

# 面向航天器装配的机械臂柔性力控研究

## Study on Flexible Force Control on Robot Arm for Spacecraft Assembly

北京卫星环境工程研究所 卫月娥 张成立 孟伟 熊涛 胡瑞钦

**[摘要]** 针对航天器装配的特点,研究一种机械臂柔性力控方法:在机械臂末端安装六维力传感器感力与力矩信息,通过重力补偿消除负载重力的影响,得到外部作用力/力矩信息作为输入控制机械臂运动,实现负载的柔性随动。

**关键词:** 机械臂 柔性力控 碰撞检测 航天器装配

**[ABSTRACT]** Based on the characteristics of the spacecraft assembly, a flexible force control method on robot arm is studied: 6-axis force/torque sensor is mounted on the end of robot arm, through gravity compensation, the external force/torque information can be obtained, which is used as input parameters to control the robot arm move following the external force/torque.

**Keywords:** Robot arm Flexible force control Collision detection Spacecraft assembly

航天器产品通常不成批量,难以做到自动化生产,目前的装配作业大量依赖人工操作,并辅以吊具、翻转支架车等简易工具进行不同零部件的安装。人工操作的方式柔性程度高,适合于航天器小量研制的特点。但对于大重量零部件的安装,人工托举难以稳定地把控被安装对象,特别是在安装空间狭小的情况下,难以对被安装件进行位姿调整,易发生磕碰,损伤产品的风险较高。

机械臂具有载重量大、调整精度高等特点,可以实现大重量零部件的稳定保持与精确调整。但机械臂通常应用于批量产品的生产流水线,面对固定的工况,不断重复相同的动作,生产效率高。如何在工况多变的航天器装配中有效、灵活地发挥机械臂的特点,解决大重量设备的安装难题,提高装配过程的安全可靠性,提高产品质量及生产效率,是应用机械臂进行航天器装配需要解决的问题。

本文针对航天器装配的特点,研究一种机械臂的柔性力控方法,旨在提高航天器大重量装配的质量、效率和安全性。

## 1 机械臂柔性力控方法

在机械臂的一些特殊应用(如轴孔装配,曲面磨削,去毛刺等)中,通常采用“柔顺控制”<sup>[1]</sup>使机械臂末端顺应工件边界,并能将接触力保持在适当的范围内。柔顺控制方法分为被动柔顺和主动柔顺2种<sup>[2]</sup>:被动柔顺控制是设计一种柔性机械装置,并把它安装在机械臂的腕部,用来提高机械臂末端顺应外部环境的能力<sup>[3]</sup>;主动柔顺是根据力传感器的反馈信息,结合适当的控制方法(如阻抗控制<sup>[4]</sup>、力/位混合控制<sup>[5]</sup>等),根据实际作用力与理想作用力之间的误差对机械臂的运动轨迹进行实时修正,以使接触力保持在要求的范围内<sup>[6-7]</sup>。

柔顺控制可以使机械臂在既定轨迹的基础上作微小修正,将接触力保持在适当、安全的范围内,还可以通过对机械臂末端施力,牵引其进行大范围的运动。德国KUKA公司开发的LWR轻型机器人借助关节力矩、位置的反馈控制可以实现随人手牵引运动<sup>[8]</sup>,但该款机器人的额定负载较小(7kg),在随人手运动控制中未考虑负载重力的影响。

现有机械臂的柔性控制均针对负载较小<sup>[8]</sup>、或者空间微重力<sup>[1,4]</sup>的情况,不考虑负载重力的影响。但在地面环境、负载较大的情况下,负载重力对机械臂力反馈的影响不可忽略,要利用机械臂实现航天器大重量设备的柔性随动控制,必须对负载重力的影响进行补偿。

本文研究的机械臂柔性力控方法为:在机械臂末端安装六维力传感器感知作用其上的力与力矩信息,通过负载重力补偿算法消除负载重力的影响,得到外部作用的力/力矩信息作为输入,控制机械臂运动,实现负载的柔性随动及碰撞检测。采用这种方法,操作者用较小的力即可控制调整大重量工件的位姿,且可以直观地按照日常操作习惯对机械臂末端负载进行位姿调整,不易出现误操作。这种方法将机械臂载重量大、运行稳定精度高的特点,与人观察、操作的灵活性相结合,适用于航天器复杂多变的装配工况。

