

一种具有重力补偿的串联弹性执行器 接触力控制方法

张 婷, 徐建明, 董建伟

(浙江工业大学 信息工程学院, 杭州 310023)

摘要: 针对机械臂末端安装串联弹性执行器 (Series Elastic Actuator, SEA) 与环境或工件接触作业工况, 考虑 SEA 端部负载对接触面压力随机械臂运动姿态变化的问题, 研究一种具有重力补偿的 SEA 接触力控制方法; 首先分析了一种基于滚珠丝杆模组的 SEA 与 Staubli TX90 组合的力控制实验装置结构, 建立了 SEA 与工件接触过程的动力学模型, 提出了一种具有输入重力补偿的 PD 型 SEA 弹簧力控制方法, 该方法在没有接触力传感器的情况下, 依据机械臂关节角对 SEA 端部负载进行重力输入补偿, 通过检测弹簧压缩变形量, 计算并反馈弹簧力实现对接触力的控制; 最后通过 SEA 与正弦面工件接触力控制实验, 并对力传感器采集的接触力信号进行频谱分析, 验证了所提出控制方法的有效性。

关键词: SEA; 机械臂; PD 型; 重力补偿; 力控制

Contact Force Control Method for Series Elastic Actuators with Gravity Compensation

Zhang Ting, Xu Jianming, Dong Jianwei

(College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

Abstract: For the working scenarios of the interaction between the manipulator end mounted a series elastic actuator (SEA) and its environment or workpieces, a SEA contact force control strategy with gravity compensation is studied to solve the problem which the pressure of the SEA end load on the contact surface changes with the movement posture of the manipulator. Firstly, the force control experimental device based on Staubli TX90 and a SEA combined with the ball screw module is analyzed. A dynamic model of the interaction process between the SEA and its workpieces is established. Then, a PD-type SEA contact force control method with input gravity compensation is proposed without contact force sensors. The SEA end load is compensated by the gravity input according to the joint angles of the manipulator. The contact force is controlled by measuring the spring compression deformation, calculating and feeding back the spring force. Finally, the contact force control experiment between the SEA and a sinusoidal surface workpiece is carried out. And the contact force signal collected by the force sensor is analyzed in the frequency spectrum to verify the effectiveness of the proposed control method.

Keywords: SEA; manipulator; PD-type; gravity compensation; force control

0 引言

随着机器人技术的快速发展, 机械臂的应用也越来越多^[1]。在工业应用中, 非接触式作业仅靠位置控制就可以满足应用需求, 比如搬运、焊接、喷涂等。对于接触式作业, 如装配、打磨、抛光等, 单纯的位置控制在大多数情况下已经不能满足加工需求。机械臂与环境之间发生交互作用时, 由于机械臂和环境参数的不确定性和模型误差, 导致机械臂与环境之间产生非常大的接触力, 特别是当机械臂和环境的刚性较大时, 在交互过程中容易对环境和人

造成损害^[2]。因此, 有必要对机械臂与环境之间交互动态过程开展研究, 实现接触力控制, 满足接触式作业的加工需求, 提高机械臂作业的安全性。

研究机械臂与环境之间接触力控制问题, 主要分为主动柔顺控制和被动柔顺控制两种方法。主动柔顺控制主要包括力/位混合控制和阻抗控制^[3]。文献 [4] 考虑到接触环境刚度的不确定性, 提出将阻抗控制方法应用在机械手与环境动态相互作用机制, 通过调节机械手阻抗参数, 实现了机械手力和位置的控制。文献 [5] 提出一种力跟踪阻抗控制器, 利用扩展卡尔曼滤波器估计未知环境刚度, 并通过探测任务实现目标力跟踪。文献 [6] 提出一种机械手位置/力混合控制器, 利用腕式力传感器控制机械手在直角坐标系中运动轨迹, 并通过试验验证位置控制和力控制的同步响应。文献 [7] 提出了一种基于新型滑模自适应位置/力控制策略, 引入自适应控制方法设计位置/力控制器, 并通过 Lyapunov 方法进行稳定性分析, 表明该策略可以保证位置和力误差的渐近收敛。以上文献都是对机械臂进行主

