15] 李占贤 韩静如 王志军,等.机器人力觉示教的力控制及仿真分析[J].机械设计与制造 ,2019(2) : 246-248 252.
- LI ZH X , HAN J R , WANG ZH J , et al. Analysis of the force control and simulation of robot force teaching [J]. Machinery Design & Manufacture , 2019 (2) : 246-248 252.
- [16] 张立建 胡瑞钦 易旺民.基于六维力传感器的工业机器人末端负载受力感知研究[J].自动化学报 ,2017 ,43(3) : 439-447.
- 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.
- [17] 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 L T , WANG B , NI SH , 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.
- [18] 刘运毅 黎相成 黄约,等.基于极大似然估计的工业机器人腕部 6 维力传感器在线标定[J].机器人 ,2019 ,41(2) : 216-221 231.
- LIU Y Y , LI X CH , HUANG Y , et al. Online calibration for the 6-axis force sensor in the wrist of industrial robot based on maximum likelihood estimation [J]. Robot , 2019 41(2) : 216-221 231.
- [19] 韩康 陈立恒 李行,等.高灵敏度大量程六维力传感器设计[J].仪器仪表学报 ,2019 ,40(9) : 61-69.
- HAN K , CHEN L H , LI H , et al. Design of a six-axis force sensor with large range and high sensitivity [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument , 2019 , 40(9) : 61-69.
- [20] 刘春 余立强.基于工业机器人的机身系统件定位方法研究[J].航空制造技术 ,2014(21) : 122-124.
- LIU CH , YU L Q. Research on positioning method of fuselage system component based on industrial robot [J]. Aeronautical Manufacturing Technology , 2014 (21) : 122-124.
- [21] 荣誉 金振林 曲梦可.三自由度并联机械腿静力学分析与优化[J].农业工程学报 ,2012 ,28(20) : 41-49.
- RONG Y , JIN ZH L , QU M K. Statics analysis and optimal design of 3-DOF parallel mechanical leg [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering , 2012 , 28(20) : 41-49.

作者简介



张春涛, 2011 年于北方民族大学获得学士学位, 2014 年于北方民族大学获得硕士学位, 现为合肥工业大学博士研究生, 主要研究方向为传感与测量技术、机器人控制技术。

E-mail: 15809584030@139.com

Zhang Chuntao received his B. Sc. degree from North Minzu University in 2011, M. Sc. degree from North Minzu University in 2014. Now he is a Ph. D. candidate at Hefei University of Technology. His main research interests include sensor technology and its application, robot control technology.



王勇(通信作者), 分别在 1998 年和 2008 年于合肥工业大学获得硕士学位和博士学位, 现为合肥工业大学教授, 主要研究方向为机械设计、传感与测量技术、服务机器人。

E-mail: simenkouwang@sina.com

Wang Yong (Corresponding author) received M. Sc. and Ph.D. both from Hefei University of Science and Technology in 1998 and 2008, respectively. Now he is a professor at Hefei University of Technology. His main research interests include mechanical design, sensing and measuring technology, service robot.