## 2 机械臂柔性力控实现

### 2.1 系统组成

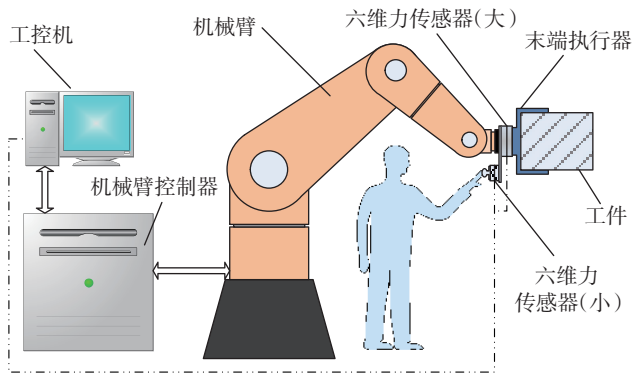


图1 机械臂柔性力控系统组成示意图

Fig.1 Diagram for flexible force control system on robot arm

机械臂柔性力控系统如图 1 所示,主要由工控机、机械臂控制器、机械臂、大小 2 个六维力传感器、末端执行器、工件等组成。

在该系统中,工控机对六维力传感器信号进行采集与处理,根据受力信息及柔性力控算法生成机械臂运动指令,发送至机械臂控制器中,控制机械臂运动,实现工件的柔性随动及碰撞检测。大六维力传感器的量程较大,安装在机械臂末端与负载(即末端执行器与工件)之间,通过重力补偿算法消除负载重力的影响后,可感知负载受到的外部作用力,如碰撞力、人手作用力等。单独使用大六维力传感器可以实现对负载的柔性随动控制,此外还在机械臂末端设置了小六维力传感器。

小六维力传感器的量程较小、测量灵敏度高,专用于感知人手的操作力。在需要利用大六维力传感器精确感知工件接触力,或工件安装空间狭小不便于人手操作的情况下,可以通过操控小六维力传感器实现对工件的位姿调整,而大六维力传感器在这种情况下专用于碰撞检测。

## 2.2 重力补偿

在图 1 中,大六维力传感器安装在机械臂末端与负载之间,负载重力作用在六维力传感器上,要得到负载受到的外部作用力信息,如碰撞力、人手作用力等,需要对负载重力的影响进行补偿。若没有人手力或其他外力作用在负载上,则六维力传感器测得的力与力矩信息完全由负载重力引起。这种情况下,控制机械臂使负载处于不同的空间姿态,可以得到多组六维力传感器的测量数据,再利用最小二乘法求解得到负载的重量大小与重心坐标。

六维力传感器坐标系中负载重力的作用示意图如图 2 所示,六维力传感器的坐标系为空间直角坐标系,有  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  3 个坐标轴,负载重力为  $G$ ,负载质心在六维力传感器坐标系中的坐标为  $(x, y, z)$ ,负载重力  $G$  在  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  轴方向的作用分力分别为  $G_x$ 、 $G_y$ 、 $G_z$ ,负载重力  $G$

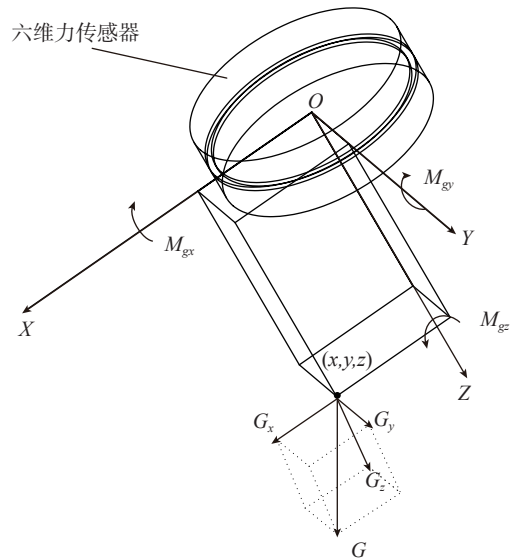


图2 六维力传感器坐标系中负载重力作用示意

Fig.2 Load gravity in coordinate of 6-axis force/torque sensor

对  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  轴的作用力矩分别为  $M_{gx}$ 、 $M_{gy}$ 、 $M_{gz}$ ,根据力与力矩的关系,参照图 3 易得到:

$$\begin{cases} M_{gx} = G_z \times y - G_y \times z \\ M_{gy} = G_x \times z - G_z \times x \\ M_{gz} = G_y \times x - G_x \times y \end{cases} \quad (1)$$