收稿日期: 2019-03-18; **修回日期:** 2019-04-09。

基金项目: 国家自然科学基金项目(U1709213, 61374103); 浙江省自然科学基金重点项目(LZ15F030003)。

作者简介: 张 婷(1993-), 女, 湖北钟祥人, 硕士研究生, 主要从事机器人柔顺力控制方向的研究。

徐建明(1970-), 男, 江西吉安人, 教授, 主要从事工业机器人和伺服控制技术方向的研究。

动柔顺控制, 但算法复杂, 实现起来相对困难。且需采用价格昂贵的力传感器采集接触力。

被动柔顺通过特殊的结构, 如柔性连杆、柔性关节或柔性末端执行器, 使机械装置在与外界环境接触时, 对相互作用力产生自然顺从。其对机械臂精度要求较低, 比主动柔顺控制更易实现, 性价比更高。美国麻省理工学院 Whitney^[8] 带领实验室设计了 RCC (remote center compliance), 用于机器人装配工作, 它的优点是能够对任意柔顺中心进行顺从运动, 但是柔顺中心一旦确定, 就很难改变, 使其通用性较差。文献 [9] 在足式牵引的机器人驱动上引入被动柔顺装置, 使之能适应在陌生环境下底面的起伏变化, 从而维持良好的牵引鲁棒性。串联弹性执行器 (SEA)^[10-11] 最早是由 Gill A. Pratt 提出来的, 同时针对 SEA 力控制问题, 提出一种前馈补偿与 PID 反馈相结合的控制方法, 随后在此基础上, 提出级联 PID 控制策略, 将力矩控制环和位置控制环分别作为控制外环和控制内环, 提高力控制的稳定性。文献 [12-14] 提出将级联 PID 控制方法应用在 SEA 的力/力矩控制中, 实现 SEA 精确和快速的力/力矩控制。文献 [15] 提出将 SEA 应用在机器人无约束环境中的力控制, 通过控制弹簧的压缩量实现精确的力控制输出。文献 [16] 提出了一种滚珠丝杆驱动的线性 SEA 模型, 并对于弹簧放置在电机壳体和连杆之间的情况进行具体研究与分析。文献 [17] 提出一种基于高阶导数的新型力控制方法, 利用 SEA 实现双足机器人反向驱动控制, 提高机器人控制的安全性和高效性。文献 [18] 提出一种新型连续自适应控制方法, 将 SEA 用于驱动机器人, 并保证安全的人机交互过程。文献 [19] 提出一种步态康复机器人的交互控制策略, 通过采用串联弹性驱动器, 实现安全的人机交互, 并在步行实验中用踝关节机器人验证了所提出的方案。文献 [20] 设计了一种基于被动柔顺结构和主动柔顺控制结合的柔顺机械臂, 将串联弹性驱动器传动模块加在关节电机和连杆之间, 以应对工作环境的动态变化以及人机交互的不确定性。

在工业机械臂末端安装 SEA 与工件接触作业工况 (如打磨、抛光) 下, SEA 端部通常需要安装夹具和工具, 其重力对接触面压力随机械臂运动姿态变化, 影响接触力控制。本文针对 SEA 末端未安装力传感器检测工件接触力情况, 采用位移传感器检测弹簧压缩量进而计算弹簧力, 考虑 SEA 端部重物对接触面压力随机械臂运动姿态变化的问题, 研究一种具有重力补偿的 SEA 接触力控制方法。首先对于安装在六关节机械臂末端的 SEA 实验装置结构进行分析, 并建立机械臂与工件接触时的动力学模型, 提出了一种具有输入重力补偿的 PD 型 SEA 弹簧力控制方法, 依据弹簧刚度系数变化调节接触力控制器增益, 其次根据机械臂不同姿态下 SEA 末端重力方向与接触面法线方向的夹角对重力进行输入补偿。最后, 通过机械臂与工件接触力控制实验, 对力传感器采集的接触力信号进行频谱分析, 验证所研究方法的有效性。

1 问题描述

本文研究的力控制实验平台如图 1 所示。平台由一台 Staubli TX90 六轴机械臂, 串联弹性执行器 (SEA), SEA 控制器, 数据采集模块, 伺服驱动器和接触工件等组成。