取多个不同的负载姿态测量得到的多组六维力传感器数据,易求解得到负载质心在六维力传感器坐标系中的坐标  $(x, y, z)$  以及负载重力  $G$  的大小。

假设在有外力作用于负载的情况下,六维力传感器测得的 3 个力分量为  $F_x$ 、 $F_y$ 、 $F_z$ ,3 个力矩分量为  $M_x$ 、 $M_y$ 、 $M_z$ 。

在柔性力控过程中,负载重力在六维力传感器坐标系中的方向随机械臂末端姿态变化而改变。经过对机械臂安放姿态的标定,容易通过机械臂控制系统实时得到重力方向与六维力传感器坐标系  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  轴间的夹角  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ ,则可计算得到负载重力在六维力传感器坐标系 3 个坐标轴上的投影为:

$$\begin{cases} G_x = G \times \cos \alpha \\ G_y = G \times \cos \beta \\ G_z = G \times \cos \gamma \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $G_x$ 、 $G_y$ 、 $G_z$  即是六维力传感器测得的力分量  $F_x$ 、 $F_y$ 、 $F_z$  中由于负载重力产生的部分,将其与已求得的负载重心坐标  $(x, y, z)$  代入式(1),得到  $M_{gx}$ 、 $M_{gy}$ 、 $M_{gz}$ ,即是六维力传感器测得的力矩分量数据  $M_x$ 、 $M_y$ 、 $M_z$  中由于负载重力产生的部分。

继而可得,外部力在 3 个坐标轴上的分量为:

$$\begin{cases} F_{ex} = F_x - G_x \\ F_{ey} = F_y - G_y \\ F_{ez} = F_z - G_z \end{cases} \quad (3)$$

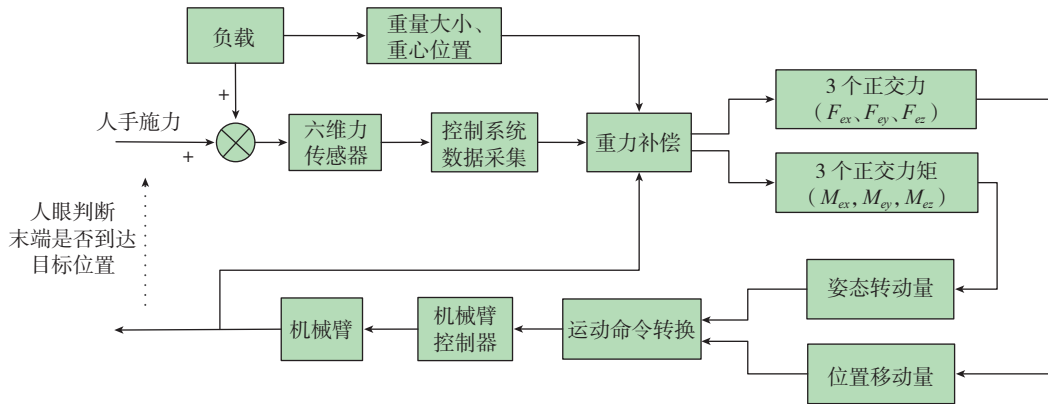


图3 机械臂柔性随动控制原理图  
Fig.3 Principle diagram of flexible force control on robot arm

外力矩在 3 个坐标轴上的分量为：

$$\begin{cases} M_{ex} = M_x - M_{gx} \\ M_{ey} = M_y - M_{gy} \\ M_{ez} = M_z - M_{gz} \end{cases} \quad (4)$$

### 2.3 柔性随动控制

柔性随动控制要达到的理想效果是工件随人手的作用跟随人手运动,操作者用较小的力就可以稳定地操作大重量工件。若人手直接作用于工件,则通过对大六维力传感器进行重力补偿即可得到人手作用的力与力矩信息;若人手作用于小六维力传感器,则无需对负载进行重力补偿即可得到人手作用的力与力矩信息。柔性随动控制就是根据获得的人手作用信息制定控制策略控制机械臂产生柔性随动效果,机械臂柔性力控系统的控制框图如图 3 所示。

在柔性随动控制中根据应用需求设计了 4 种模式:连续移动、连续转动、点动移动、点动转动。连续移动/转动用于工件的大范围移动/转动,点动移动/转动用于对工件进行精确定量的移动/转动,4 种模式在实际使用中根据需要进行切换,每种模式的详细设计如下所述。

#### 2.3.1 连续移动

连续移动模式下负载按人手作用力的方向运动,运动速度与人手作用力的大小相关,连续移动模式的控制流程图如图 4 所示。

连续移动模式控制中,系统获得的外部作用力为控制输入,由于传感器自身误差或者重力补偿误差,在实际没有外力作用至传感器或负载上的情况下,系统得到的外部作用力并不为 0,因此为系统获得的外部作用力大小  $F$  设定阈值  $F_s$ ,当  $F > F_s$  时方能对机械臂产生作用。

机械臂运动速度大小  $V$  与外部作用力大小  $F$  的关系如图 5 所示。当  $F_s < F < F_{s2}$  时,  $V$  随  $F$  的增大线性增加,当  $F \geq F_{s2}$  时,  $V = V_{max}$ 。这样的  $V-F$  关系中,  $V$  随  $F$  连

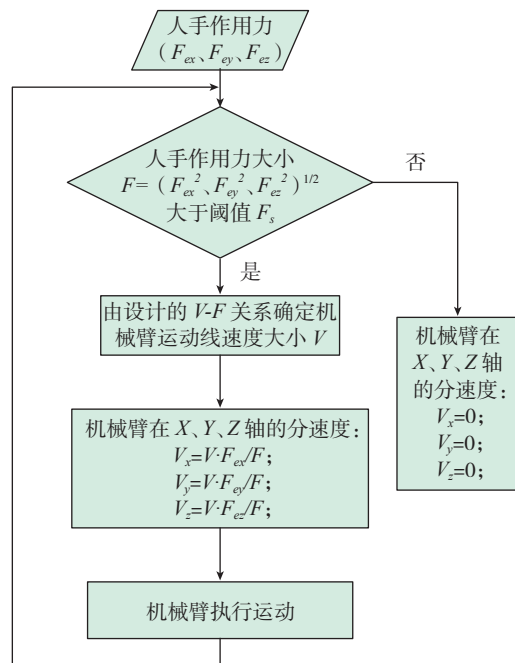


图4 连续移动模式控制流程图  
Fig.4 Flow chart of continuous moving mode control

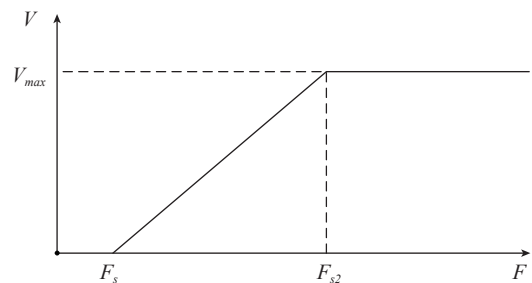


图5  $V-F$ 关系示意图

Fig.5  $V-F$  relationship curve

续变化,没有跳变,可以避免外力变化带来的机械臂剧烈抖动;当  $F_s < F < F_{s2}$  时,外部作用力越大,机械臂运动速度越快,这符合人的日常习惯;为避免机械臂速度过快影响操作安全,为  $V$  设置上限  $V_{max}$ 。总速度  $V$  确定后,

按照各轴力的分量( $F_{ex}, F_{ey}, F_{ez}$ )将  $V$  分配为各轴分速度( $V_x, V_y, V_z$ ),使机械臂运动方向与外部作用力方向相同,实现柔性跟随移动。

2.3.2 连续移动

连续转动模式下机械臂绕  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  3 个方向中人手作用力矩最大的方向转动,转动速度与相应作用力矩的大小相关,连续转动模式的控制流程如图 6 所示。