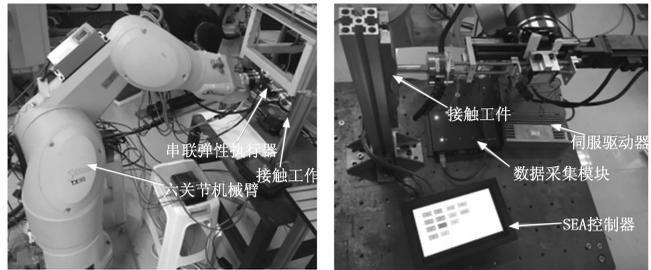


图 1 力控制实验平台

SEA 主要由伺服电机, 联轴器, 滚珠丝杆, 滑动支座, 弹簧, 位移传感器, 接触顶杆等组成, 如图 2 所示。

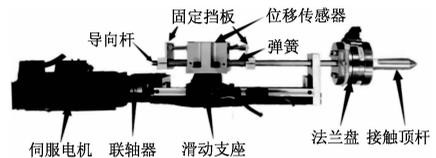


图 2 SEA 结构图

伺服电机通过联轴器与滚珠丝杆连接, 在丝杆上的滑动支座两端分别放置两组弹簧, 通过固定挡板使滑块两端弹簧压缩到一定初始量, 导向杆通过法兰盘和接触顶杆连接。

SEA 安装在六关节机械臂的末端, 当 SEA 末端顶杆接触工件时, SEA 端部负载包括导向杆, 法兰盘和接触顶杆的重力同时作用在工件上, 其对接触面的压力随机械臂姿态变化。如图 3 所示, SEA 端部负载重力在工件表面法线方向的分量为:

$$f_g = M_l g \cos \alpha \quad (1)$$

其中: M_l 为 SEA 端部负载的质量, α 为重力与接触力方向的夹角, $g = 9.8 \text{ N/Kg}$ 为重力加速度, f_g 为 SEA 端部负载重力在工件表面法线方向的分量。

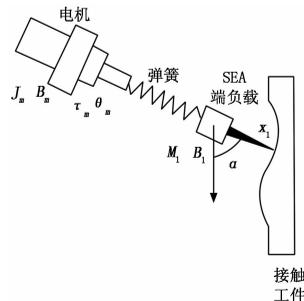


图 3 SEA 与工件接触的示意图

SEA 与工件接触过程的动力学方程为:

$$J_m \ddot{\theta}_m + B_m \dot{\theta}_m + k_s (\theta_m N - x_l) N = \tau_m \quad (2)$$

$$M_l \ddot{x}_l + B_l \dot{x}_l + f_g + F_l = k_s (\theta_m N - x_l) \quad (3)$$

$$x_s = \theta_m N - x_l \quad (4)$$

其中： J_m 代表电机端的转动惯量， B_m 代表电机端的阻尼系数， B_l 代表负载端的阻尼系数， θ_m 和分别代表电机端和负载端的位置， τ_m 代表电机端的输出力矩， k_s 代表弹簧的刚度系数， x_s 代表弹簧压缩量， F_l 代表执行末端与工件之间的相互接触力， N 为旋转角度转换成直线位移的比例关系。

当机械臂与工件接触时，SEA 接触力方向运动的惯性力和摩擦力较小，因此忽略不计，此时只考虑到重力的影响，对式 (3) 化简得接触力表达式为：

$$F_l = F_s - f_g \quad (5)$$

式中， F_s 为弹簧的弹力，弹簧力是通过测量弹簧的压缩量，再结合胡克定律推算出来的，其表达式如下：

$$F_s = k_s x_s \quad (6)$$

所研制 SEA 的弹簧压缩量和弹簧力之间关系，经试验检测如表 1 所示，拟合出的分段直线如图 4 所示，可表示为：

$$F_s = \begin{cases} 1.414x_s, & (x_s \leq 5) \\ 0.9576x_s + 2.4 & (x_s > 5) \end{cases} \quad (7)$$

表 1 弹簧压缩量和弹簧力之间的关系

弹簧压缩量 x_s /mm	弹簧力 F_s /N
0	0
1	1.3
2	2.6
3	4.0
4	5.5
5	7.1
6	8.2
7	9.1
8	10.0
9	11.1
10	12.0
11	12.8
12	13.9