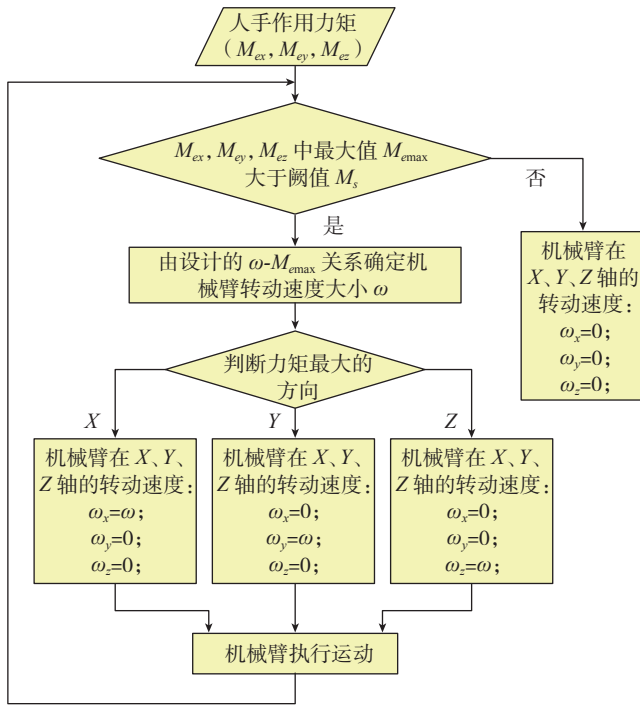


图6 连续转动模式控制流程图

Fig.6 Flow chart of continuous turning mode control

连续转动模式控制中,首先比较得到  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  3 个方向力矩( $M_{ex}, M_{ey}, M_{ez}$ )中的最大值  $M_{emax}$ ,同理为  $M_{emax}$  设定一阈值  $M_s$ ,当  $M_{emax} > M_s$  时方能对机械臂产生作用。机械臂转动角速度  $\omega$  与  $M_{emax}$  的关系如图 7 所示,与上述  $V$ - $F$  关系类似。

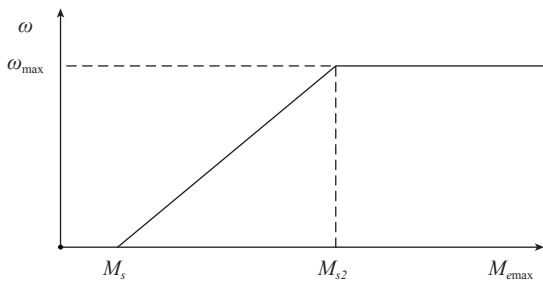


图7  $\omega$ - $M_{emax}$  关系示意图

Fig.7  $\omega$ - $M_{emax}$  relationship curve

2.3.3 点动移动

在点动移动模式中,机械臂沿  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  3 个方向中

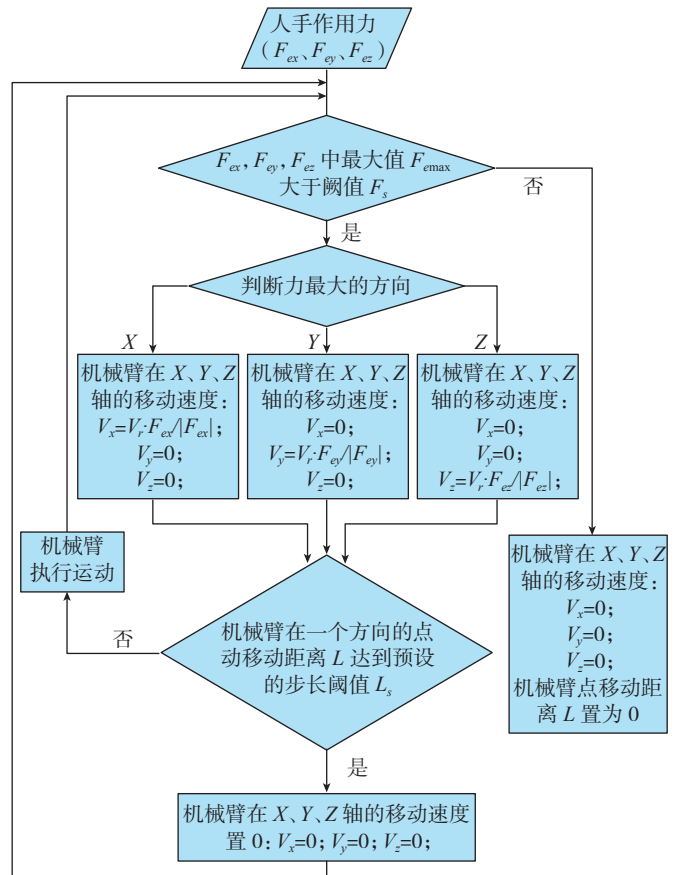


图8 点动移动模式控制流程图

Fig.8 Flow chart of crawling moving mode control

手作用力最大的方向点动移动,每次有效的外部作用力只引起机械臂按预设的速度移动一个步长  $L_s$ 。点动移动模式的控制流程如图 8 所示。

点动移动模式控制中,首先比较得到  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  3 个方向作用力( $F_{ex}, F_{ey}, F_{ez}$ )中的最大值  $F_{emax}$ ,当  $F_{emax}$  超过阈值  $F_s$  时,作用力可以对机械臂产生作用,判断作用力最大的方向,并将机械臂在该方向的运动速度置为预设的值  $V_r$ ,速度方向与最大作用分力的方向相同。当机械臂在最大作用力方向的移动距离  $L$  未达到步长  $L_s$ ,且  $F_{emax}$  超过  $F_s$  时,机械臂沿最大作用分力方向运动;当  $L$  未达到步长  $L_s$ ,但  $F_{emax}$  变得低于  $F_s$  时,机械臂停止运动,  $L$  置为 0;当  $L$  已达到步长  $L_s$ ,但  $F_{emax}$  仍超过  $F_s$ ,机械臂不再运动,直至  $F_{emax}$  变得低于  $F_s$ ,  $L$  置为 0 后,机械臂才相应下一次点动运动,这样避免了作用力始终大于阈值的情况下机械臂产生连续运动。

2.3.4 点动转动

点动转动模式的控制流程与点动移动模式类似,控制流程如图 9 所示。

3 柔性力控试验

柔性力控试验采用德国 KUKA 公司的 KR210 机器

表1 KR210机械臂性能参数

属性	参数值
负载 /kg	210
运动轴数	6
最大工作半径 /mm	2700
重复定位精度 /mm	± 0.06



图11 六维力传感器安装图

Fig.11 Mounting of 6-axis force/torque sensor

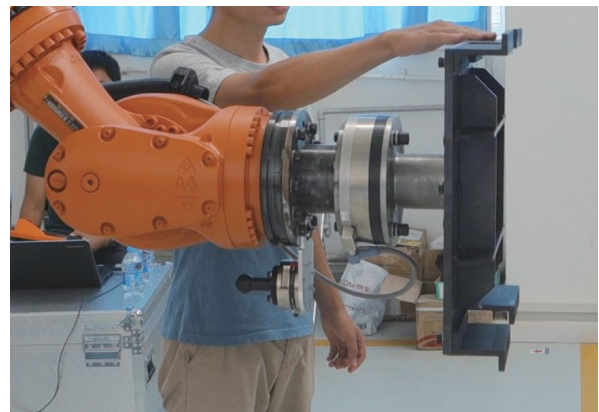


图12 大六维力传感器柔性力控

Fig.12 Flexible force control by big 6-axis force/torque sensor

力补偿算误差在 3N 以内。试验完成全部 4 种控制模式的柔性力控。试验中将机械臂运动线速度限定在 83mm/s 以内,角速度限定在 95.5°/s 以内。人手直接作用于负载,利用大六维力传感器进行柔性控制的照片如图 12 所示,试验将大传感器设定的外力阈值为 10N,外力矩阈值为 5N·m。人手作用于小六维力传感器进行柔性随动控制,利用大六维力传感器进行碰撞检测的照片如图 13 所示,试验中为小传感器设定的外力阈值为 1.5N,外力矩阈值为 0.5N·m,大六维力传感器碰撞检测阈值为 10N。由于机械臂加减速会带来惯性力,大六维力传感器动作阈值(10N)超出重力补偿误差