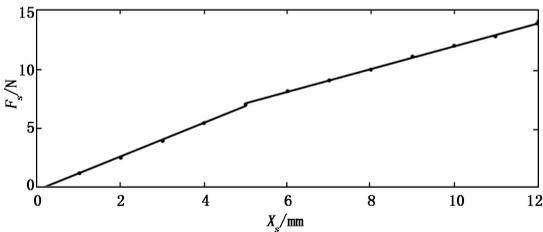


图 4 弹簧压缩量和弹簧力的线性拟合线

本文中所研制 SEA 的主要参数如表 2 所示。

表 2 SEA 的主要参数

参数	值	单位
电机端转动惯量 J_m	0.126	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$
电机端阻尼 B_m	0.1	$\text{N} \cdot \text{m}/\text{rmin}^{-1}$
SEA 端部负载质量 M_l	0.45	kg
旋转角度转换直线位移比例关系 N	$1/2\pi$	mm/rad
最大弹簧力 F_s (MAX)	14	N

2 控制器设计与重力补偿方法

本文的 SEA 力控制系统采用如图 5 所示的级联控制结构；驱动器位置环和速度环^[21]组成内环，力控制环作为外环。输入的期望接触力 F_d 经重力补偿 $\hat{G}(a)$ ，作为期望的弹簧力，输入控制器，通过直线位移传感器测得弹簧压缩量后，依据公式 (7) 计算弹簧力，作为力控制器的反馈量。

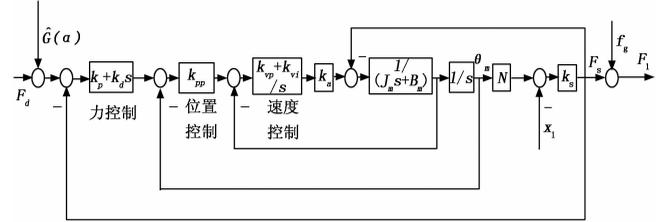


图 5 SEA 力控制系统结构图

2.1 控制器参数设计

设 PD 力控制器的传递函数表达式为：

$$G_0(s) = k_p + k_d s \quad (8)$$

式中， k_p 为力控制器的比例增益， k_d 为力控制器的微分增益。

伺服驱动电流环简化为 $k_a = 1$ ，对速度环化简 $k_{vp} = J_m \omega_\omega$ ， $k_{vi} = B_m \omega_\omega$ ，简化后传递函数表达式为：

$$\frac{\theta_m(s)}{\theta_m(s)^*} = \frac{k_{pp} \omega_\omega}{s^2 + \omega_\omega s + k_{pp} \omega_\omega} \quad (9)$$

其中： k_{pp} 为位置环增益， ω_ω 为速度环的带宽频率。

结合式 (8) 中的 PD 力控制器表达式，当 SEA 的末端固定不变时，系统的闭环传递函数^[22]为：

$$G_d(s) = \frac{F_l(s)}{F_d(s)} = \frac{k_{pp} \omega_\omega N k_s (k_p + k_d s)}{s^2 + (\omega_\omega + k_{pp} \omega_\omega N k_s k_d) s + k_{pp} \omega_\omega (1 + N k_s k_p)} \quad (10)$$

由系统闭环传递函数可知，系统无阻尼自然频率与阻尼比分别为：

$$\omega_n = \sqrt{k_{pp} \omega_\omega (1 + N k_s k_p)} \quad (11)$$

$$\xi = \frac{\omega_\omega + k_{pp} \omega_\omega N k_s k_d}{2 \omega_n} \quad (12)$$

根据实际需要选定好 ω_n 和 ξ ，可得控制器比例和微分增益为：

$$k_p = \frac{\omega_n^2 - k_{pp} \omega_\omega}{k_{pp} \omega_\omega N k_s} \quad (13)$$

$$k_d = \frac{2 \xi \omega_n - \omega_\omega}{k_{pp} \omega_\omega N k_s} \quad (14)$$

通过标准二阶系统，设计 PD 控制器参数，便于分析系统动态性能。

2.2 重力补偿

由式 (1) 可知， f_g 受到 SEA 末端重力方向与接触面法线方向的夹角的影响，对应重力补偿如图 6 所示。重力补偿之后，输入力控制环的力为期望的弹簧力 F_s^* ，经过力控制环输出的弹簧力 F_s ，在 f_g 的作用下，接触力 F_l 能够跟踪期望接触力，来达到预期的控制效果。