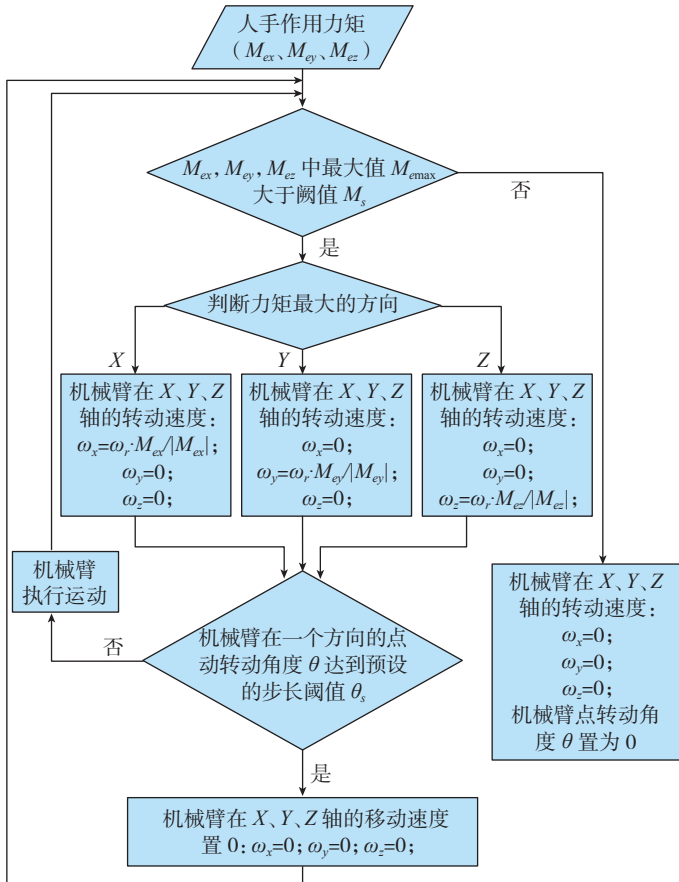


图9 点动转动模式控制流程图

Fig.9 Flow chart of crawling turning mode control

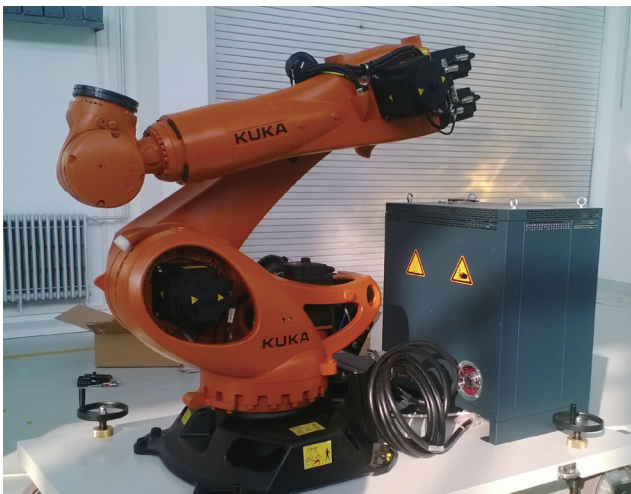


图10 KR210机械臂

Fig.10 KR210 robot arm

人,主要参数见表 1,机械臂实物见图 10。大六维力传感器采用 ATI-Omega190 型传感器,小六维力传感器采用 ATI-Gamma 型传感器,2 个力传感器安装在机械臂上的六维力传感器实物见图 11。