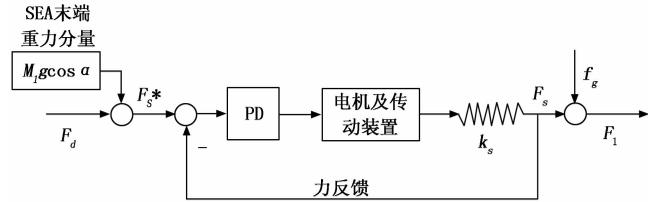


图 6 重力补偿结构图

则重力补偿关系表达式为:

$$F_d + \hat{G}(\alpha) = F_d^* \quad (15)$$

已知 SEA 端负载重力方向竖直向下, α 夹角与机械臂姿态有关, 而六关节机械臂的姿态由关节角决定。根据电机的编码器反馈可计算出各关节的关节角, 再结合六关节机械臂坐标变换矩阵^[23], 求得机械臂末端在笛卡尔空间下接触力方向与重力方向夹角的余弦值^[24], 其表达式如下:

$$\begin{aligned} \cos\alpha = & -\sin(q_2 + q_3)(\cos q_4 \cos q_5 \cos q_6 - \\ & \sin q_4 \sin q_6) - \cos(q_2 + q_3) \sin q_5 \cos q_6 \end{aligned} \quad (16)$$

通过对 f_g 估计, 可以得到重力补偿量为:

$$\hat{G}(\alpha) = M_1 g \cos\alpha \quad (17)$$

3 实验验证

本文的实验装置主要由两个部分组成, 分别是六关节机械臂和单自由度 SEA, 实验装置实物如图 1 所示。实验装置的控制系統结构如图 7 所示。

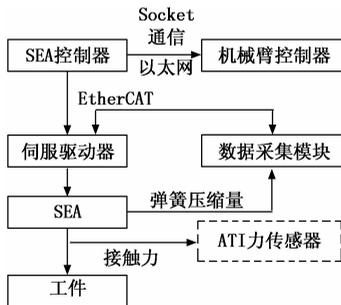


图 7 实验装置控制系统结构图

TX90 控制器通过 socket 发送机械臂的实时关节角度给 SEA 控制器, 用 ATI mini45 六维力传感器采集实际接触力作为实验验证信号。SEA 控制器通过带有同步信号的实时现场总线 EtherCAT 与伺服和数据采集模块通讯。SEA 控制器通过 EtherCAT 控制伺服转动。伺服电机通过滚珠丝杆传动后, 使得顶杆接触工件, 弹簧压缩。安装在 SEA 的凹型滑动支座底部的 KS1-15 自复位直线位移传感器检测到弹簧压缩量后, 输出模拟信号给数据采集模块。并将数据反馈到 SEA 控制器。接触工件曲面为正弦形面, 竖直固定在工作台上。

本实验设定期望的接触力 $F_d = 6 \text{ N}$, 系统无阻尼自然频率与阻尼比分别为 $\omega_n = 72 \text{ Hz}$, $\xi = 1.5$ 。由图 4 和公式 (7) 可知, 当 $x_s < 5$ 时, k_s 为 1.414 N/mm , 当 $x_s > 5$ 时, k_s 为 0.957 N/mm , 依据式 (13)、(14) 选取控制器参数。为了避免在 $x_s = 5$ 时, 控制器参数跳变, 在 $x_{s1} < x_s < x_{s2}$ 区域, 设计一段 k_s 过渡带, 如图 8 所示, 其中 x_{s1} 为 4.5 mm ,

x_{s2} 为 5.5 mm 。此时控制器参数设计为:

$$k_p = \begin{cases} 8.5 & (0 \leq x_s \leq 4.5) \\ \frac{1.217}{-0.457x_s + 3.47} & (4.5 < x_s < 5.5) \\ 12.55 & (x_s \geq 5.5) \end{cases} \quad (18)$$

$$k_d = \begin{cases} 0.04 & (0 \leq x_s \leq 4.5) \\ \frac{0.06}{-0.457x_s + 3.47} & (4.5 < x_s < 5.5) \\ 0.06 & (x_s \geq 5.5) \end{cases} \quad (19)$$

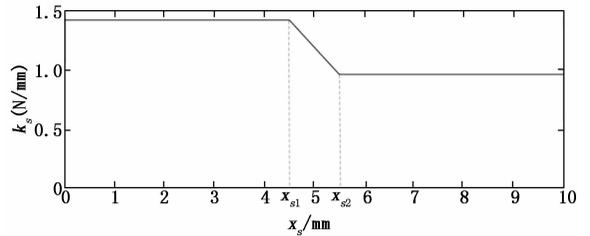


图 8 弹簧刚度系数选取

实验接触情况如图 9 所示, 机械臂不同姿态下, 重力与接触力方向的夹角不同, f_g 的大小也不同。图 9 (a), (b), (c) 分别表示 $\alpha = 90^\circ$, $\alpha = 67.5^\circ$ 和 $\alpha = 112.5^\circ$ 时机械臂与工件的接触情况。由公式 (1) 可得当 $\alpha = 90^\circ$ 时, f_g 的大小为 0; 当 $\alpha = 67.5^\circ$, f_g 为最大值 1.68 N ; 当 $\alpha = 112.5^\circ$ 时, f_g 为最小值 -1.68 N 。

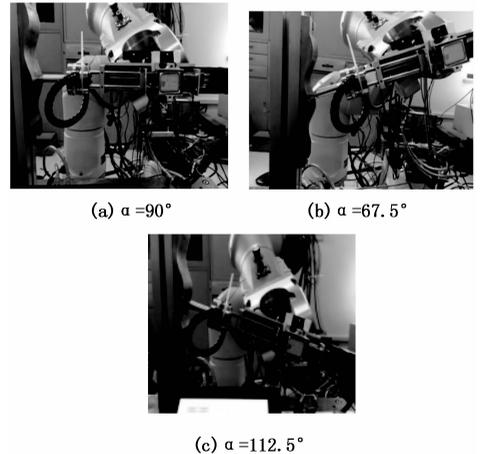


图 9 实验接触情况图

在实验过程中, 为了对力控制效果进行验证, 在 SEA 末端安装 ATI mini45 力传感器 (控制中无需力传感器), 通过力传感器采集有重力补偿和无重力补偿情况下的接触力信号, 并进行对比分析。接触工件曲面可以用表达式 $y = -5\cos(\pi/40)z$ 表示, 其中 y 和 z 代表曲面向右和竖直向下的位移, 机械臂从 $z = 0$ 运动到 $z = 80$ 时, 机械臂走完一个完整曲面函数周期为 10 s , f_g 的变化曲线表达式为 $f_g = 1.68 \sin 0.628 t$, 其中 f_g 的幅值为 1.68 N , f_g 的频率为 0.628 rad/s , 力传感器的采样时间 $T_s = 0.01 \text{ s}$ 。

六维力传感器本身存在高频噪声, 为了从采集的接触力信号中分析重力影响, 本文将力传感器采集的接触力信号与期望力之间的力误差信号进行频谱分析, 力误差信号

表达式为:

$$e_f = F_d - F_l \quad (20)$$

离散傅里叶变换^[25]表达式为:

$$E_f(e^{j\omega}) = \sum_{n=0}^{M-1} e_f(n)e^{-j\omega n} \quad (21)$$

其中: $e_f(n)$ 为力误差信号的时间序列, n 为采样时间序列, $M=1000$ 为采样总数。在不补偿情况下, 力误差信号的频谱图如图 10 (a) 所示, 重力信号所处频率点 0.628 rad/s 的幅值为 933.8, 相应频率的信号幅值为 $933.8/M/2=1.86$ N; 经重力补偿后, 力误差信号的频谱图如图 10 (b) 所示, 重力信号所处频率点 0.628 rad/s 的幅值为 246.5, 相应频率的信号幅值为 $246.5/M/2=0.493$ N。上述实验数据表明, 采用本文提出的重力输入补偿方法, 有效抑制了 SEA 端负载重力对接触力的影响。