试验使用负载的重量约为 300N,试验得到的重

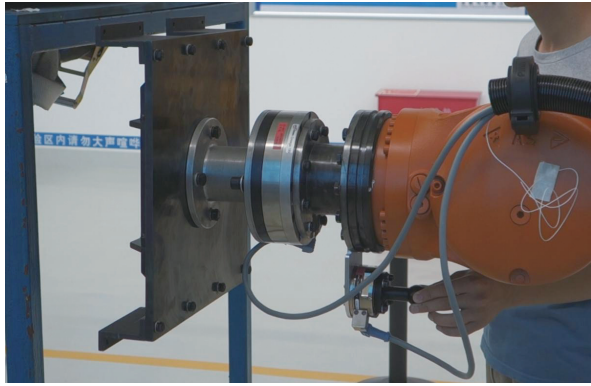


图13 小六维力传感器柔性力控

Fig.13 Flexible force control by small 6-axis force/torque sensor

(3N)较大数值,这样减小了惯性力对操作柔顺性的影响。

通过试验进行控制参数优化后,实现了全部4种控制模式的柔性力控,系统柔性操作体验良好,研究初步实现了设计的机械臂柔性力控功能。

#### 4 结论

本文针对航天器装配的特点,研究一种机械臂的柔性力控方法,在机械臂末端安装六维力传感器感知作用其上的力与力矩信息,通过重力补偿消除负载重力的影响,得到外部作用的力/力矩信息作为输入控制机械臂运动,实现负载的柔性随动。根据航天器装配应用特点,采用大、小六维力传感器结合的方式进行柔性随动控制和碰撞检测,设计实现了“连续移动”、“连续转动”、“点动移动”、“点动转动”4种柔性随动控制模式。试验实现了设计的柔性随动与碰撞检测功能,对于重量为300N的负载,重力补偿误差达到3N以内,大六维力传感器动作外力阈值达到10N,外力矩阈值达到5Nm,小六维力传感器动作外力阈值达到1.5N,外力矩阈值达到0.5N·m。研究根据航天器装配的特点,初步实现了机械臂柔性力控功能,达到了良好的柔顺控制效果。

#### 参考文献

- [1] 董晓星. 空间机械臂力柔顺控制方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [2] Vukobratovic M, Tuneski A. Contact control concepts in manipulation robotics-an overview. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1994, 41(2): 12-24.
- [3] Lee S. Shear control of elastomer shear pads for variable remote center compliance. Advanced Robotics, 2009, 23(1): 227-237.
- [4] 黄剑斌, 李志. 基于阻抗控制的空间机械臂接触控制与轨迹规划技术. 航天器工程, 2013, 22(4): 43-48.
- [5] Farooq M, Wang D B. Hybrid force/position control scheme

for flexible joint robot with friction between and the end-effector and the environment. International Journal of Engineering Science, 2008, 46: 1266-1278.

[6] Seraji H, Colbaugh R. Force tracking in impedance control. The International Journal of Robotics Research, 1997, 16(1): 97-117.

[7] Luo Y, Wang X D, Wang M X. A force/stiffness compensation method for precision multi-peg-hole assembly. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 67(1): 951-956.

[8] Bischoff R, Kurth J, Schreiber G, et al. The KUKA-DLR lightweight robot arm - a new reference platform for robotics research and manufacturing//Proceeding of the 41st International Symposium on Robotics. Munich: VDE, 2010: 1-8.

(责编 亿霖 深蓝)

(上接第146页)

的位置误差和姿态误差(图3~6),标定的效果明显,精度提高了10倍。

#### 6 结论

(1)在仿真验证中辨识出的几何误差等于假定值,验证了本文提出算法的正确性。(2)试验验证位姿精度提高了约10倍,验证了本文提出算法的有效性。

#### 参考文献

- [1] Masory O, Wang J, Zhuang H Q. On the accuracy of a Stewart platform (Part 2): Kinematic calibration and compensation// Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. New York: IEEE, 1993: 725-731.
- [2] 黄田, 汪劲松, David J W, 等. 并联构型装备几何参数可辨识性研究. 机械工程学报, 2002, 38(5): 1-6.
- [3] 裴葆青, 罗学科, 陈五一, 等. 6UPS并联机构静态误差的矢量法标定. 中国机械工程, 2006, 17(8): 854-857.
- [4] 魏世民, 周晓光, 廖启征. 六轴并联机床运动精度的标定研究. 中国机械工程, 2003, 14(23): 8-12.
- [5] 彭斌彬, 高峰. 并联机器人的标定建模. 机械工程学报, 2005, 41(8): 132-135.
- [6] 李新友, 陈五一, 韩先国. 基于正交设计的3-RPS并联机构精度分析与综合. 北京航空航天大学学报, 2011, 37(8): 979-984.
- [7] Chen I M, Yang G L. Kinematic calibration of modular reconfigurable robots using product-of-exponentials formula. Journal of Robotic Systems, 1997, 14(11): 807-821.
- [8] 韩先国, 陈五一, 陈鼎昌. 基于路径跟踪原理求解6SPS并联机构位置正解. 北京航空航天大学学报, 2002(3): 370-372.
- [9] Hong L, Cong M, Hong C. Error analysis of parallel manipulators based on differential operators// Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. Changchun: IEEE, 2009.
- [10] Arun K S, Huang T S, Blostein S D. Least-squares fitting of two 3-D point sets. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1987, 9(5): 698-700.

(责编 深蓝)