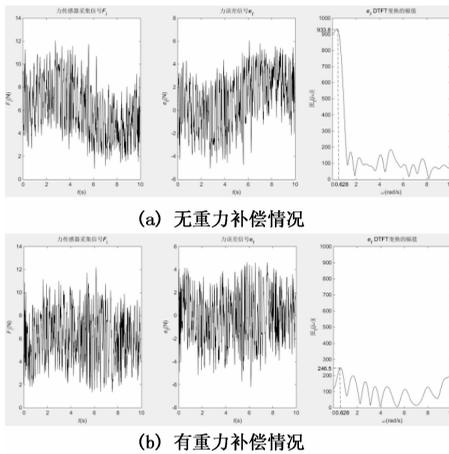


图 10 力传感器采集接触力信号

4 总结

本文提出一种具有重力补偿的 SEA 接触力控制方法, 通过在六关节机械臂末端安装 SEA, 在与工件接触时, 实现 SEA 方向上的接触力控制。通过 SEA 与工件接触过程的动态模型, 分析机械臂运动姿态变化时, SEA 端部重物对工件接触力的影响。采用 PD 型力控制器, SEA 姿态由机械臂控制, 通过机械臂关节角计算出 SEA 末端重力方向与接触面法线方向的夹角, 基于该夹角对 SEA 末端重物进行输入重力补偿。通过接触力跟踪控制实验, 对力传感器采集的接触力信号进行频谱分析, 结果表明本文方法在 SEA 末端重物重力变化频率点的幅值明显降低, 验证了所提控制方法的有效性。该方法可以适用工业机械臂接触作业姿态变化情况下的接触力控制, 如打磨, 抛光等, 对接触式作业有较高的应用价值。

参考文献:

[1] 王田苗, 陶 永. 我国工业机器人技术现状与产业化发展战略 [J]. 机械工程学报, 2014, 50 (9): 1-13.
 [2] Miomir V, Dragoljub S, Yury E. Dynamics and robust control of robot-environment interaction [M]. Singapore: World Sci-

entific, 2009: 1-10.
 [3] 李正义. 机器人与环境间力/位置控制技术研究与应用 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
 [4] Hogan N. Impedance control—An approach to manipulation. I—Theory. II—Implementation. III—Applications [J]. Asme Transactions Journal of Dynamic Systems & Measurement Control B, 1985, 107 (1): 1-24.
 [5] Rovea L, Niccolò I, Vicrntini F, et al. Optimal impedance force—tracking control design with impact formulation for interaction tasks [J]. IEEE Robotics & Automation Letters, 2017, 1 (1): 130-136.
 [6] Craig J J, Raibert M H. A systematic method of hybrid position/force control of a manipulator [A]. IEEE International Computer Software & Applications Conference [C]. Piscataway, USA: IEEE, 1979: 446-451.
 [7] Wang H, Li S, Cao Q. Adaptive position/force control of coordinated multiple manipulators based on a new sliding mode [A]. Chinese Control and Decision Conference [C]. Yinchuan, China: IEEE, 2016: 5448-5453.
 [8] Whitney D E, Rourke J M. Mechanical behavior and design equations for elastomer shear pad remote center compliances [J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement & Control, 1986, 108 (3): 223-232.
 [9] Espenschied K S, Quinn R D, Beer R D, et al. Biologically based distributed control and local reflexes improve rough terrain locomotion in a hexapod robot [J]. Robotics & Autonomous Systems, 1996, 18 (1-2): 59-64.
 [10] Pratt G A, Williamson M M. Series elastic actuators [A]. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots & Systems [C]. Piscataway, USA: IEEE, 1995: 399-406.
 [11] Pratt G A, Williamson P, Bolton C, et al. Late motor processing in low—impedance robots: Impedance control of series—elastic actuators [A]. American Control Conference [C]. Piscataway, USA: IEEE, 2004: 3245-3251.
 [12] Li Y F, Chu C Y, Xu J Y, et al. A humanoid robotic wrist with two—dimensional series elastic actuation for accurate force/torque interaction [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2016, 21 (3): 1315-1325.
 [13] Oblak J, Matjaclac Z. On stability and passivity of haptic devices characterized by a series elastic actuation and considerable end—point mass [A]. IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics [C]. Piscataway, USA: IEEE, 2011: 1-5.
 [14] Tagliamonte N L, Accoto D. Passivity constraints for the impedance control of series elastic actuators [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering, 2014, 228 (3): 138-153.
 [15] Pratt J, Krupp B, Morse C. Series elastic actuators for high fidelity force control [J]. Industrial Robot, 2013, 29 (3): 234-241.